

文章编号: 2095-4980(2013)04-0531-05

多通道 THz 双梳交错型慢波结构

李娇娇^{1a,1b}, 杨 军^{1a,2,3,4}, 李浩光^{1a,1b}, 杨路路^{1a,1b}, 吕国强^{1a,2,3,4}

(1.合肥工业大学 a.光电技术研究院; b.仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009;
2.特种显示技术教育部重点实验室, 安徽 合肥 230009;
3.特种显示技术国家工程实验室, 安徽 合肥 230009;
4.省部共建现代显示技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230009)

摘 要: 为了产生大功率连续太赫兹波, 提出了一种可用于多通道双梳交错型慢波结构(SWS)。通过分析新型 SWS 色散特性和轴向场强分布特性, 可知在不改变结构色散特性的情况下, 增加结构通道数量可增大电子束电流, 且结构在太赫兹频段具有较高电子效率。此外对该 SWS 在 300 GHz 的注波相互作用过程进行了粒子模拟, 模拟结果显示, SWS 相邻 2 个通道在相同的工作条件下, 输出功率增益均为 20 dB, 实现了多电子注有效并联的工作状态, 从而使器件的输出功率得到提高。

关键词: 太赫兹波; 慢波结构; 高频特性; 粒子模拟

中图分类号: TN12

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201304.0531

Terahertz multi-beam double vane Slow-Wave Structure with half-period-stagger

LI Jiao-jiao^{1a,1b}, YANG Jun^{1a,2,3,4}, LI Hao-guang^{1a,1b}, YANG Lu-lu^{1a,1b}, LV Guo-qiang^{1a,2,3,4}

(1a.Academy of Photoelectric Technology; 1b.School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei Anhui 230009, China; 2.Key Laboratory of Special Display Technology of Ministry of Education, Hefei Anhui 230009, China;
3.National Engineering Laboratory of Special Display Technology, Hefei Anhui 230009, China;
4.National Key Laboratory of Advanced Display Technology, Hefei Anhui 230009, China)

Abstract : A multi-beam double vane Slow-Wave Structure(SWS) with half-period-stagger is presented, which is used to generate Terahertz(THz) continuous and high power wave. By analyzing the cold dispersion characteristics and axial field distributions of the novel SWS, it indicates that increasing the number of sheet beams will increase the current of beam with the same cold dispersion characteristics, and the SWS shows a high electrical efficiency at high frequencies. The process of the beam-wave interaction of structure is simulated with PIC code at 300 GHz. The simulated results show that the power gains of adjacent channels are both 20 dB under identical operating conditions, which means this novel type of SWS can operate in parallel with multiple beams, therefore the output power of device can be increased.

Key words: Terahertz wave; Slow-Wave Structure; high frequency characteristics; particle simulation

太赫兹(THz)技术在民用和军事方面均具有很高的实用价值, 被誉为改变未来世界的十大技术之一^[1-3]。而高效率、高功率、结构紧凑、低成本且可在室温下稳定运行的 THz 源器件, 是 THz 技术在实际领域中得到广泛应用的关键。目前, 基于真空电子学的 THz 源, 如金属慢波结构(SWS)行波管、回旋管、返波振荡器、纳米速调管及 SP 超辐射器等, 是产生大功率 THz 波的主要器件, 因而受到国内外研究机构和学者高度重视^[4]。但以上几类 THz 源器件均不能同时兼具高效率、高功率、结构紧凑、低成本且可在室温下稳定运行几大特性^[5-8]。鉴于此, 本文提出了一种可用于产生大功率连续 THz 波的多通道双梳交错型 SWS, 即在交错的双排梳形 SWS 中插入等间距的金属薄片, 是一种新型的梳形 SWS, 见图 1。该 SWS 具有结构简单, 散热性能好, 电子效率较高, 工作电流大, 且可在常温下稳定运行等几大特性, 可用于发展大功率且低成本的紧凑型 THz 源^[5,9-10]。

