

文章编号: 2095-4980(2025)09-0898-08

G 波段双模带状注交错双栅行波管

王文博, 阮存军*

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘要: 交错双栅行波管具有高功率、宽频带、易加工、散热优良等优势, 在全球范围内广受关注。本文基于 G 波段交错双栅慢波结构, 设计了一种双模工作模式下, 通过带状电子注激励的超宽带大功率交错双栅行波管相互作用系统。仿真结果表明, 利用双模模式能够进一步提高交错双栅行波管的工作带宽; 通过采用布拉格反射器隔离信号以及分段式结构抑制振荡等稳定行波放大技术, 可获得具有优传输、高稳定、宽频带、大功率的太赫兹相干辐射输出, 达到输出功率大于 100 W, 工作带宽超 60 GHz 的行波相互作用性能。此外, 基于微纳加工工艺, 开展平面三层高频结构的方案设计, 充分展示了太赫兹大功率宽带相干辐射源在工程实现中的潜力与可行性。

关键词: 交错双栅; 双模; 带状电子注; 宽频带; 高功率

中图分类号: TN124

文献标志码: A

DOI: 10.11805/TKYDA2025084

G-band double-mode sheet-beam staggered double-vane traveling-wave tube

WANG Wenbo, RUAN Cunjun*

(School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The Staggered Double-Vane Traveling-Wave Tube (SDV-TWT) is attracting worldwide attention for its high power, wide bandwidth, ease of fabrication, and excellent heat dissipation. In this work, an ultra-wideband, high-power SDV interaction circuit driven by a sheet electron beam is designed for dual-mode operation in the G-band. Simulation results show that exploiting two synchronous modes can further extend the operating bandwidth of the SDV-TWT. By employing Bragg reflectors to isolate the signal and a segmented structure to suppress oscillations—both well-established techniques for stable traveling-wave amplification—the system generates coherent terahertz radiation with superior transmission, high stability, broad bandwidth, and high power, achieving an output power exceeding 100 W and an operating bandwidth greater than 60 GHz. Moreover, a planar three-layer high-frequency circuit fabricated with micro-/nano-scale processes is proposed, fully demonstrating the potential and feasibility of realizing a high-power, broadband, coherent terahertz source in practice.

Keywords: Staggered Double-Vane (SDV); double-mode; sheet beam; wide frequency band; high power

太赫兹 (Terahertz, THz) 波是指频率介于 0.1~10 THz 之间, 波长在 0.03~3 mm 之间的电磁波。太赫兹波的频谱正好处于微波与红外光之间, 相对传统微波领域, 具有波长更短、频带更宽的特点, 频谱资源更为丰富; 相对于远红外光频段, 具有更强的非电离辐射和穿透性。此外, 太赫兹波本身具有很强的物质识别能力, 可与多种物质产生独特的相互作用, 称为物质的指纹谱; 同时, 太赫兹频段器件尺寸较小, 集成度高, 重量更轻, 更易于实现小型化结构的设计。因此, 太赫兹频段在高速率数据传输、大容量通信、高分辨成像、高精度度测控、

收稿日期: 2025-03-17; 修回日期: 2025-07-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62371021; U22A2020)

*通信作者: 阮存军 email: ruancunjun@buaa.edu.cn

引用格式: 王文博, 阮存军. G 波段双模带状注交错双栅行波管[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2025, 23(9): 898-905. DOI: 10.11805/TKYDA2025084.

Citation format: WANG Wenbo, RUAN Cunjun. G-band double-mode sheet-beam staggered double-vane traveling-wave tube[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2025, 23(9): 898-905. DOI: 10.11805/TKYDA2025084.

