

真空电子太赫兹器件研究进展

常少杰^{1,2}, 吴振华^{1,2*}, 黄杰^{1,2}, 赵陶^{1,2}, 刘頔威^{1,2}, 胡旻^{1,2*}, 魏彦玉^{1,3},
官玉彬^{1,3}, 刘盛纲^{1,2}

(1. 电子科技大学 电子科学与工程学院 太赫兹中心, 四川 成都 610054;

2. 太赫兹技术教育部重点实验室, 四川 成都 610054;

3. 电子科技大学微波电真空器件技术国家级重点实验室, 四川 成都 610054)

摘要: 太赫兹波因其具有电子学与光子学的特性, 所以在深空探测、无损检测、通信及安检等领域有巨大应用潜力。近些年, 太赫兹技术的迅猛发展离不开太赫兹真空电子器件的不断进步。由于尺寸共度效应及电子束发射性能的限制, 这类器件在迈向更高频段过程中遇到了不小的困难。针对这些问题, 研究人员通过改良高频结构、控制加工精度、制备更优性能的材料、更精准的计算手段等一系列措施进行解决。本文介绍几种主流小型化太赫兹器件研究过程中的解决方案及最新进展, 最后根据现阶段发展情况总结未来可能会遇到的问题及解决方法。

关键词: 真空电子器件; 大功率太赫兹辐射源; 研究进展

中图分类号: O43

文献标识码: A

The research progress of vacuum electron device in terahertz band

CHANG Shao-Jie^{1,2}, WU Zhen-Hua^{1,2*}, HUANG Jie^{1,2}, ZHAO Tao^{1,2}, LIU Di-Wei^{1,2}, HU Min^{1,2*},
WEI Yan-Yu^{1,3}, GONG Yu-Bin^{1,3}, LIU Sheng-Gang^{1,2}

(1. Terahertz Science and Technology Research Center, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China;

2. Key Laboratory of Terahertz Technology, Ministry of Education, Chengdu 610054, China;

3. National Key Laboratory of Science and Technology on Vacuum Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: The terahertz wave has great potential in deep space exploration, nondestructive testing, communication and security inspection because of its characteristics of electronics and photonics. The rapid development of terahertz technology in recent years is inseparable from the continuous progress of terahertz vacuum electronic devices. Due to the size sharing effect and the limitation of electron beam emission performance, this type of device has encountered considerable difficulty in the process of higher frequency bands. To solve these problems, a series of measures have been taken, such as improving high-frequency structure, controlling machining accuracy, preparing materials with better performance and more accurate calculation methods. This paper introduces the solutions and the latest progress of several mainstream miniaturized terahertz devices, and finally summarizes the problems and solutions that may be encountered in the future according to the current development situation.

Key words: vacuum electron device, high power terahertz source, research progress

引言

真空电子器件一般指自由电子在真空环境中

与电磁场发生互作用, 将电能转换为电磁能量的器件。广泛用于广播、通信、电视、雷达、导航、自动控

收稿日期: 2021-11-05, 修回日期: 2021-11-23

Received date: 2021-11-05, Revised date: 2021-11-23

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFA0701000, 2020YFA0714001 和 2018YFF01013001); 国家自然科学基金(61988102, 61921002 和 62071108); 中央高校基金(ZYGX2020ZB007)

Foundation items: supported by the National Key Research and Development Program of China under Grant 2017YFA0701000, 2020YFA0714001 and 2018YFF01013001, the Natural Science Foundation of China under Grant 61988102, 61921002 and 62071108, the Fundamental Research Funds for the Central Universities under Grant ZYGX2020ZB007; and the fund of Key Laboratory of THz Technology, Ministry of Education, China

作者简介(Biography): 常少杰(1996—), 男, 河南省濮阳人, 博士研究生, 主要研究领域为真空电子器件, E-mail: Shaojie_c001@163.com

*通讯作者(Corresponding authors): E-mail: wuzhenhua@uestc.edu.cn; hu_m@uestc.edu.cn

制、电子对抗、医学诊疗等领域。在广义上,微波是指频率从300 MHz到300 GHz(波长从1 m到1 mm)的电磁波^[1]。太赫兹波段是指频率从100 GHz到10 THz(波长从3 mm到30 μm)的电磁波,太赫兹辐射也称为亚毫米波、太赫兹波、远红外线等;从其在频谱中所处的位置来看,位于红外与微波之间,属于电子学向光子学的过渡区间,处于宏观经典理论向微观量子理论的过渡区,有很多特殊的性质。正是由于太赫兹未被完全开发以及其具有特殊性质等因素,因而加快对太赫兹技术的研究具有重大的战略意义,引起了各国的高度重视。2005年,在国家领导人的关怀下,刘盛纲院士主持召开了以太赫兹为主题的香山会议,我国太赫兹科学技术研究从此进入快速发展阶段。