1 结构的高频特性研究

多通道双梳交错 SWS 中金属薄片的插入, 使结构内部的高频电磁场传输和分布特性发生变化, 因而具有了新的色散特性和轴向场分布特性。

1.1 结构“冷”色散特性

SWS 的“冷”色散特性是描述结构基本性能的一个主要特性参数, 可直观反映出结构的工作频带以及各频率点信号在结构内部传输特性, 该参数主要取决于结构的形状和尺寸^[9,11]。因此, 后续通过调整多通道双梳交错 SWS 的各结构参数, 研究和分析结构的“冷”色散特性。

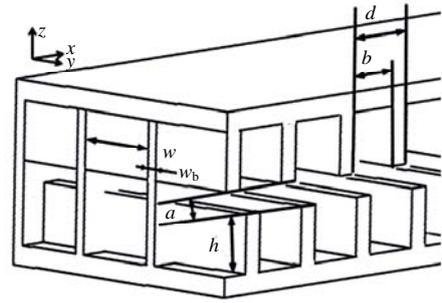


Fig.1 Multichannel double vane structure with half-period-stagger
图 1 多通道双梳交错 SWS

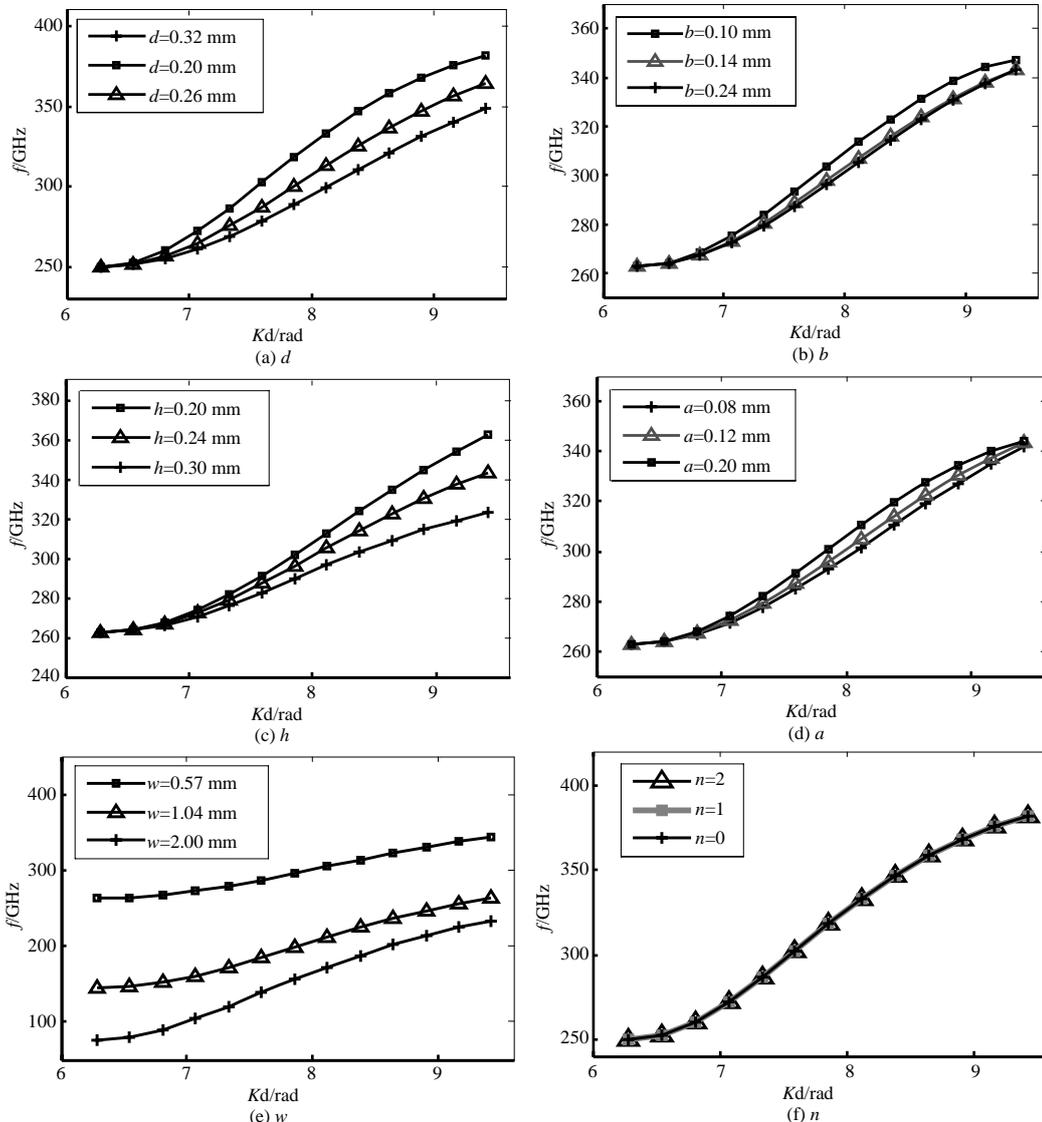


Fig.2 Dispersion curves for various “ d, b, h, a, w, n ” of structure parameters
图 2 不同结构参数 d, b, h, a, w, n 对应的色散曲线

在数值模拟软件中建立一个 SWS 的单周期模型, 模型材料均为理想金属。具体参数见表 1, 其中金属薄片厚度可根据实际应用做出调整。分别调整所建模型的结构周期 d 、齿槽宽度 b 、齿槽深度 h 、电子束通道高度 a 、金属薄片间距 w 和金属薄片数量 n , 对比分析上述参数对结构“冷”色散特性的影响。图 2 为调节以上结构参数时, SWS 内 TM_{01} 模式的一次空间谐波“冷”色散曲线。