隐藏物体探测、材料结构分析、医学检测与诊断、生物谱和化学谱研究等方面具有非常重要的技术应用特色和广阔的科学发展前景。对太赫兹频段的开发和利用已成为当前研究者关注的焦点^[1-6]。行波管放大器作为一种传统的真空电子器件,因其兼具高功率、宽频带、易于加工、散热稳定等一系列优势,在作为超宽带大功率源领域内受到了人们的重点关注,并在如国防安全、信息通信、星间卫星、空间探测等一系列高精尖科研领域内都有十分广泛的应用^[7-9]。但随着工作频段进入到太赫兹频段,传统的行波管慢波结构如螺旋线型慢波结构与耦合腔型慢波结构,因其较为复杂的空间三维结构和较低的信号输出性能,很难满足太赫兹科研领域的高需求标准。对此,进一步提升行波管在太赫兹频段的输出性能以及更好地实现太赫兹行波管的工程制备成为当前行业的研究热点之一。近年来,基于微纳工艺开展的平面分布交错双栅行波管,因其更为简单的空间结构和更为优秀的输出性能受到了人们的广泛关注。交错双栅行波管最早由美国UC-Davis大学于2008年在美国国防部国防高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)的高频集成真空电子学计划中提出^[10]。作为一种新型真空电子器件,其基于矩形栅行波结构优化而成,在类波导结构的影响下,具有相对较高的功率容量和较宽的工作带宽;同时,又因其具有天然平面结构,适配于当今发展较为成熟的微纳集成工艺技术,极大降低了结构本身的加工难度;此外,交错双栅慢波结构天然的矩形通道更适用于与带状电子注之间的匹配相互作用,能够进一步提升行波管的输出性能。基于高性能与易加工的双重优势,交错双栅行波管已成为太赫兹大功率信号源领域中重点研究方向,但从目前研究现状看,太赫兹波段下的交错双栅行波管的研究进展却不尽如人意,输出功率、工作带宽、稳定性等不能满足当前的发展需求。以G波段为例,直至目前,全球仅有美国UC-Davis和我国电子科技集团第十二研究所成功研制出交错双栅行波管实际样管,但也仅能实现百瓦量级的功率输出与不足10 GHz的工作带宽^[11-12],远没有达到这一类高性能器件的预期研究结果。因此,如何进一步提升交错双栅行波管的输出性能仍是该领域内的重点研究内容。

针对上述交错双栅行波管存在的输出性能有待进一步提高的问题,本文充分开展了行波管双模工作模式的分析、设计与研究工作,设计了一款输出功率大于100 W,工作带宽大于60 GHz的宽带大功率的带状注双模交错双栅行波管,在实现行波管高输出功率的同时,进一步提升行波管的工作带宽,并解决了带状电子注传输难度大的问题。

1 双模交错双栅单周期慢波结构的分析与设计

为充分发挥交错双栅慢波结构的宽带特性,实现行波管输出性能的进一步提升,实验室开展了行波管双模工作模式的深入研究。双模实际上指的是行波管慢波结构中基模电磁波存在的两种简并的工作模式。对于常规交错双栅慢波结构,其理论分析基于矩形栅慢波结构,核心思路为场匹配法的本征函数法。2012年,中国科学院空天信息创新研究院刘青伦团队推导出上下栅任意错位下的慢波结构场分布,并最终确定当上下栅正好错位半个周期,即交错双栅慢波结构时,相互作用区域得到的轴向相互作用电场最大^[13]。根据文献理论,以G波段为例,文献推导出的慢波结构基模色散结果和仿真验证对比结果如图1所示,其中,CST(Computer Simulation Technology)为计算机仿真技术。

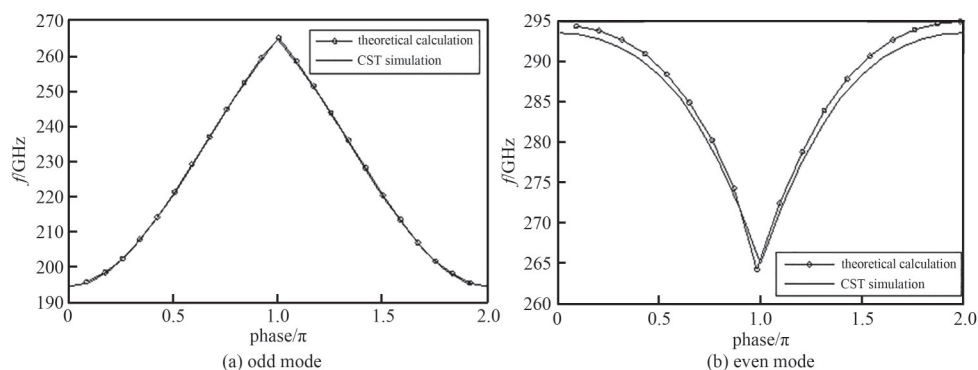


Fig.1 Dispersion results of the G-band SDV-SWS

图1 G波段交错双栅单周期慢波结构色散结果

从图1中可以看到,对于慢波结构基模的色散结果,实际上会存在2种简并的工作模式,且这2种模式各自存在一定的工作频段。在常规的行波管设计中,通常仅考虑模式一的工作模式,这实际上限制了行波管频带的进一步拓宽。若能够将模式二同时利用到行波管的设计中,则能够突破模式一的频带限制,实现工作带宽的进

一步拓宽，这即为双模工作模式的设计原理。为能够充分利用双模模式，须优化慢波结构尺寸参数，使慢波结构的 2 种工作模式能够实现紧密相连，即在 π 相位点处实现平滑的模式过渡；同时，需进一步扩大模式二覆盖频段范围，实现慢波结构频带范围的进一步拓宽。目前，团队开展了大量的相关研究工作，通过充分利用双模工作原理，极大改善了交错双栅行波管的工作性能^[14-16]。