目前,太赫兹波的产生主要有以下几种解决方案^[1]:1)利用传统真空电子器件产生太赫兹辐射,包括微米量级高频结构的行波管、返波管等传统真空器件,还有利用Smith-Purcell(SP)效应产生的相干辐射源,现在还不断发展出更高频率的太赫兹回旋管以及扩展互作用器件;2)利用相对论电子束产生太赫兹辐射,例如自由电子激光以及利用切仑科夫效应进行工作的相对论真空电子器件;3)利用能级跃迁来产生太赫兹辐射,这类器件主要有:耿氏振荡器、布洛赫振荡器、太赫兹半导体激光器、太赫兹气体激光器、太赫兹量子级联激光器等;4)利用飞秒激光照射电光晶体来产生高重频的准连续太赫兹辐射,利用该原理可产生瞬时带宽在0.1~7 THz的太赫兹辐射,只是此类器件功率相对较低,在微瓦量级;5)利用大功率激光器和非线性材料相互作用,在相位匹配的条件下进行差频产生太赫兹辐射,该方法有一定的调谐特性;6)利用光整流脉冲太赫兹源,电流自振荡太赫兹源;7)光导天线在施加偏置电压的条件下用脉冲激光进行激发产生太赫兹频段的辐射,这是光导开关太赫兹源的基本原理,也是现阶段研究中的一个重要分支。

通信、成像、无损检测、生物医疗、信息安全、科学研究、天气及环境监测及国防军事等领域中均可看到微波及红外波段被应用的身影^[2]。由于太赫兹波在电磁波谱中的特殊位置,这些应用场景均可使用太赫兹进行代替。在通信应用领域,太赫兹频段将会有更高的数据传输速率;在成像方面,太赫兹波段相比微波拥有更高的分辨率;在生物医疗领域,可以利用被检测样本在太赫兹频段的谱特性来

进行表征;在军事研究领域雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)成像可以用来衡量军事目标的隐身性能^[3],在研究过程中随着探测波长向太赫兹迈进,被探测的物体可以由实物同比例缩小至桌面模型尺寸,大大减小了研发成本。虽然应用的场景多种多样,但是这些场景对太赫兹源的小型化、大功率及易用性要求较为一致。前文所列举出来的七种太赫兹辐射源中,都具有自己无可替代的地位,不过真空电子器件是在太赫兹低频段辐射源中大功率和小型化的最优解。

不同类型的真空电子器件拥有自己不同的发展方向,可以粗略地分为振荡器和放大器两大类。其中振荡器主要有:返波管、回旋振荡管、磁控管、斜注管、奥罗管及扩展互作用振荡管等;放大器主要有:速调管、行波管、回旋速调管、回旋行波管、返波放大器及扩展互作用速调管等。本文按照器件的类别较为系统地介绍不同器件的发展方向、最新进展及需要解决的问题。第一节介绍返波管的研究进展,返波管是迄今为止在小型化真空电子器件领域中得到最高输出频率的辐射源;第二节介绍行波管的研究进展,这类器件研究相对较多,且有较多应用场景;第三节介绍速调管及扩展互作用器件,这两类器件输出功率在较高频段仍能达到千瓦量级;第四节简述回旋管的发展至现阶段的历程,并对目前的最新成果进行简介;第五节介绍新型的太赫兹器件的研究进展,包括太赫兹磁控管、(超辐射)奥罗管、斜注管等。最后一节对文章进行总结,并对太赫兹真空电子器件未来发展方向进行展望。

1 返波管

返波管由高频系统中电磁波能量传播方向与电子束传输方向相反而得名。在发展过程中,同阶段返波管的输出频率相较于其他小型化的真空电子器件是最高的。现今返波管的主要发展方向是高频率。器件的工作频率越高,所对应的高频结构尺寸越小;结构尺寸的减小会导致与之匹配的电子注尺寸减小,在现阶段阴极材料发射性能条件下,更小的电子注尺寸意味着更小的输入功率^[4]。所以,为适应新的加工及装配技术等,将高频结构的设计进行改进是返波管迈向太赫兹频段过程中所采用的必要手段。微波频段中器件的结构尺寸较大,通常的慢波结构有:平板光栅、螺旋线、折叠波导等。如图1所示,除了高频结构外,返波管的组成结构基本一致^[5]:

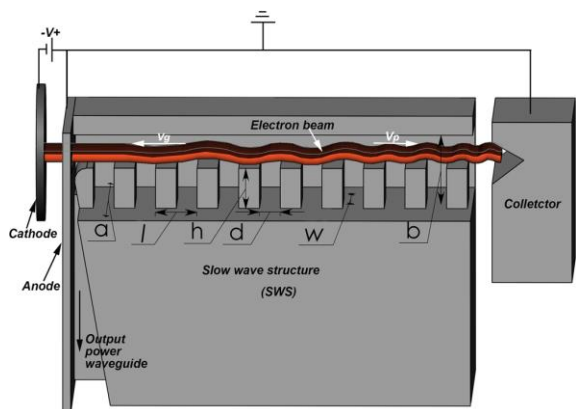


图1 返波管结构示意图

Fig. 1 The structure diagram of Backward Wave Oscillator

1.1 周期光栅慢波结构的返波管

对于最传统的光栅结构返波管,其结构简单、加工及装配难度较低,但是机械加工已经无法满足太赫兹波段一定深宽比的光栅。随之出现的UV-LIGA(Ultraviolet - Lithographie Galvanik Abformung)工艺更好地解决了这类问题,可以将高频结构加工公差减小一个量级。图2(a)所示的传统平板光栅的返波管^[5],为UV-LIGA技术在0.3 THz的一次实践。在光栅结构中,高频场能量被束缚在光栅表面,离光栅越远的电子束所受到的调制强度就会越小,因此在太赫兹频段光栅结构返波管的研究过程中,尽可能地减小光栅与高频场之间的距离以确保电子束能够充分得到调制。在现有的加工手段条件下发展出来两种基于此思路的优化方式,分别是将光栅改为二维光栅柱及在光栅表面挖去部分圆孔,使电子注从其中穿过^[6]。图2(c)为工作频点在0.346 THz的实物图,现有的加工工艺及装配技术完全可以满足需求。

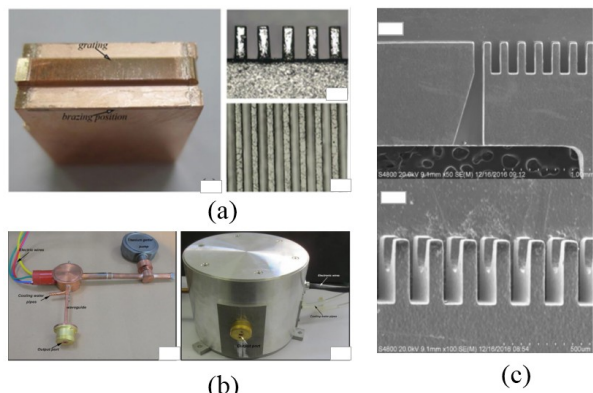


图2 平板光栅改进结构加工及装配情况

Fig. 2 Improved structure processing and assembly of flat-grating

近年来,使用二维光栅柱结构研制的1 THz返波放大器为进行的最大胆尝试^[7]。该项目充分利用了光子晶体的独特性质实现了慢波结构、输入及输出耦合结构的设计。在该器件中,半径为20 μm 的19 mA电子束由直径为400 μm 的阴极发射面压缩而成,因此电子枪的设计及加工工艺也极为重要。该器件原理示意图如图3所示,原理类似于行波管,但是该器件工作在返波区域。

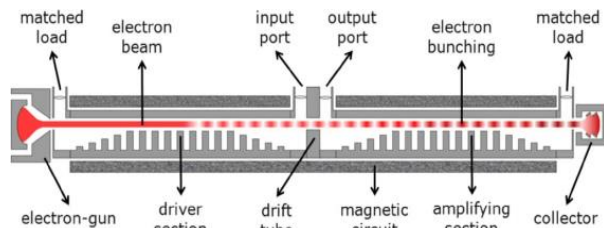


图3 1 THz返波放大器原理示意图

Fig. 3 The schematic diagram of 1 THz Backward Wave Amplifier

1 THz返波放大器所对应的高频结构精度为纳米量级^[7],对于传统的微细加工来说是个极大的挑战,很难通过该方式实现理想精度的高频结构。LIGA(Lithographie Galvanik Abformung)加工工艺的特点与1 THz慢波结构尺度契合较好。因此,LIGA工艺的优势在该项目上体现得淋漓尽致。该工艺由半导体生产工艺演化而来,可以用来制造较大深宽比的结构,精度较高,且工艺固定后可重复率很高。在理想情况下的结构为图4(a)所示,但是在加工过程中,由于加工工艺的特点,无氧铜材质的二维周期柱很容易被破坏,从而导致高频结构被破坏,如图4(b)所示。光栅柱的横向尺寸为21 μm ,表面粗糙度控制在了200 nm以内。为了保证结构表面的光洁度,对加工完成的基底进行镀金处理,以减少器件表面的欧姆损耗。最终,实验过程中没有测出输出信号,主要是因为保证加工高频结构的横向尺寸的前提下,光栅柱的高度误差过大,柱高差异最大为10 μm ,破坏了结构的慢波特性。