根据以上结构参数对色散特性影响的分析结果可知:金属薄片间距 w 对结构的工作频带起到了决定性作用;调节结构周期 d 和齿槽深度 h 可实现结构中心频率和频段信号相速的调节;齿槽宽度 b 和电子束通道高度 a 对结构的工作频带几乎无影响;金属薄片数量的调节不会改变结构的“冷”色散特性。因此增加结构的金属薄片数量 n 可在不改变结构色散特性的情况下,增大电子束横截面面积,从而增大工作电流。

1.2 结构轴向电场分布特性

高频信号在 SWS 内部传输时,在电子束通道内建立起的轴向电场的分布特性,表征了 SWS 中高频信号与电子之间能量交换的有效程度,是描述 SWS 的另一主要高频特性。因此,在色散特性如图 3 所示的传统交错双排梳形 SWS 和多通道双梳交错 SWS 内,分别导入一个功率为 60 mW 的 300 GHz 高频信号,根据高频信号在 SWS 的电子束通道上建立起的轴向场强 E_x ,比较两类 SWS 中高频信号与电子之间能量交换的有效程度^[10-12]。

表1 模型的结构参数

Table1 Structure parameters of model						
d/mm	b/mm	h/mm	a/mm	w/mm	w_b/mm	n
0.32	0.24	0.24	0.12	0.57	0.02	2