本文深入开展 G 波段双模带状注交错双栅行波管的研究与设计工作。首先开展单周期慢波结构的仿真建模与优化工作，其模型结构及结构参数表分别如图 2 和表 1 所示。为进一步分析设计结构产生的互作用性能，同步开展了慢波结构的色散特性、相速度分布以及耦合阻抗的分析，其结果如图 3 所示。

从图 3(a)中可以看出，设计的慢波结构的色散曲线与 20 kV 的电子注线充分匹配：在奇模模式，具有 200~261 GHz 范围的宽频带匹配段；在偶模模式，具有 261~270 GHz 范围的频带匹配段，扩展了匹配频段区间，初步实现了双模模式一定程度的应用。同时，结合图 3(b)相速度分布情况看，在 200~270 GHz 范围内，相速度基本稳定在 $0.27c$ 的速度上，速度分布均匀，色散特性较好。此外，从图 3(c)可以看出，设计的该结构在整个频段内耦合阻抗均大于 0.5Ω ，有着较高的耦合阻抗，验证了该结构在整个工作频段上都可以产生较高的注-波互作用，证实了双模工作模式可实现功率放大。

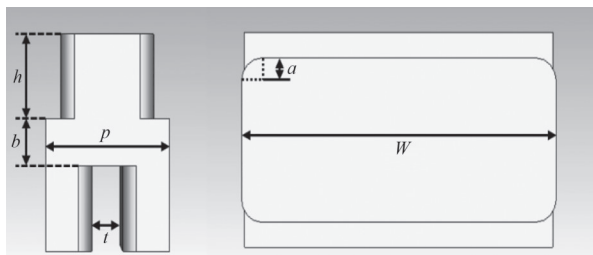


Fig.2 Structure of the single-period SDV-SWS
图2 交错双栅慢波结构单周期结构图

表1 交错双栅慢波结构单周期结构参数(单位:mm)
Table1 Parameters of the single-period SDV-TWT(unit:mm)

parameters	size
p	0.46
w	0.78
h	0.27
t	0.11
b	0.15
a	0.05

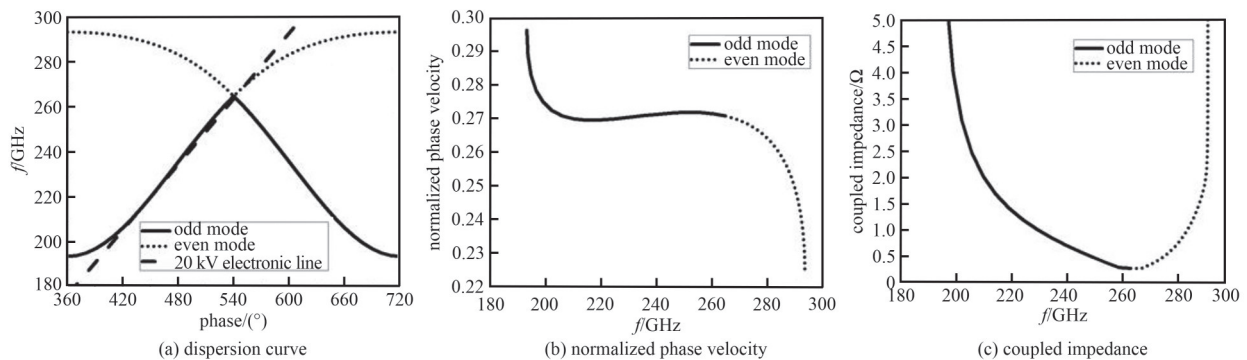


Fig.3 Dispersion results of the designed G-band single-period SDV-SWS
图3 G波段单周期交错双栅慢波结构色散结果

2 双模交错双栅多周期高频慢波结构的传输性能分析

基于上述的研究结果，开展多周期高频慢波回路传输性能的分析研究。图 4 所示为 50 周期高频慢波回路。对于交错双栅慢波结构，其本身存在天然的矩形电子注通道，能够更适应大电流带状注的互作用，但这种矩形通道会造成电磁波的不截止传输，尤其是在相互作用区的两端，很可能造成电磁波的泄露，甚至可能导致电磁波进入到电子枪区域，使电子注难以聚焦成型，最终无法实现管子的正常工作。为进一步实现信号的隔离，在高频结构的两端，加入图 5(a)所示的布拉格反射器，其传输性能如图 5(b)所示。可以看到，设计的布拉格反射器在 200~280 GHz 范围内实现很好的隔离性能，能够充分阻止相互作用区域内信号泄露到电子枪，从而不影响束流生成。同时，为进一步模拟工作频段上升至太赫兹频段时，由于材料本身存在的趋肤效应，以及因加工技术导致的材料表面光洁度限制了电磁波的传输性能，将材料电导

