第 21 卷　第 9 期　　太赫兹科学与电子信息学报　　Vol.21，No.9
2023 年 9 月　　Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology　　Sept.，2023

文章编号：2095-4980(2023)09-1065-08

利用周期结构电磁止带特性的小型化高功率太赫兹振荡器

张　琳，蔡　军，杜英华，冯进军*

(北京真空电子技术研究所 微波电真空器件国家级重点实验室，北京 100015)

摘　要：高性能实用化辐射源是太赫兹应用的关键器件，利用周期结构电磁色散中的止带区域具有耦合阻抗高的特点，电子注和电磁波能够高效互作用，可以实现大功率太赫兹振荡器。带边振荡器(BO)相比于传统的返波振荡器(BWO)，可以实现大功率输出，在W波段能达到百瓦量级，太赫兹波段能达到瓦级；采用周期永磁聚焦系统，可以实现小体积轻质量；慢波结构尺寸短，结构简单；成本低，具有批量生产能力。本文提出可构建3π止带的交错子周期折叠波导慢波结构(FWG SWS)和双频双模双向带边振荡器工作机理，采用皮尔斯双阳极电子枪、周期永磁聚焦系统、金刚石输能窗以及高效率收集极，设计和研发了频率在100 GHz以上的几种带边振荡器，实现了100 GHz频段140 W的功率输出，120 GHz频段实现了30 W的功率输出，在300 GHz实现了1 W以上的功率输出。

关键词：周期结构；色散特性；太赫兹；带边振荡器；真空电子器件

中图分类号：TN752　　**文献标志码：**A　　**doi：**10.11805/TKYDA2022190

Miniaturized high power terahertz oscillator using electromagnetic stop-band characteristics of the metal periodic structure

ZHANG Lin，CAI Jun，DU Yinghua，FENG Jinjun*

(National Key Laboratory of Science and Technology on Vacuum Electronics，Beijing Vacuum Electronics Research Institute，Beijing 100015，China)

Abstract: High performance and practical radiation source is the key device for terahertz applications. High power terahertz oscillators can be realized by utilizing the great impedance near π, 2π and 3π stop-band which means that strong interaction can occur. Compared with the traditional Backward Wave Oscillator(BWO), the Band-edge Oscillator(BO) can achieve high power which can achieve the order of 100 W in W band and 1 W in the THz regime; can realize miniaturized device with Periodic Permanent Magnet(PPM) focusing system; can realize compact structure with Folded Waveguide Slow Wave Structure(FWG SWS) which is short in size and simple in structure; can realize low cost mass production. In this research, a stagger half-period FWG SWS and a novel operation concept for the BO with the folded waveguide are proposed. The BO is composed of Pierce-style double-anode convergent electron gun, periodic permanent magnet focusing system, diamond pill-box window and high efficiency collector. Several novel BOs above 100 GHz have been simulated, fabricated and tested, which achieved output power of 140 W at 100 GHz, 30 W at 120 GHz, and over 1 W at 300 GHz. The dispersion characteristics, design of devices and test results are described and analyzed.

Keywords: periodic structure; dispersion characteristics; terahertz; Band-edge Oscillators; vacuum electron devices

在电磁频谱中，一般将300 GHz~10 THz范围内的电磁波称为太赫兹波，在波谱中处于毫米波和红外线之间，相对于更低频率的毫米波，太赫兹波具有更高的频率和更宽的绝对带宽，利用这一特点，太赫兹波可应用于高速无线通信[1-2]；相对于更高频率的光波，太赫兹波的光子能量较低，可以实现对活体生物组织的太赫兹成像和

收稿日期：2022-09-28；**修回日期：**2022-11-13

***通信作者：**冯进军　email:fengjinjun@tsinghua.org.cn

检查，可广泛应用于安检领域和医学领域[3-4]。高性能实用化辐射源是太赫兹应用的关键器件，真空电子器件作为国防装备和国民经济各部门都在使用的一种重要的电子器件，在通信系统、雷达系统、医疗领域等已经具有十分广泛的应用。