最近针对光栅结构返波管的研究中出现了一种新型高频结构,将矩形光栅变为同心圆形光栅,如图5所示,电子束由半径一端射向圆心处的收集极^[8]。此结构中电子束向圆心发射过程中束流密度会逐渐增大,因此对阴极的发射密度要求较低,间接解决了太赫兹波段返波管对束流密度的较高要求。

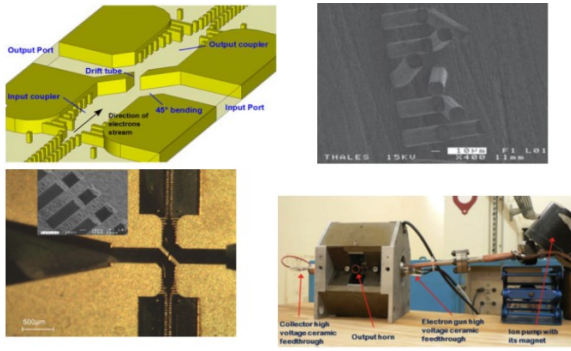


图4 返波放大器结构示意图及加工装配情况
Fig. 4 The schematic diagram of the structure of 1 THz Backward Wave Amplifier and its processing and assembly conditions

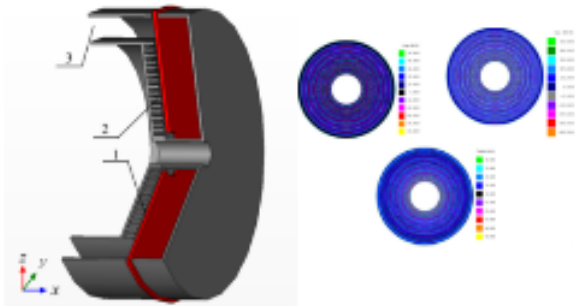


图5 径向电子束返波管结构示意图及本征模场分布情况
Fig. 5 The schematic diagram of the radial electron beam Backward Wave Oscillator structure and eigenmode field distribution

1.2 新型慢波结构返波管

螺旋线是高频结构的一个重要分支,其尺寸偏差对器件的慢波特性和有极大影响,因此螺旋线的厚度、螺距等参数需要严格控制;装配过程中需要金属或介质杆进行夹持,三根夹持杆相互之间角度 120° ;当夹角存在一定偏差时将会形成阻带^[9]。在频段较低时,螺旋线慢波结构可以由一定材质的金属丝绕制而成;对于太赫兹波段螺旋线结构来说,传统的加工及装配工艺不再适用,因此太赫兹返波管慢波结构的另一个重要发展方向是将螺旋线结构进行优化变形。金及金刚石由于其优异的导热性及电磁特性,被发掘出来制作太赫兹波段的螺旋线慢波结构。图6(a)及图6(b)分别为通过化学气相沉积 (Chemical Vapor Deposition, CVD) 技术得到的金刚石基底及由光刻技术得到的金材质的0.65 THz螺旋线慢波结构^[10-11]。图6(c)也是一种螺旋线慢波结构的变形^[12],在太赫兹频段的加工方法可以借鉴前两种的加工方式,作者在较低频段进行了验

证性实验,该结构慢波特性与理论吻合较好,为太赫兹螺旋线慢波结构提出了一种新型的解决方案。

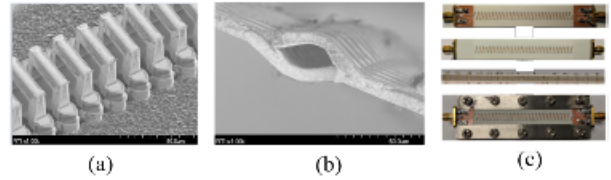


图6 新型太赫兹螺旋慢波线结构
Fig. 6 Novel terahertz spiral interaction structure

折叠波导慢波结构由于其优异的传输特性被广泛用于真空器件的研究。由于机械加工极限的限制,只能实现较低太赫兹频段结构。折叠波导结构在返波管领域应用较少,但其可行性在G波段已经得到了实验验证^[13]。为了减小折叠波导直接加工的难度而衍生出来了准平行平板慢波结构^[14],该结构在D波段冷腔测试表明拥有与折叠波导相当的传输特性。图7(b)为准平板慢波结构加工及装配图,装配结构与图7(a)结构类似,但在相同频段条件下加工难度要小很多,有较大的发掘潜力。

目前很多慢波结构都是由折叠波导衍生而来,例如交错双栅结构、正弦波导结构等。对于返波器件,能量的传输对器件的性能有很大影响,在交错双栅结构中往往会增加几个周期的Taper来降低电压驻波比;对于正弦波导结构也会增加渐变结构来提升高频结构性能。图7(c)为增加渐变段交错双栅结构返波管在0.346 THz频点的一次实践^[15],成功得到了与计算结果契合的冷测数据。