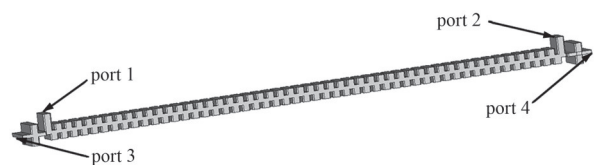


Fig.4 50-period structure of the G-band sheet-beam SDV-SWS
图4 50周期G波段带状注交错双栅慢波结构

率由 5.8×10^7 S/m 降低至 1.5×10^7 S/m, 得到图 6 所示的高频回路的传输与反射 S 参数性能。可以看到, 在整个 200~270 GHz 范围内, $S_{11} < -15$ dB, $S_{21} > -5$ dB。该结果说明了在整个频段内, 结构与外界的匹配性能良好, 反射较小, 同时信号能够实现低衰减传输, 大大降低了信号的损耗。结合单周期色散结果, 整个频段同时覆盖了奇模和偶模, 验证了双模工作模式的可行性。

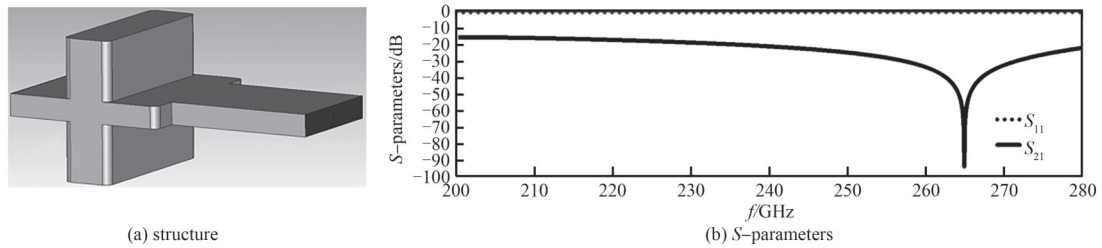


Fig.5 G-band Bragg reflector
图 5 G 波段布拉格反射器

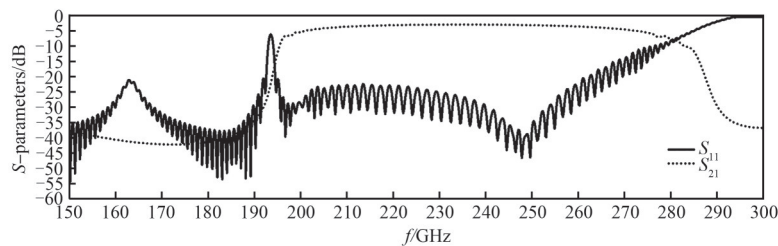


Fig.6 Transmission performance of the G-band sheet-beam SDV-SWS
图 6 交错双栅慢波结构传输性能

3 双模带状注交错双栅相互作用系统质点网格法(Particle-in-Cell, PIC)仿真

基于前面的研究结果, 采用 CST 粒子仿真模块开展双模带状注交错双栅相互作用系统的热仿真研究。由于仿真过程中使用带状电子注实现相互作用的激励, 而带状电子注属于过模结构, 其本身存在一定的不稳定性, 对于增益过大的相互作用结构, 存在自激振荡的问题^[7]。为提升相互作用输出的稳定性, 设计如图 7 所示的双段式相互作用结构, 通过阶段相互作用电路的方式, 抑制了杂波信号的进一步传输, 改善了结构因高增益所造成的不稳定性。两段之间以及相互作用两端同样使用布拉格反射器实现信号的隔离, 且两段周期数分别设置为 45 周期和 53 周期。为进一步改善电子注与电磁波之间的匹配状态, 将电子注电压由 20 kV 增大至 20.4 kV。在 0.2 A 的带状注激励下, 得到的 PIC 仿真输出结果如图 8 所示。可以看出, 峰值功率出现在 215 GHz 频点处, 功率可达 220 W, 对应电子效率大于 5.4%, 增益可达 36 dB。百瓦量级的频带覆盖 208~270 GHz, 频带宽度大于 60 GHz, 有着极宽的工作带宽。在 261~270 GHz 这一偶模的频段内能实现强注-波相互作用, 验证双模工作模式的可行性与正确性。

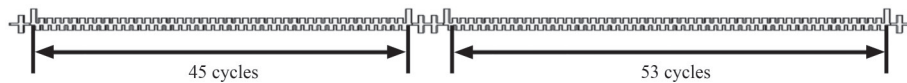


Fig.7 3D-structure of the G-band double-mode sheet-beam SDV-TWT beam-wave interaction system
图 7 G 波段双模带状注交错双栅行波管相互作用系统的三维结构