真空器件主要有放大器和振荡器2类，振荡器由于其慢波结构尺寸短，结构简单，且无需驱动源，简化了系统配置，可以大幅降低器件和系统研发周期与成本。常见的振荡器类型有返波管、扩展互作用振荡器等。返波管是在研究行波管的过程中，发现慢波结构上存在返波与电子注相互作用时可实现自激振荡，从而发明了返波管这一新型器件。目前国内外生产、试验的返波管将近数百种，其中以俄罗斯和美国研制的器件性能较为领先。俄罗斯ISTOK公司开发的OB系列可调谐返波管产品，在太赫兹频段频率高至1 400 GHz，功率分布在0.5~10 mW[5]；美国Microtech Instruments公司研制的QS系列太赫兹返波管配套倍频技术，其频率可覆盖100~2 200 GHz，功率分布在0.5~10 mW[6]。返波管在太赫兹频段覆盖的频率范围很广，但是输出功率数量级最高为10 mW。扩展互作用振荡器特点是将速调管技术与行波管技术相结合，引入了由慢波线组成的谐振腔结构，从而获得宽带宽和高功率的输出[7]。CPI公司在扩展互作用器件研究方面占据领先地位，W波段的连续波产品输出功率最大为80 W，G波段的连续波产品输出功率最大为9 W[7]，目前官网上架的产品中频率最高为220 GHz，300 GHz以上的太赫兹扩展互作用振荡器产品还在研制中。综上，目前常见的几种振荡器在工作频段和输出功率方面还需要进一步拓展和提升，从而满足高功率太赫兹辐射源的迫切需求。

振荡器通常由两大系统组成：电子光学系统和高频系统。其中，电子光学系统包括电子枪、磁聚焦系统、收集极，分别负责电子的发射、传输和收集；高频系统包括慢波结构、输能窗，慢波结构负责提供与电子产生相互作用的慢电磁波，输能窗实现器件内外电磁波的传输。作为真空电子器件的核心组件，慢波结构对器件的性能起到决定性的作用，也在线性同步辐射光源等大设备中发挥了重要的作用[8]。

本文首先分析了周期性慢波结构的电磁特性，然后以一种适合于高频率真空功率器件的全金属折叠波导慢波结构为例，分析了其作为周期结构的电磁特性，重点对电磁色散中的止带特性进行了研究，提出新型带边振荡器的工作机理，并在100 GHz以上设计和研发了多种带边振荡器，对工作机理进行了验证。

1 周期结构的电磁色散特性

周期性慢波结构是真空器件中的核心组件。根据Floquet定理，电场可以表示为一系列空间谐波和的形式[9-10]：

$$\vec{E}_z = \mathrm{e}^{-\mathrm{j}\beta z}\vec{E}_p(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty}\vec{E}_{nz}(x,y)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\beta_n z} \tag{1}$$

$$\beta_n = \beta_0 + \frac{2\pi n}{p} \tag{2}$$

式中：$\vec{E}_z$为z轴方向的电场强度分量；β为传播常数；$\vec{E}_p(z)$为沿z轴方向的周期函数，在不同的周期，函数只存在相位变化；p为慢波结构的周期长度；$\vec{E}_{nz}$为第n次空间谐波沿z向的电场强度分量；β_n为第n次空间谐波的传播常数；β_0为第0次空间谐波即基波的传播常数。各次空间谐波分别以各自的振幅$\vec{E}_{nz}(x,y)$和传播常数β_n沿系统传播。电磁波的相速度随频率变化的关系称为电磁波的色散特性。当某一次空间谐波的相速度与电子注的速度相等时，电磁波与电子注之间发生相互作用，进行能量交换。采用耦合阻抗K来描述电子注与电磁波的互作用程度：

$$K = \frac{\vec{E}_{nz}}{2\beta_n^2 P_{rf}} \tag{3}$$

式中：$\vec{E}_{nz}$为第n次空间谐波沿z向的电场强度分量的幅值；P_{rf}为系统中所有空间谐波的功率流。周期结构中存在许多通带，通带之间是止带。每一个通带对应一种模式; 每个模式都是由各个空间谐波叠加而成的沿传播方向呈非正弦分布的行波。

折叠波导是一种周期性波导，它是将矩形波导沿电场面像曲折线一样弯曲形成的一种慢波结构，如图1所示。采用CST微波工作室软件精确仿真得到折叠波导慢波结构的色散曲线，如图2所示。通带一般属于常规色散区域，例如区域4的前向波和区域5的反向波，宽带行波管和可调谐返波管得到了广泛的研究，作者所在的研究组已经实现了220 GHz行波管连续波20 W[11]的功率输出和脉冲50 W[12]的功率输出，并在系统中得到了应用；在