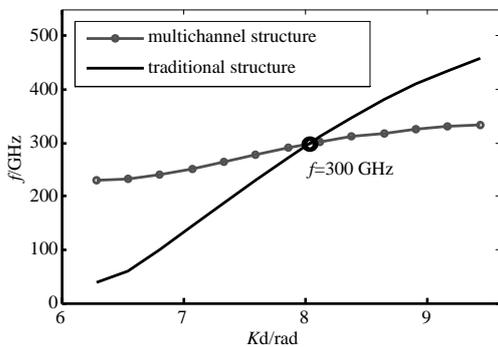


Fig.3 Dispersion curve of SWS

图3 SWS色散曲线

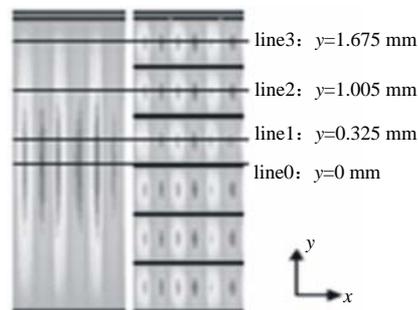
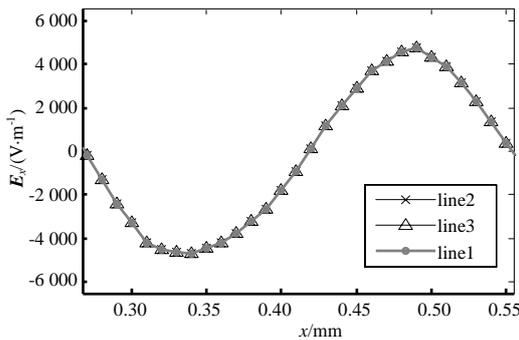


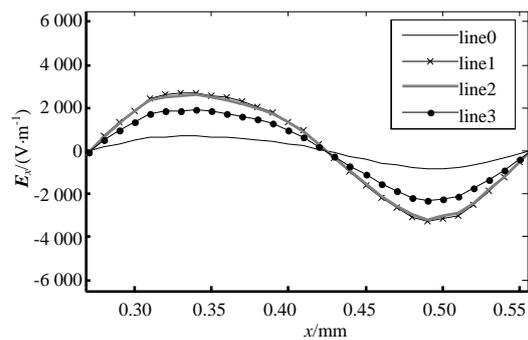
Fig.4 Axial field distribution of SWS at the center plane($z=0$)

图4 SWS中心平面($z=0$)上轴向场分布

高频信号在上述两类 SWS 的中心平面($z=0$)上建立的轴向场强,见图 4。从图中可以看出,传统交错双梳形 SWS 轴向场强在中心轴线($y=0$)附近最强,随即向两侧逐步减弱;而多通道双梳交错 SWS 内轴向场强分布较为均匀。图 5 给出了 2 个 SWS 内轴向场强在图 4 中各观测线上具体值。可见,多通道双梳交错 SWS 的各通道内建立的轴向场强相等,且大于传统交错双梳形 SWS 在中心轴线($y=0$)处建立的轴向场强。显然,多通道双梳交错 SWS 相较传统的交错双排梳形 SWS,可使 THz 高频信号与电子之间产生更高效的能量交换。



(a) multichannel SWS



(b) traditional SWS

Fig.5 Axial field strength of the multichannel SWS (a) and the traditional SWS (b) at the observational line

图5 观测线上多通道双梳慢波结构(a)和交错双排梳形慢波结构(b)的轴向场强

2 粒子模拟

利用 PIC 粒子模拟分析该 SWS 互作用过程,结构参数同表 1。为尽可能减小输入信号在 SWS 内部的模式竞争,根据图 2 的结构色散特性,选取输入信号频率为 300 GHz,计算得到相应的电子束同步电压为 17.1 kV。在模拟过程中,为提高电子束与高频场间的注一波相互作用效率,将电子束电压微调至 17.3 kV。此时电子束尺寸和电流分别为 1 mm×0.08 mm 和 30 mA,SWS 周期数为 110,输入信号功率为 20 mW(单通道内高频输入信号功率为 10 mW)。

粒子模拟过程中,SWS 工作状态稳定后,某一时刻的粒子动能分布图和粒子运动轨迹分别见图 6 和图 7,直观反映出 SWS 内电子束与高频信号间的互作用情况。显然,电子束在 $x < 20$ mm 区域内受到了有效速度调制和密