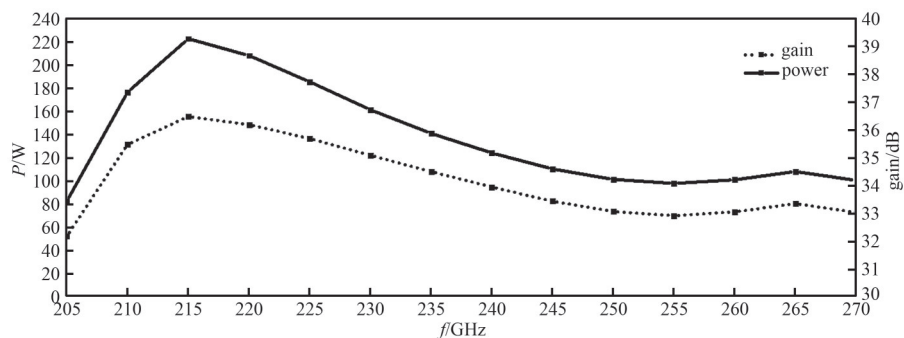


Fig.8 PIC simulation results of the G-band double-mode sheet-beam SDV-TWT beam-wave interaction system
图 8 G 波段双模带状注交错双栅行波管相互作用系统 PIC 仿真结果

为突显双模工作模式在拓宽行波管工作带宽方面的优势,表2对比了近5年来G波段交错双栅行波管领域的研究现状。本文设计的双模带状注交错双栅行波管的输出功率、电子效率、输出增益等指标均处于领域前沿,同时,通过使用双模模式,能够极大程度拓宽工作带宽,高于国际先进水平,充分验证了双模工作模式在提升交错双栅行波管工作带宽上所具有的性能优势与潜力。

表2 G波段交错双栅行波管研究进展对比
Table2 Comparison of research progress on SDV-TWT at G-band

literature	peak power/W	electron efficiency/%	bandwidth/GHz	gain/dB
this paper	220	5.39	208~270(62)	36.4
[18]	100	6.13	206~240(34)	33.0
[19]	48	4.74	193~242(49)	29.5
[20]	200	5.07	196~245(49)	20.0
[21]	200	5.42	211~260(49)	29.0
[22]	400	3.46	213.0~218.4(5.4)	36.0
[23]	171	5.78	186~208(22)	29.1
[24]	580	9.35	220~250(30)	31.6

4 横向信号馈入交错双栅相互作用系统的加工方案设计

从PIC仿真结果看,双模工作模式已被初步证实在拓宽行波管工作频带上存在一定的可行性,但是否能够给出完整的行波管相互作用系统设计方案,以及顺利进行整管的加工测试仍需进行更深入的研究。其中高效率输入输出耦合波导的设计,会对行波管的实际生产带来非常大的影响。从电磁波的馈入方向看,行波管的信号馈入方式可分为E面馈入与H面馈入2种方式,如图9所示,其中,E面馈入是指电磁波的馈入方向与管内电场方向一致,H面馈入则是馈入方向与磁场方向一致。通常情况下,E面馈入耦合波导会与磁聚焦系统在空间上产生位置冲突,需在聚焦磁块上打穿耦合波导孔才能实现信号的馈入与输出。这一方案可能会影响聚焦磁场的产生,甚至会对电子注的传输产生较大的影响。因此,采用H面信号馈入的方式更有利于实现高频相互作用结构与聚焦系统之间的装配。图9(b)所示的H面馈入结构,需要渐变弯波导实现信号的过渡,这些渐变结构往往会在电子注传输的轴线方向上额外增加一定的长度,会给带状注电子光学系统的传输带来问题。

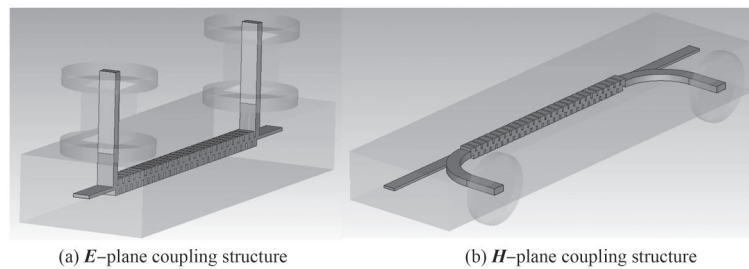


Fig.9 Coupling mode of the electromagnetic signal of TWT
图9 行波管信号输入输出耦合方式

为解决H面馈入耦合结构带来的增大带状注传输难度的问题,设计一种如图10所示的H面转E面馈入的顶部耦合结构。即在正常的E面馈入耦合结构的基础上,通过使用1/4圆弯波导实现信号传输方向的转变,再经渐变波导实现与外界标准波导的联通。传输性能显示,在整个工作频带内, S_{11} 均小于-15 dB,且 S_{21} 近乎为0,有着良好的信号流通率。加载了顶部耦合结构与未加载顶部耦合结构的输出性能对比如图11所示,加载了顶部耦合结构后对输出性能基本未产生影响,充分说明了设计的顶部耦合结构能够很好地适配高频相互作用系统,进一步验证了设计方案在工程实现中的可行性。