340 GHz实现了20 GHz带宽内、1 W以上的连续波功率输出，并研制出国际首台300 GHz以上的宽带功率放大器[13]。在本文的创新研究中，重点关注色散空间中区域1、2、3中止带区域的电磁特性。

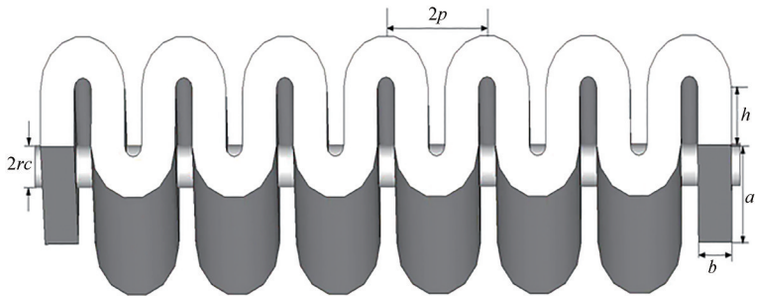


Fig.1 Layout of FWG SWS
图1 折叠波导慢波结构示意图

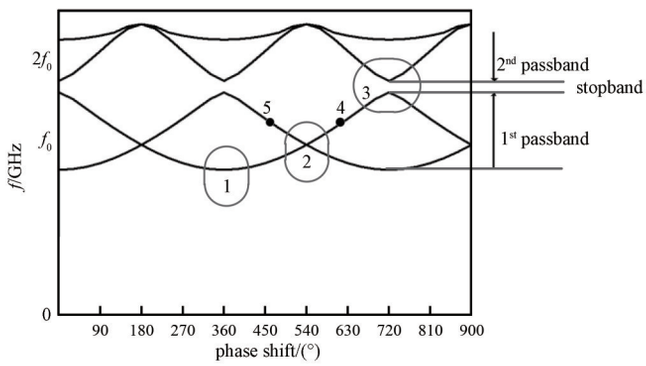
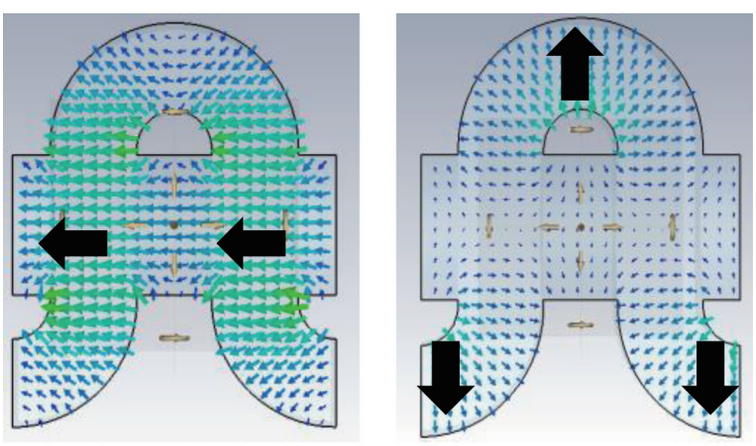


Fig.2 Dispersion curves of FWG SWS using CST microwave studio
图2 利用CST微波工作室计算的折叠波导慢波色散曲线

止带边缘的模式分别为不稳定模式和稳定模式，如图3所示。相比于稳定模式，不稳定模式的轴向电场大幅增强，其耦合阻抗K_c无穷大，可实现强注波互作用，获得更高的输出功率。在图2中，区域1为波导下截止特性产生的2π止带，2π止带处为不稳定模式，具有单边不稳定性；区域2为3π处，对于折叠波导3π处不存在带隙，可通过交错子周期加载[14-15]、电子注通道非对称加载等方法构建止带，3π带隙的上截止频率和下截止频率处均属于不稳定模式，具有双边不稳定性；区域3为电磁波在折叠波导慢波结构中周期性反射叠加产生的4π止带，上截止频率处为不稳定模式，具有单边不稳定性，根据4π止带位于行波管工作频带以上的特点，在相同的器件尺寸条件下可以获得更高频率的电磁波。



(a) electric field distribution of unstable mode　　(b) electric field distribution of stable mode

Fig.3 Electric field distribution of band-edge
图3 止带边缘的电场分布

2 带边振荡器器件模拟设计与实验验证

根据图2中区域1~3的特性，以2π、3π和4π作为工作点，利用止带附近高耦合阻抗的特点，开展了多款高频率高功率量级带边振荡器的研究。

如图4所示，带边振荡器主要由5部分组成：电子枪，采用皮尔斯双阳极会聚枪，根据带边振荡器工作频段不同，设计的工作电压为20~25 kV，工作电流为50~150 mA；慢波结构，采用折叠波导慢波结构，利用高速铣五轴加工中心加工的慢波结构，关键结构尺寸的加工精度可达到5 μm；聚焦系统，采用周期永磁聚焦系统，轴向磁感应强度为0.5 T；输能窗，采用金刚石宽带低损耗输能窗，W波段和太赫兹带边振荡器的振荡功率，分别通过WR10和WR2.8的标准波导口耦合出来，对于W波段的2π和3π带边振荡器，只设置一个输能窗，对于太赫兹4π双模振荡器，分别针对前向波模式和返波模式设置了2个输能窗；收集极，采用降压收集极，提高样管总效率。各部件利用高精度模具进行精密装配和焊接，完成带边振荡器样管研制。