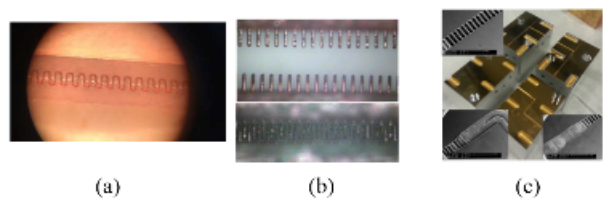


图7 折叠波导慢波结构、准平行平板慢波结构及交错双栅慢波结构
Fig. 7 Folded waveguide interaction structure, quasi-parallel flat-plate interaction structure and staggered double-grating interaction structure

正弦波导结构作为折叠波导结构变形中一个很重要的分支,近些年的研究过程中逐渐受到了更多的重视,也被应用到了返波管中。正弦波导拥有天然电子束通道,避免了单独加工电子束通道,

间接地增加了结构强度。图 8(a)展示了带状电子束所对应的慢波结构^[17-18]。研究人员对 1 THz 正弦波导慢波结构的 S 参数进行计算,发现该类结构在高频段依然拥有较好的传输特性。

由于交错光栅结构相对单光栅结构可以对电子束进行更充分的调制,也具有更高的功率容量,因此人们对此做了大量的研究。随着研究人员对交错光栅结构认识的加深,一种角向交错光栅的结构被提出^[19],如图 8(b)所示。该结构中电子束为角向分布,相对于横向分布的电子束来说,电子之间的空间电荷力更小,相同的聚焦磁场情况下允许更大的束流,从而可以提供更大的功率输出。文章中作者对 W 波段结构进行了仿真及冷测实验,测得 S 参数与计算较为一致,验证了该结构的可靠性。热腔计算表明该结构在 0.0798 THz 至 0.1047 THz 之间进行电调谐,输出功率均在 13 kW 以上。

随着超材料优异的电磁特性被不断发现,二维材料、光子晶体等结构也被应用到了真空电子器件的研究过程中。二维材料的加工及装配相对简单,采用印刷电路板(Printed Circuit Board, PCB)及微细加工工艺即可得到。图 8(c)所示的铜平板二维慢波结构在研究中发现有超宽的频率响应范围,随后针对该结构提出的 W 波段双电子注返波管拥有 32.7 GHz 的带宽范围,相对传统结构器件的 10% 相对带宽大大提升。图 8(d)为采用了光子晶体结构的返波管^[21-22],左侧为采用了基于渐变的光子晶体耦合结构,右侧高频结构两侧为光子晶体,器件的回波损耗小于 -30 dB,丝毫不逊色于传统慢波线的传输性能。

1.3 贗火花电子束返波管

近几年的发展过程中,电子枪的发展也较为迅

速,除了传统的热阴极外,还有各种不同应用场景的热阴极,贗火花电子束就是被成功应用的代表。贗火花为脉冲电子束源,对真空度要求较低,且不需要聚焦磁场,电子束流密度是传统热阴极的十倍左右。图 9 为贗火花电子束源的原理示意图,结构较为简单,可以更换不同的高频结构进行测试,增加了实验的便利性^[16]。图 9 所示以贗火花为电子束源的交错双栅返波管结构示意图,也采用了渐变设计。在不同束流密度情况下测得同样趋势的功率随电压变化的情况,工作带宽达 38 GHz,在 0.343 THz 至 0.381 THz 范围内输出均在千瓦量级,充分验证了该电子束的可靠性,有发展为大功率脉冲工作器件的潜力。

2 行波管

行波管是小型化真空电子器件中应用最为广泛、研究也相对更加深入的线性注器件。其体积小、功率大、宽频带以及高效率等优点使行波管拥有广泛的应用场景。由于其工作寿命较长,在卫星通信、电子对抗等领域有不可代替的地位。在不断的发展过程中,针对不同用途逐渐演化出了多个分支。传统行波管的研究中螺旋线行波管及耦合腔行波管研究较多。对于螺旋线行波管,由于高频结构的特殊性,导致其散热性能及功率容量有限,随着频段的提高,慢波线的绕制及装配也是一个较为严峻的考验。耦合腔结构有较高 Q 值,应用到行波管的研究中会极大影响器件的带宽性能。折叠波导的提出弥补了以上两种结构的不足,并且加工工艺要相对简单,因此逐渐成为行波管研究过程中的主流结构。此类器件整体结构基本一致,如图 10 所示,由电子枪、聚焦系统、输能装置、高频结构以及收集极组成^[23]。