为工程实现提出的顶部耦合结构,开展相互作用系统3层结构加工方案设计,如图12所示。其中,图12(a)所示的下层结构主要包括交错双栅相互作用系统的下栅部分和矩形电子注通道;图12(b)所示的中层结构主要包括交错双栅上栅部分和贯穿的波导孔。将下层与中层2片金属板贴合在一起便形成了初步的E面馈入交错双栅相互作用系统。图12(c)为顶层结构,通过在金属板上直接挖出金属凹槽,并将金属槽面与中层的空白面紧密贴合,便可形成天然的波导通道,实现顶部耦合结构的方案设计。整个结构可直接通过纳米计算机数控(Nano-Computer Numerical Control, Nano-CNC)机械加工方式实现各个部件的加工,并通过扩散焊接技术实现相邻部件之间的链

接, 在工程实现上具有很高的可行性。在未来的工作中, 将重点开展高频系统的工程图设计与加工工作, 并完成相应的冷性能测试, 进一步验证行波管双模工作模式的正确性与可实现性。

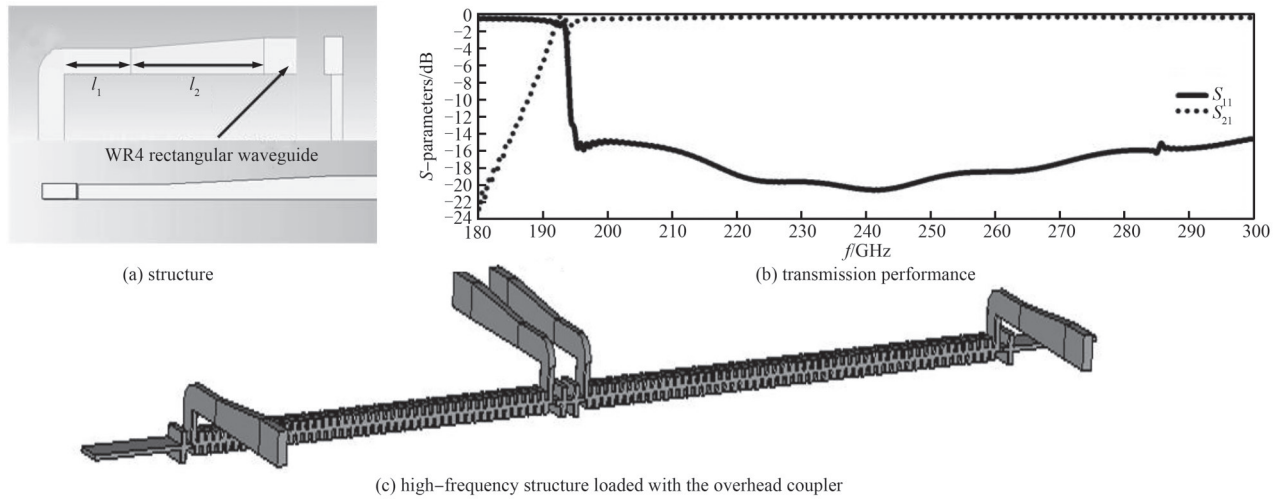


Fig.10 Overhead coupler for input and output from *H* direction to *E* direction
图 10 *H* 面转 *E* 面输入输出的顶部耦合器

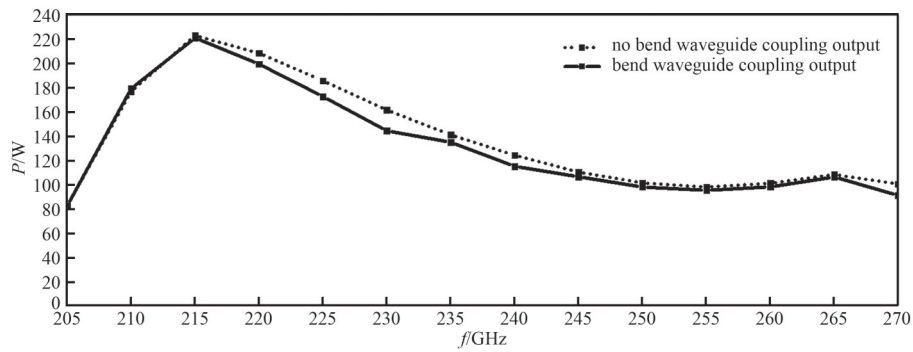


Fig.11 PIC simulation results of TWT beam-wave interaction system after loaded with the overhead coupler
图 11 加载了顶部耦合器之后的行波管相互作用系统 PIC 仿真结果