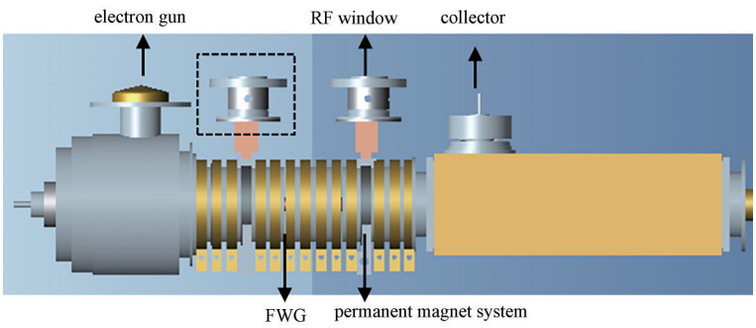


Fig.4 Schematic of the band-edge oscillator
图4 带边振荡器结构示意图

研制后的带边振荡器样管按照图5中的框图搭建测试系统，对振荡功率、振荡频率等参数进行测试。对于振荡器件，无需输入信号源，输出端口采用定向耦合器，连接功率计与频谱仪，实现同时测试振荡功率和振荡频率。

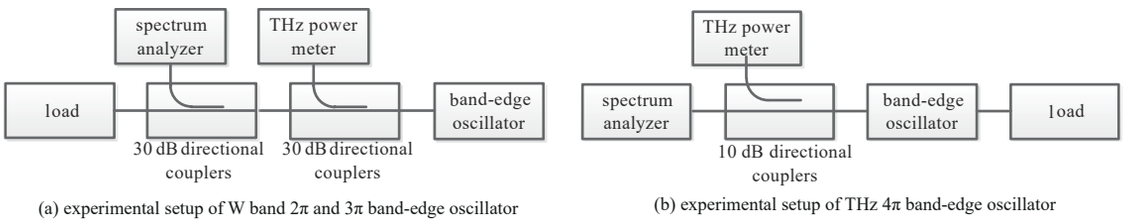


Fig.5 Schematic diagram of the experimental setup
图5 测试系统框图

2.1 2π带边振荡器

为了验证2π区域的止带特性，课题组研制了W波段2π止带振荡器。利用CST粒子工作室对振荡器进行了三维注—波互作用模拟，对慢波结构长度、电压等参数进行了优化设计，优化后输出功率最大为157 W，振荡频率95.9 GHz。

根据模拟结果，研制出如图6所示的振荡器。不同工作电压下的输出功率及振荡频率测试结果如图7所示，工作电压20.3 kV下最大输出功率120 W，振荡频率96.67 GHz[16]。

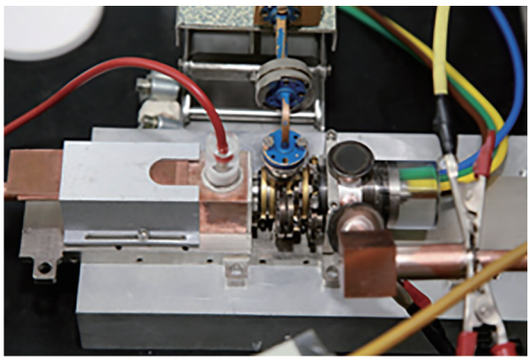
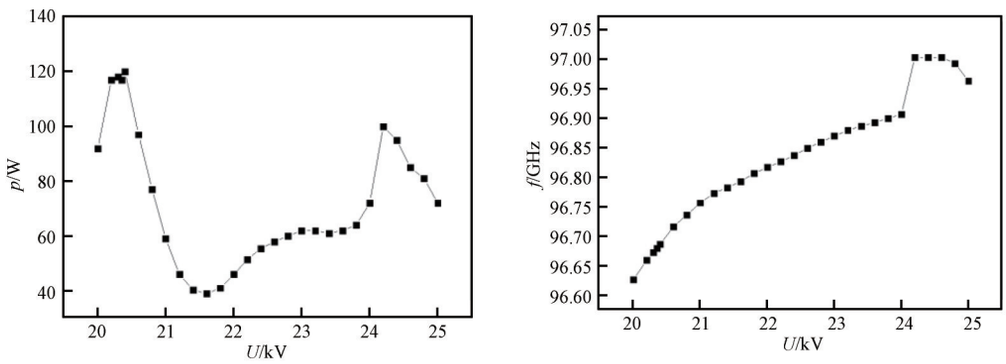


Fig.6 Photograph of the prototype of a W band 2π band-edge oscillator
图6 W波段2π带边振荡器

2.2 3π带边振荡器

常规折叠波导基波工作时，3π(相移540°)处无明显止带产生，课题组提出一种交错子周期折叠波导[14-15]，如图8所示，在常规折叠波导的基础上，几何周期包含2个不相等长度的互作用间隙，产生不相等的子周期p_1、p_2和新的窄边b_1，