度调制,且受调程度沿传输方向(x 轴)逐步增强。而在 $x > 30$ mm 的区域(结构输出端口附近),大多数粒子的能量处于减小状态,即电子束将能量交给了高频电磁场^[12]。图 8 给出了 SWS 的 2 个通道的输入和输出端口信号功率归一化的傅里叶变换频谱。从图中的计算结果可以看出,SWS 的 2 个通道功率增益均为 20 dB,实现了多电子注有效并联的工作状态。同时计算得到结构单通道输出功率为 1 W。

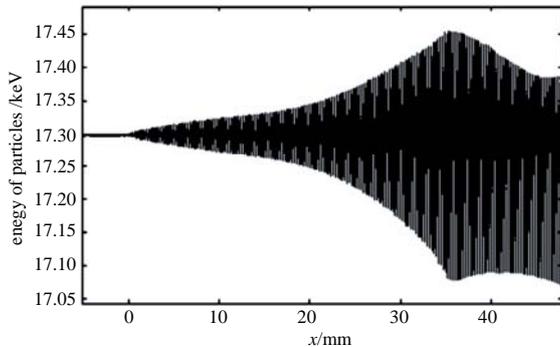


Fig.6 Energy distribution of particles
图6 粒子动能分布图

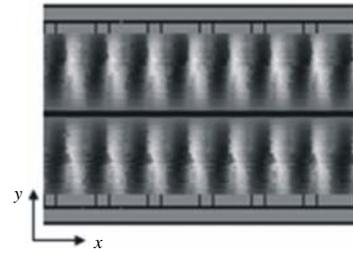
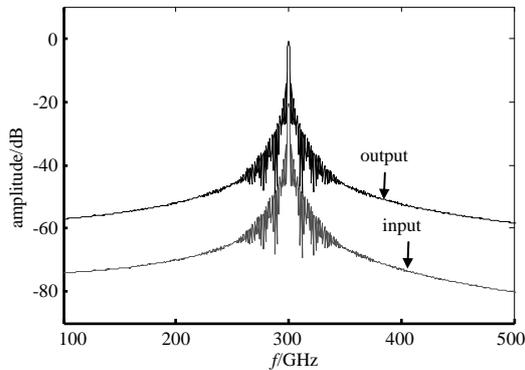
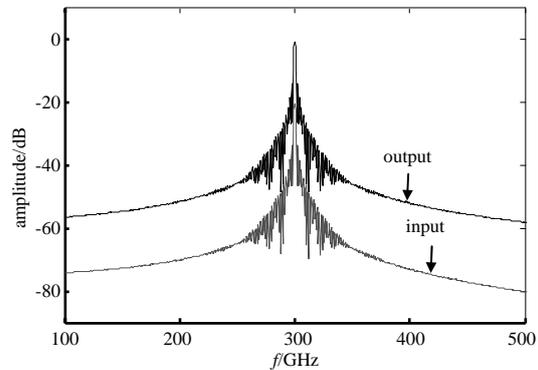


Fig.7 Particle trajectories near the output port of SWS
图7 SWS输出端口附近的粒子轨迹



(a) the first tube



(b) the second tube

Fig.8 FFT frequency spectrum of the normalized power of input and output signals at the tubes
图8 2个通道输入和输出信号归一化功率的傅里叶变换频谱

3 结论

本文提出的多通道双梳交错型 SWS,在高频段具有电子效率较高和工作电流大两大突出特性,可使大尺寸片状电子束与高频电场间产生有效的注-波相互作用。因此,该 SWS 不仅可用作高功率 THz 放大器 SWS,而且可使大尺寸连续片状电子束受调制而形成驱动史密斯-帕塞尔(Smith-Purcell, SP)超辐射的周期束团^[7-8],是用于发展低成本、大功率紧凑型 THz 源的一种新型 SWS。

参考文献:

- [1] 王明红,薛谦忠,刘濮鲲. 太赫兹真空电子器件的研究现状及其发展评述[J]. 电子与信息学报, 2008,30(7):1766-1771. (WANG Minghong,XUE Qianzhong,LIU Pukun. Review of THz Vacuum Electronic Devices and Development[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008,30(7):1766-1771.)
- [2] 林长星,张健,邵贝贝. 高速无线通信技术研究综述[J]. 信息与电子工程, 2012,10(4):383-389. (LIN Changxing,ZHANG Jian,SHAO Beibei. Survey of research on high speed wireless communication technology[J]. Information and Electronic Engineering, 2012,10(4):383-389.)
- [3] 陈樟,王亚军. 0.14 THz 折叠波导行波管慢波结构设计及加工[J]. 信息与电子工程, 2011,9(3):299-302. (CHEN Zhang,WANG Yajun. Design and manufacture of 0.14 THz folded waveguide traveling wave tube slow wave structure[J]. Information and Electronic Engineering, 2011,9(3):299-302.)
- [4] 程焰林,向伟,王远. 太赫兹微型电真空器件及其制造工艺[J]. 真空电子技术, 2011(3):43-48. (CHENG YanLin,XIANG Wei,WANG Yuan. Terahertz Micro-Vacuum Electronic Device and its Fabrication Technology[J]. Vacuum Electronics, 2011(3):43-48.)

- [5] XU Xiong,WEI Yanyu,SHEN Fei,et al. Sine Waveguide and its Applications in Terahertz Range[C]// 2011 China-Japan Joint Microwave Conference Proceedings. Hangzhou:[s.n.], 2011:20-22.
- [6] 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.
- [7] Urata J,Goldstein M,Kimtt M F,et al. Superradiant Smith-Purcell Emission[J]. Phys. Rev.Lett., 1998,80(3):516-519.
- [8] 史宗君. 周期束团驱动的毫米波及 THz 源的研究[D]. 成都:电子科技大学, 2008. (SHI Zongjun. Study on the millimeter wave and THz radiation generated by the periodic bunches[D]. Chengdu:University of Electronic Science and Technology of China, 2008.)
- [9] 王冠军,宫玉彬,路志刚,等. 矩形栅慢波系统的高频特性分析[J]. 强激光与粒子束, 2005,17(8):1137-1140. (WANG Guanjun,GONG Yubin,LU Zhigang,et al. High frequency characteristics of rectangular waveguide grating[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005,17(8):1137-1140.)
- [10] Shin Young-Min,Barnett Larry R. Phase-Shifted Double Vane Circuit(Barnett-Shin TWT) for Ultra-Wideband Millimeter and Submillimeter Wave Generation[C]// 2008 IEEE International Vacuum Electronics Conference(IVEC). Monterey,CA:[s.n.], 2008:54-55.
- [11] Maragos A A,Ioannidis Z C,Tigelis I G,et al. Dispersion Characteristics of a Rectangular Waveguide Grating[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2003,31(5):1075-1082.
- [12] 刘盛刚. 微波电子学导论[M]. 北京:国防工业出版社, 1985. (LIU Shenggang. Introduction to Microwave Electronics[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 1985.)

作者简介:



李娇娇(1988-),女,云南省元阳县人,在读硕士研究生,主要研究方向为基于真空电子学的太赫兹源器件 .email:lijiaojiaobaby@163.com.

杨军(1978-),男,安徽省淮南市人,博士,副研究员,主要从事微波电子学、微波毫米波器件、电磁场计算以及 THz 微型真空电子器件技术与工程研究.

李浩光(1989-),男,安徽省淮南市人,在读硕士研究生,主要研究方向为基于真空电子学的太赫兹绕射辐射器件.

杨路路(1988-),男,安徽省芜湖市人,在读硕士研究生,主要研究方向为基于真空电子学的太赫兹绕射辐射器件.

吕国强(1962-),男,浙江省新昌县人,教授,博士生导师,省部共建现代显示技术国家重点实验室主任,特种显示技术国家实验室副主任,主要从事显示技术和行波管技术研究.