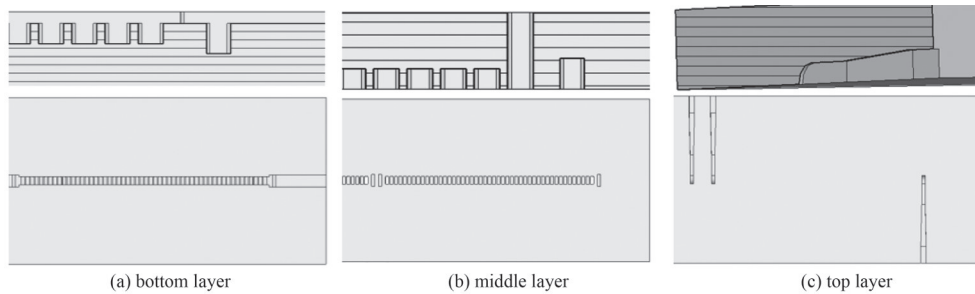


Fig.12 Design scheme of the three-layer G-band double-mode sheet-beam SDV-TWT beam-wave interaction system
图 12 G 波段双模带状注交错双栅行波管相互作用系统的三层加工方案

5 结论

交错双栅慢波结构作为近几年提出的一种新型真空电子器件, 其优良的性能和简单的结构使其在太赫兹频段的宽带大功率辐射源领域受到广泛关注。结合当前的研究进展和实验室的相关研究工作, 太赫兹频段的交错双栅行波管已被充分证实能够实现高功率、宽频带的相干辐射输出。在未来的研究工作中, 将重点开展太赫兹交错双栅相互作用系统乃至整管的研制及工程实现, 进一步发掘这种新型真空慢波结构在宽带大功率输出上的潜力。

参考文献:

- [1] 刘盛纲. 太赫兹科学技术的新发展[J]. 中国基础科学, 2006,8(1):7-12. (LIU Shenggang. Recent development of terahertz science and technology[J]. China Basic Science, 2006,8(1):7-12.) DOI:10.3969/j.issn.1009-2412.2006.01.003.
- [2] DHILLON S, VITIELLO M, LINFIELD E, et al. The 2017 terahertz science and technology roadmap[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2017,50(4):043001. DOI:10.1088/1361-6463/50/4/043001.
- [3] 洪伟,余超,陈继新,等. 毫米波与太赫兹技术[J]. 中国科学:信息科学, 2016,46(8):1086-1107. (HONG Wei, YU Chao, CHEN Jixin, et al. Millimeter wave and terahertz technology[J]. Scientia Sinica Informationis, 2016,46(8):1086-1107.) DOI:10.1360/N112016-00069.
- [4] YU X, OHIRA T, KIM J, et al. Waveguide-input resonant tunnelling diode mixer for THz communications[J]. Electronics Letters, 2020,56(7):342-344.
- [5] LIAO W C, MAASKANT R, EMANUELSSON T, et al. A Ka-band active integrated antenna for 5G applications: initial design flow[C]// 2018 the 2nd URSI Atlantic Radio Science Meeting(AT-RASC). Gran Canaria, Spain: IEEE, 2018:1-4. DOI:AT-RASC.2018.8471330.
- [6] JAIN R, HILLGER P, GRZYB J, et al. 29.1 A, 0.42 THz, 9.2 dBm 64-pixel source-array SoC with spatial modulation diversity for computational terahertz imaging[C]// 2020 IEEE International Solid-State Circuits Conference(ISSCC). San Francisco, CA, USA: IEEE, 2020:440-442. DOI:10.1109/ISSCC19947.2020.9063025.
- [7] KOROLEV A, ZAITSEV S, GOLENITSKIJ I, et al. Traditional and novel vacuum electron devices[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2001,48(12):2929-2937. DOI:10.1109/16.974731.
- [8] GRANATSTEIN V, PARKER R, ARMSTRONG C. Vacuum electronics at the dawn of the twenty-first century[J]. Proceedings of the IEEE, 1999,87(5):702-716. DOI:10.1109/5.757251.
- [9] ABRAMS R, LEVUSH B, MONDELLI A, et al. Vacuum electronics for the 21st century[J]. IEEE Microwave Magazine, 2001,2(3):61-72. DOI:10.1109/6668.951550.
- [10] SHIN Y, BARNETT L, LUHMANN N. Strongly confined plasmonic wave propagation through an ultrawideband staggered double grating waveguide[J]. Applied Physics Letters, 2008,93(22):221504-1-3. DOI:10.1063/1.3041646.
- [11] BAIG A, GAMZINA D, KIMURA T, et al. Performance of a Nano-CNC machined 220 GHz Traveling Wave Tube amplifier[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2017,64(5):2390-2397. DOI:10.1109/TED.2017.2682159.
- [12] ZHANG Changqing, PAN Pan, CAI Jun, et al. Demonstration of a PCM-focused sheet beam TWT amplifier at G-band[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2023,70(6):2798-2803. DOI:10.1109/TED.2022.3233291.
- [13] 刘青伦,王自成,刘濮鲲,等. 基于场匹配法的双排矩形栅慢波结构高频特性研究[J]. 物理学报, 2012,61(24):244101-1-8. (LIU Qinglun, WANG Zicheng, LIU Pukun, et al. Analysis of high frequency characteristics of the double-grating rectangular waveguide slow-wave-structure based on the field match method[J]. Acta Physica Sinica, 2012,61(24):244101-1-8.)
- [14] RUAN C, 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 Plasma Science, 2015,43(7):2132-2139. DOI:10.1109/TPS.2015.2435160.
- [15] RUAN Cunjun, DAI Jun, LI Renjie. Development of the ultra-wide band millimeter wave TWT with two-stage SDV-SWS[C]// 2017 18th International Vacuum Electronics Conference. London, England: IEEE, 2017:1-2. DOI:10.1109/IVEC.2017.8289591.
- [16] WANG Wenbo, ZHANG Zheng, WANG Pengpeng, et al. Double-mode and double-beam staggered double-vane traveling-wave tube with high-power and broadband at terahertz band[J]. Scientific Reports, 2022,12(1):12012. DOI:10.1038/s41598-022-15975-0.
- [17] RUAN Cunjun, ZHANG Huafeng, TAO Jian, et al. Investigation on stability of the beam-wave interactions for G-band staggered double-vane TWT[C]// 2018 the 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves(IRMMW-THz). Nagoya, Japan: [s.n.], 2018:596-597. DOI:10.1109/IRMMW-THz.2018.8510263.
- [18] YIN Pengcheng, CAI Jinchun, XU Jin, et al. The design of 0.22 THz staggered double vane traveling wave tube with a flat gain curve[C]// 2023 Cross Strait Radio Science and Wireless Technology Conference(CSRSWTC). Guilin, Guangxi, China: IEEE, 2023:1-2. DOI:10.1109/CSRSWTC60855.2023.10427189.
- [19] ZHOU Dongxing, LIU Wenxin, JIAO Ang, et al. Design of a 220 GHz double staggered vane traveling wave tube[C]// 2024 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium(ACES-China). Xi'an, China: IEEE, 2024:1-3.
- [20] VLADIMIR N T, ANDREY E P, NIKITA M R. 3-D particle-in-cell simulation of a multiple-beam 0.22-THz traveling wave tube[C]// 2022 the 23rd International Vacuum Electronics Conference(IVEC). Monterey, CA, USA: IEEE, 2022:374-375.
- [21] JIANG Shengkun, YANG Guang, WANG Zhanliang, et al. Experimental investigation of a shape-optimized staggered double-