利用CST微波工作室计算交错子周期折叠波导慢波结构色散曲线，并与常规折叠波导慢波结构色散曲线进行对比，如图9所示。从对比图中可以看出，常规折叠波导慢波结构3π模处无明显止带产生，交错子周期折叠波导慢波结构3π模处产生明显止带，上截止频率为91.54 GHz，下截止频率为85.32 GHz，带宽为6.22 GHz。根据图9中耦合阻抗的计算结果可知，在相移3π模以外的区域，交错子周期折叠波导慢波结构的轴线耦合阻抗值与常规折叠波导慢波结构耦合阻抗值几乎相等，而在相移3π处，交错子周期折叠波导慢波结构轴线耦合阻抗值迅速增加，远大于折叠波导慢波结构耦合阻抗值。



(a) measured output power vs. voltage　　(b) measured oscillation frequency vs. voltage

Fig.7 Measured curves of output power and oscillation frequency of W band 2π band-edge oscillator

图7 W波段2π带边振荡器输出功率和振荡频率测试曲线

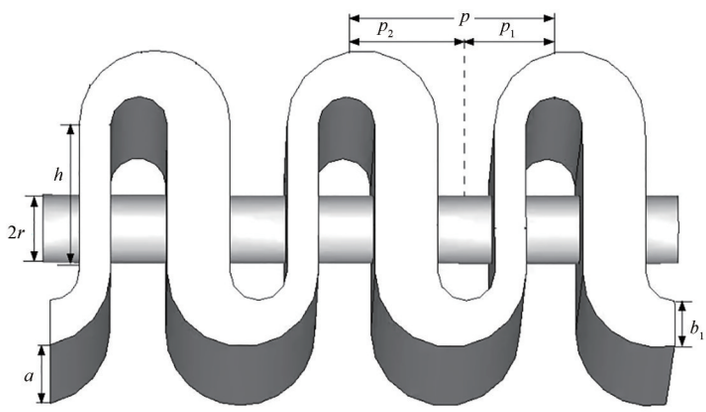
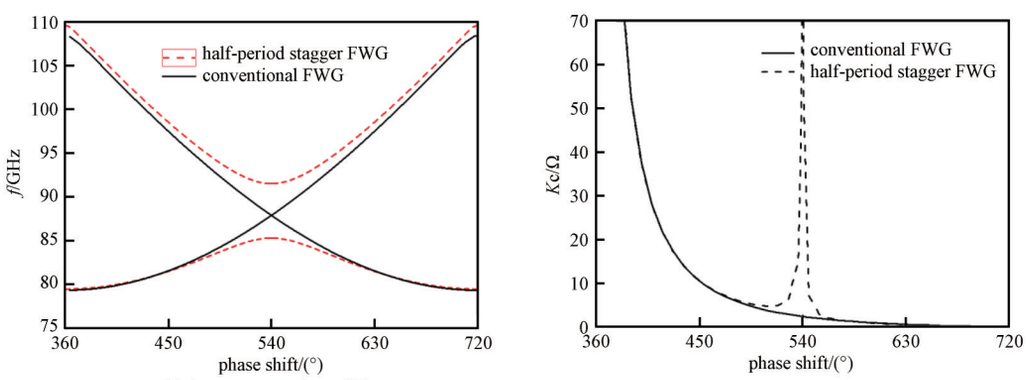


Fig.8 Layout of stagger half-period folded waveguide

图8 交错子周期折叠波导慢波结构示意图



(a) frequency vs. phase shift　　(b) axial coupling impedance Kc vs. phase shift

Fig.9 Cold characteristics of normal FWG and stagger half-period FWG

图9 交错子周期折叠波导慢波结构与常规折叠波导慢波结构冷特性对比

基于交错子周期折叠波导慢波结构，设计了W波段3π双频振荡器并进行了实验验证。采用精密高速铣削工艺加工了交错子周期折叠波导慢波结构，如图10所示。图11为装配后的W波段双频3π带边振荡器，整管长度仅为20 cm。由图12中W波段3π带边振荡器输出功率和振荡频率实测曲线可知，低频振荡频率在89.2 GHz附

近，在 21.5 kV 电压下，输出功率最大为 148 W；高频振荡频率在 94.5 GHz 附近，在 21.8 kV 电压下，输出功率最大为 65 W[17]。