2.1 折叠波导行波管

由于 G 波段为大气窗口,利用这一频段的优势可以拓展其应用场景。目前很多研究机构都对 G 波段的连续波行波管展开了研究。针对不同的应用场景特点,行波管的研究也有几个不同的分支。对于机载雷达及无线通讯领域,需要器件有稳定的连续波输出。现阶段, G 波段连续波行波管整体长度在 30 cm 以内,图 11(a)的 G 波段连续波行波管最大输出功率超过 20 W,饱和输出功率在 15 W 以上,在 7.6 GHz 带宽范围内电子束流通率超过 95%。输入或者输出耦合结构在设计 and 加工过程中不能完全匹配时会带来一定的反射,从而引起自激振荡,最

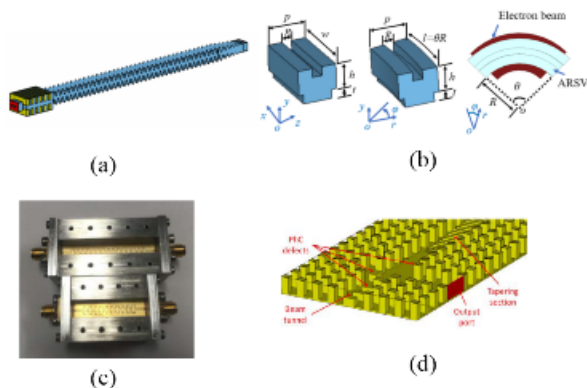


图 8 新型高频结构返波管

Fig. 8 Novel interaction structure Backward Wave Oscillator

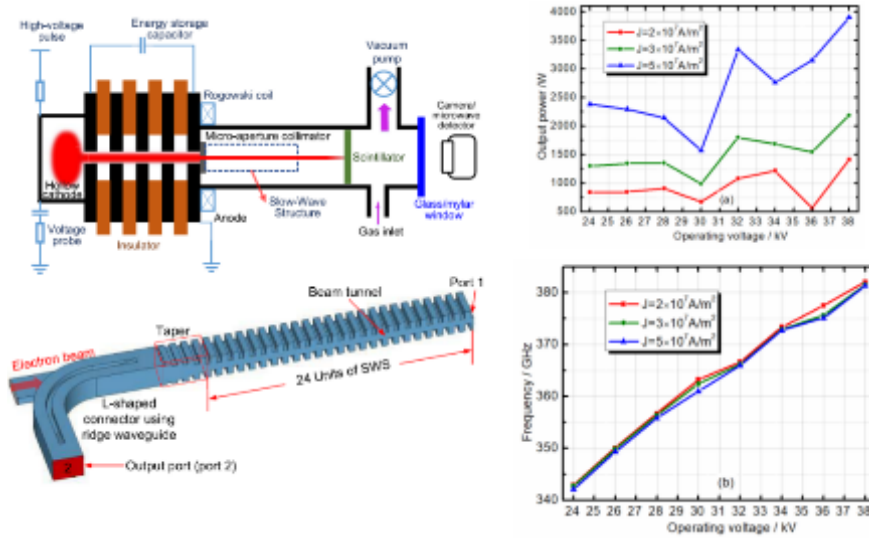


图9 赝火花返波管结构及实验情况
Fig. 9 Structure and experiment of Pseudospark Backward Wave Oscillator

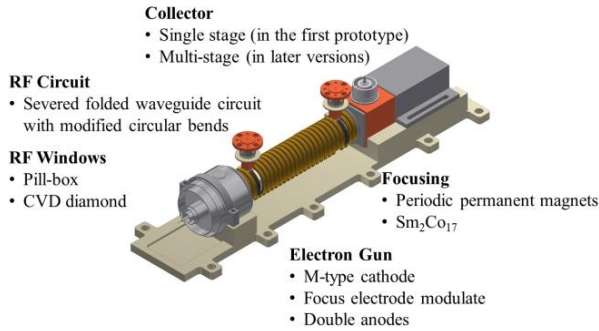


图10 行波管结构示意图
Fig. 10 The schematic diagram of Traveling Wave Tube

终造成增益减小甚至无法实现放大特性。慢波线中间增加衰减器可以切断反射信号,从而避免自激振荡的出现^[24]。图11(b)所示的G波段的连续波行波管为避免上述情况的出现,在设计过程中慢波线被衰减器分为了两部分,最终实验测得在213 GHz至220 GHz范围内产生了超过16 W的输出,在217 GHz处功率超过30 W。

研究过程中,除了对G波段带宽性能进行提升外,在有限条件下增加器件的输出功率也尤为重要。通过微调高频结构来提升电子注相互作用强度是解决此问题的途径之一,其中相速渐变结构与脊加载波导结构被用到大功率行波管的设计过程中。图11(c)为工作在G波段的行波管,其工作频点设置在了波导的截止频率附近,并对折叠波导拐角处的圆角进行修正,结合相速渐变技术使得电子注换能更加充分,从而器件的性能得到了提高,电子注电压为24.25 kV,束流大小为59 mA时,占空比为