vane slow-wave structure for terahertz traveling-wave tubes[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2022,69(8):4632–4637. DOI:10.1109/TED.2022.3182639.

- [22] JIANG Shengkun, TANG Xianfeng, HUANG Silong, et al. Metamaterial-inspired 0.22 THz traveling-wave tubes with double sheet beams[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2023,70(3):1306–1311. DOI:10.1109/TED.2022.3233814.
- [23] 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. DOI:10.1109/LED.2019.2963686.
- [24] SHU G X, ZHANG G T, HE W. Design and measurement of a terahertz double staggered grating waveguide with an arc-shaped beam tunnel[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2019,66(11):4932–4937. DOI:10.1109/TED.2019.2938551.

作者简介:

王文博(1994–), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹高功率宽频带行波管. email:wangwb@buaa.cn.

阮存军(1974–), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为带状柱速调管、扩展相互作用速调管和集成真空电子器件.

(上接第 897 页)

- [10] 冯婷婷. 石墨烯场效应晶体管的制备及其特性研究[D]. 北京:清华大学, 2014. (FENG Tingting. Preparation and characterisation of graphene field effect transistors[D]. Beijing:Tsinghua University, 2014.)
- [11] CHEN Meng, WANG Yingxin, ZHAO Ziran. Monolithic metamaterial-integrated graphene terahertz photodetector with wavelength and polarization selectivity[J]. ACS Nano, 2022,16(10):17263–17273. DOI:DOI:10.1021/acsnano.2c07968.

作者简介:

李思佳(1992–), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为石墨烯太赫兹探测器. email:983032521@qq.com.

王迎新(1981–), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为太赫兹探测、光谱与成像技术.

陈猛(1990–), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为太赫兹功能器件与探测技术.

赵自然(1977–), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为长波光子多元感知.

白净(2000–), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为二维材料光电探测器.