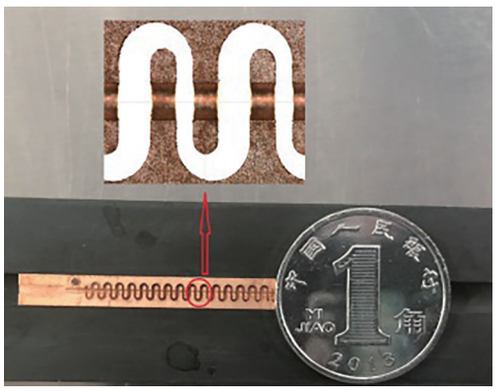


Fig.10 Photograph of stagger half-period folded waveguide
图 10 交错子周期 FWG 的照片

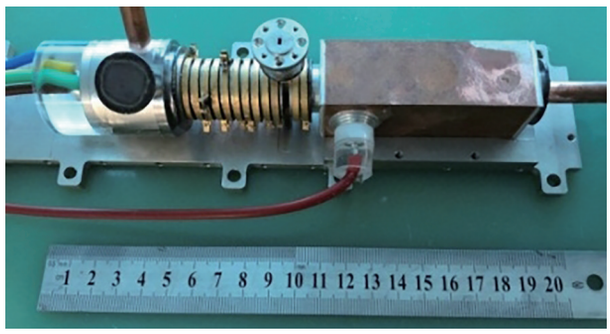
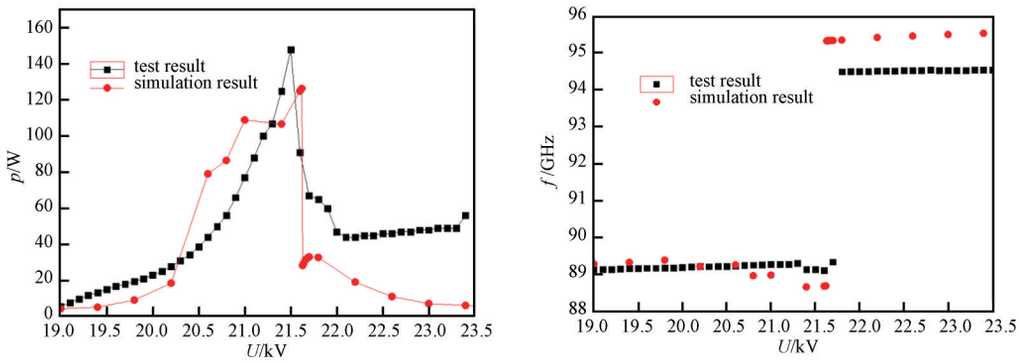


Fig.11 Photograph of the prototype of a W band 3π band-edge oscillator with stagger half-period FWG
图 11 使用交错子周期折叠波导慢波结构研制的 W 波段 3π 带边振荡器



(a) simulated and measured output power vs. voltage
(b) simulated and measured oscillation frequency vs. voltage

Fig.12 Simulated and measured curves of output power and oscillation frequency of W band 3π band-edge oscillator
图 12 W 波段 3π 带边振荡器输出功率和振荡频率曲线

2.3 4π 带边振荡器

由于 4π 处具有单边不稳定性，对于不稳定模式，前向波方向和返波方向的互作用阻抗无穷大，如图 13 所示。利用止带附近高耦合阻抗的特点，课题组提出一种双频双模双向带边振荡器概念，即在同一器件中同时激励起前向波和返波 2 种工作模式，通过选取适当电压，实现在相同或相近电压下，电子注分别与前向波和返波进行强注波互作用，并通过慢波结构前端口输出返波互作用振荡信号，后端口输出前向波互作用振荡信号，因此，区别于常规的带边振荡器，新型双模带边振荡器设计了 2 个输能端口，如图 14 所示。

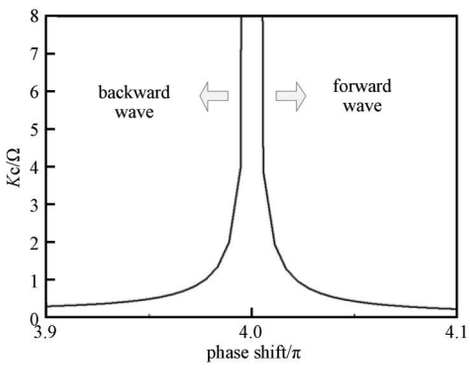


Fig.13 Coupling impedance on axis near 4π band-edge of the FWG SWS
图 13 4π 止带处的耦合阻抗