5%的情况下,输出功率达50 W以上;但是也因此牺牲了带宽性能,工作带宽仅为3.6 GHz^[26]。与传统折叠波导不同的是,脊加载波导是通过其在直波导段的横向内壁两侧对称的位置加载了金属脊。这一设计改进了电子注与高频场在相互作用区域的场强,电子的调制深度进一步增大,从而提高了输出的功率。图11(d)为脊加载波导结构行波管^[25],该器件实现了在93.1 GHz至94.8 GHz范围内产生超过25 W的功率输出,为向更高频段的发展奠定了基础。

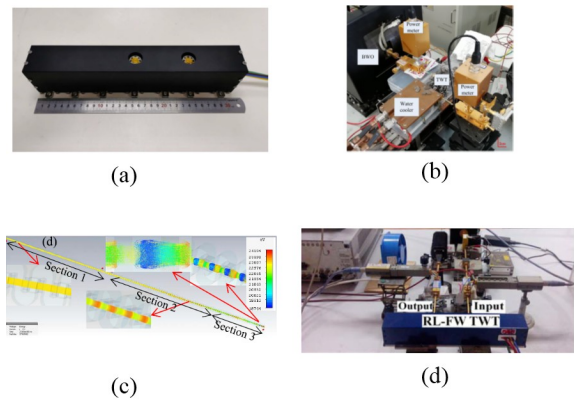


图11 不同频段大功率行波管
Fig. 11 High-power Traveling Wave Tube in different bands

除了连续波行波管外,大功率脉冲行波管也在迅猛发展。下图为几种大功率脉冲行波管的解决方案。在使用各种手段使器件的工作效率达到一定水平后,无法再从此角度进行功率提升时,可以直接提高器件的输入功率及电子注功率来更为显

著地提高器件性能。现有的行波管输入信号源有两种主流方案,一是将较低频段的固态源使用倍频器产生所需信号;二是由返波管的输出信号作为输入信号。在太赫兹波段这两种信号源的功率都相对较低,最高在百毫瓦量级。因此,为了提高行波管的输入信号便有了如图 12(b)所示方案,将一支行波管的输出信号作为另一只行波管的输入信号^[27],从而提高器件的输出水平。最终在 17 kV、71 mA 电子注条件下,0.22 THz 附近获得了 60 W 的峰值功率,带宽超过 6 GHz。图 12(a)为 W 波段大功率行波管增加电子注输入功率的方案,20 kV、140 mA 柱状电子束,在占空比为 0.1% 时,93 GHz 处测得 215 W 的峰值功率^[28],100 W 以上的输出频率范围分布在 88 GHz 至 98 GHz。使用多电子注和多慢波电路的结构设计对其进行功率合成的研究也进入了研究人员的视野,Nguyen 等人使用理论计算证明了该方法的可行性。

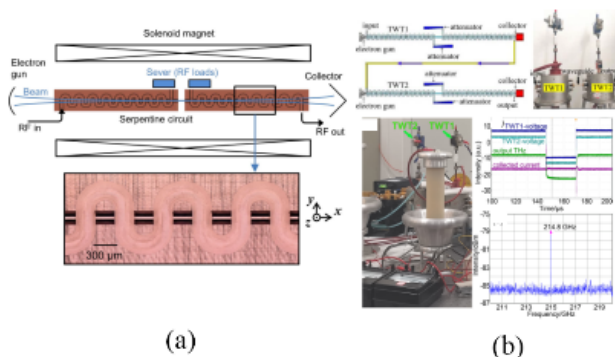


图 12 两种大功率行波管的解决方案
Fig. 12 Two solutions for high-power Traveling Wave Tube

除了向连续波及大功率方向发展外,高频率行波管也在稳步推进。太赫兹行波管发展路线主要有两条,其一为传统行波管路线,将输入信号源频率提高并减小慢波线尺寸,从而得到对应频率的放大信号。其二是通过谐波的方式产生倍频信号来获取。特定频率的输入信号在输入段对电子注进行一定的调制会携带一定分量的谐波信号,当被调制的电子注经过谐波输出段时将倍频信号进行放大并输出。由于太赫兹频段信号源功率相对较小,且成本较高,因此方案二受到越来越多的关注。图 13 为路线一的热测实验装置图^[29],输入信号由固态器件倍频所得到的,输出功率在 7 mW 左右,在 16.2 kV 电子注条件下输出功率最高为 3.1 W,增益超过 26 dB。