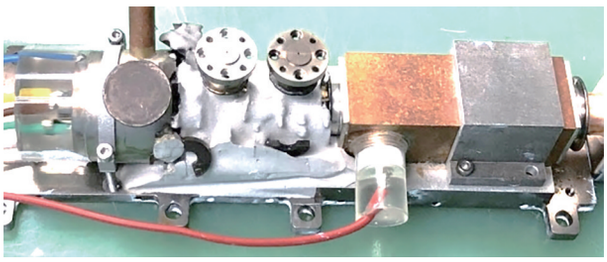
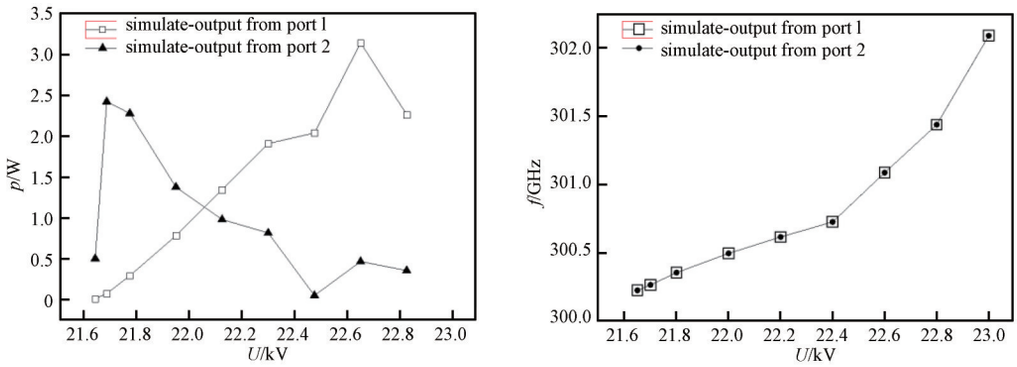


Fig.14 Photograph of the prototype of a 4π band-edge oscillator at terahertz regime
图 14 太赫兹 4π 带边振荡器样管

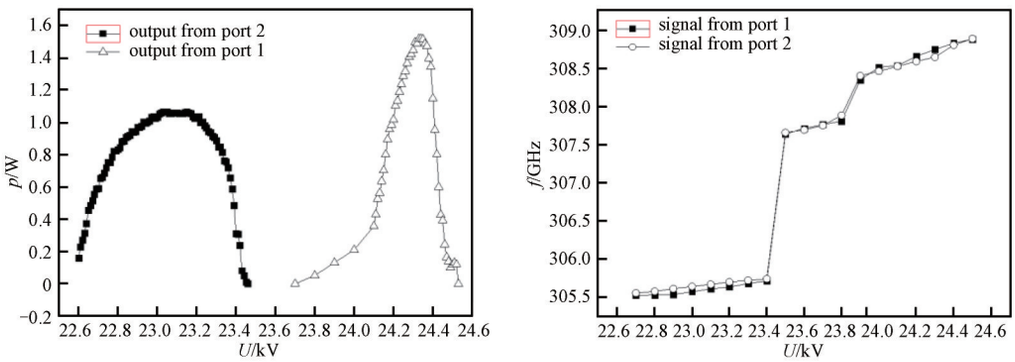
基于双频双模双向带边振荡器工作概念，课题组研制了THz频段4π带边振荡器。仿真结果表明，在前向波和返波2种工作模式下，带边振荡器在301.7~303 GHz的频率范围内输出功率大于2 W，如图15所示。实验测试结果显示，前向波工作模式下，电压在22.9~23.2 kV，输出功率>1 W，振荡频率305.6 GHz；返波工作模式，电压为24.2~24.4 kV，输出功率>1.5 W，振荡频率308.8 GHz，如图16所示[18]。



(a) simulated output power vs. voltage　　(b) simulated oscillation frequency vs. voltage

Fig.15 Simulated curves of output power and oscillation frequency of THz 4π band-edge oscillator

图15 太赫兹4π带边振荡器模拟输出功率和振荡频率曲线



(a) measured output power vs. voltage　　(b) measured oscillation frequency vs. voltage

Fig.16 Measured curves of output power and oscillation frequency of THz 4π band-edge oscillator

图16 太赫兹4π带边振荡器测试输出功率和振荡频率曲线

3　结论

本文对周期性慢波结构电磁色散中的止带特性进行了研究，并利用止带区域具有耦合阻抗高的特点，提出了新型带边振荡器的工作机理，在W波段和太赫兹频段设计和研发了多种带边振荡器。带边振荡器相比于传统的返波振荡器，具有功率大，体积小，轻量化，结构简单，成本低等特点，可以实现批量制造。这些特点可以大幅缩短器件和系统研发周期，降低成本，实用化程度高，为太赫兹技术领域提供高功率、紧凑型的辐射源。

参考文献：

[1] FETTWEIS G, ALAMOUTI S. 5G: personal mobile internet beyond what cellular did to telephony[J]. IEEE Communications Magazine, 2014,52(2):140-145. doi:10.1109/MCOM.2014.6736754.

[2] DAN I, DUCOURNAU G, HISATAKE S, et al. A terahertz wireless communication link using a superheterodyne approach[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2020,10(1):32-43. doi:10.1109/TTHZ.2019.2953647.

[3] LOFFLER T,SIEBERT K,CZASCH S,et al. Visualization and classification in biomedical terahertz pulsed imaging[J]. Physics in Medicine & Biology, 2002,47(21):3847-3852. doi:10.1088/0031-9155/47/21/324.

[4] SCARFI M R, ROMANO M, DI PIETRO R, et al. THz exposure of whole blood for the study of biological effects on human lymphocytes[J]. Journal of Biological Physics, 2003,29(2/3):171-176. doi:10.1023/A:1024440708943.

[5] BORISOV A A, BUDZINSKY U A, BYKOVSKY S V, et al. The development of vacuum microwave devices in Istok[C]// 2011 IEEE International Vacuum Electronics Conference(IVEC). Bangalore,India:IEEE, 2011:437-438. doi:10.1109/IVEC.2011.5747063.

[6] Microtech Instruments Cooperation. User manual for microtech BWO[EB/OL]. (2015-10-23) [2022-09-28]. http://mtinstruments.

com/THz Generators.html.

[7] 毕亮杰. 紧凑型高效率毫米波扩展互作用器件的关键技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2020. (BI Liangjie. Research on key technologies of compact high efficiency millimeter wave extended interaction devices[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.)

[8] SHVETS G.Plenary talk:applications of electromagnetic metamaterials to vacuum electronics devices and advanced accelerators [C]// IEEE International Vacuum Electronics Conference. Monterey,CA,USA:IEEE, 2014:3. doi:10.1109/IVEC.2014.6857461.

[9] 张克潜,李德杰. 微波与光电子学中的电磁理论[M]. 2 版. 北京:电子工业出版社, 2001:393-395. (ZHANG Keqian,LI Dejie. Electromagnetic theory for microwaves and optoelectronics[M]. 2nd ed. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2001: 393-395.)

[10] 冯进军,蔡军,胡银富,等. 周期结构电磁特性在高频真空器件中的应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2015,41(10):1785-1791. (FENG Jinjun, CAI Jun, HU Yinfu, et al. Application of dispersion characteristics of periodic structures for high frequency vacuum devices[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015,41(10):1785-1791.) doi:10.13700/j.bh.1001-5965.2015.0209.

[11] PAN Pan,TANG Ye,BIAN Xingwang,et al. A G-band traveling wave tube with 20 W continuous wave output power[J]. IEEE Electron Device Letters, 2020,41(12):1833-1836. doi:10.1109/LED.2020.3032562.

[12] BIAN Xingwang,TANG Ye,ZHANG Lin,et al. Design of a 50 W 220 GHz traveling wave tube[C]// 2019 International Vacuum Electronics Conference(IVEC). Busan,Korea(South):IEEE, 2019:1-2. doi:10.1109/IVEC.2019.8745114.

[13] PAN Pan, ZHANG Lin,CUI Hengshan,et al. Terahertz power module based on 0.34 THz traveling wave tube[J]. IEEE Electron Device Letters, 2022,43(5):816-819. doi:10.1109/LED.2022.3164660.

[14] 蔡军,王东宇. 基于新型折叠波导的双频 3π 带边振荡器研究[J]. 真空电子技术, 2019(1):41-45. (CAI Jun,WANG Dongyu. Investigation on dual-frequency 3π band-edge oscillators based on novel folded waveguide slow wave structures[J]. Vacuum Electronics, 2019(1):41-45.) doi:10.16540/j.cnki.cn11-2485/tn.2019.01.09.

[15] 王东宇,蔡军. 交错子周期折叠波导慢波结构冷特性研究[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(1):126-130. (WANG Dongyu, CAI Jun. Cold characteristics of stagger half-period folded waveguide slow wave structure[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(1):126-130.) doi:10.11805/TKYDA201801.0126.

[16] CAI Jun, DU Yinghua, ZHANG Xiaoqing, et al. Investigation of a W-band 2π band-edge oscillator[C]// 2019 International Vacuum Electronics Conference(IVEC). Busan,Korea(South):IEEE, 2019:1-2. doi:10.1109/IVEC.2019.8745330.

[17] DU Yinghua, CAI Jun, ZHANG Xiaoqing, et al. A 3π band-edge dual frequency oscillator based on a novel folded waveguide structure[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2020,48(8):2948-2951. doi:10.1109/TPS.2020.3008571.

[18] ZHANG Lin,CAI Jun,BIAN Xingwang,et al. A novel THz forward and backward wave two-mode band-edge oscillator[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2020,10(4):391-396. doi:10.1109/TTHZ.2020.2972291.

作者简介:

张　琳(1990-),女,硕士,高级工程师,主要研究方向为太赫兹行波管及太赫兹带边振荡器.email: zhanglin0991@qq.com.

蔡　军(1978-),男,博士,研究员,博士生导师,主要研究方向为短毫米波和太赫兹行波管及振荡器.

杜英华(1978-),女,硕士,研究员,主要研究方向为W波段行波管及W波段带边振荡器.

冯进军(1966-),男,博士,研究员,博士生导师,主要研究方向为毫米波空间行波管、太赫兹真空器件、回旋管、真空微纳电子学和量子频标器件.