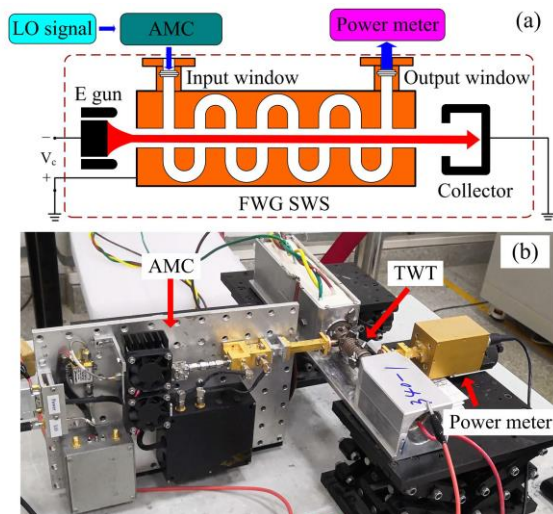


图 13 0.34 THz 折叠波导行波管
Fig. 13 0.34 THz folded waveguide Traveling Wave Tube

2.2 新型慢波结构行波管

人们在现有的加工能力下逐渐把折叠波导的性能推向极限,因此发展新型的行波结构是必然趋势。为了提高器件的增益、带宽、加工便利性等,出现了各种折叠波导的衍生结构,例如对数周期折叠波导、正弦波导、双电子注交错双栅、超材料慢波线等结构,都有自己独特的特性,为不同用途的行波器件的发展提供了更多选择。改进型对数周期折叠波导行波管的每个周期都有不同的色散特性,如图 14(a)所示,可以利用这一特性来抑制行波管的振荡。针对 Ka 波段器件仿真计算发现增益达到 40 dB 时仍能稳定进行信号输出,冷测表明器件的传输特性良好,与仿真吻合较好^[32]。折叠波导的另一变形为正弦波导,如图 14(b)所示正弦波导具有宽频带、天然电子注通道、易于加工等优点^[33]。在毫米波及太赫兹行波管中应用,其传输损耗远小于折叠波导行波管,测试结果表明在 90 GHz 至 100 GHz 范围内整个慢波电路透射系数大于 4.1 dB,总长度为 123.84 mm,但透射损耗小于 0.36 dB/cm。

传统的交错双栅结构也可以认为是折叠波导的一种变形结构,有较好的传输性能,一般为单电子注通道。增加电子束个数为提高器件输出功率的方法之一,图 14(c)在传统的交错光栅结构上进行了改进,可以运用两条电子注进行工作,电子注通道开在光栅脊上,并且工作模式在电子注通道处截止;通过优化光栅参数,使其结构与传统的交错双栅结构具有相同的工作频带,与矩形光栅同样拥有较高的相互作用阻抗,并且传输特性不会受到较大

影响。模拟结果表明该结构可以显著提升饱和功率及电子效率^[34]。采用高阶工作模式是提高器件工作频率的途径。图 14(d)为一种 94 GHz 过模行波管的设计^[35], 高频结构激励起来 TM₃₁ 的模式, 通过添加损耗介质的方式来抑制其他低阶模式, 在 0.25 T 的螺线管磁场中, 器件的增益达到 27.2 dB, 饱和输出功率达到 55 W。

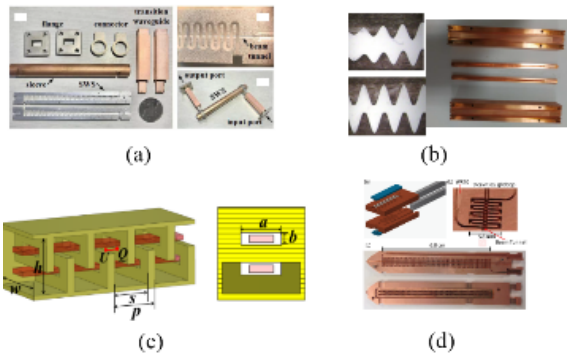


图 14 新型结构行波管

Fig. 14 Novel structure Traveling Wave Tube

对于太赫兹行波管来说, 加工也是一个较大的挑战, 慢波结构的精度及表面光洁度对器件有很大影响。随着对材料及工艺认识的不断加深, 利用材料的特点进行了 1 THz 螺旋线慢波加工的尝试。该螺旋线结构由金属纳米膜制作而成, 此方法依赖于纳米膜的引导自组装特性, 且拥有较好的表面光洁度。图 15 为该慢波线的大致加工过程, 仿真表明该结构可在 1 THz 处提供高于 2 dBTHz 的增益带宽^[36]。

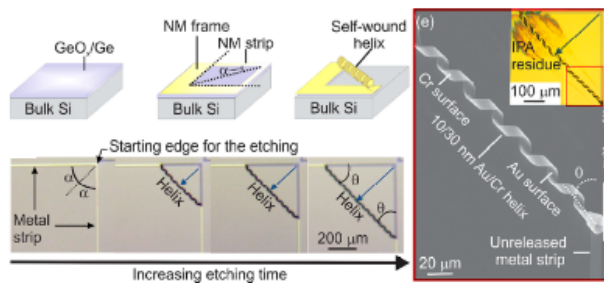


图 15 基于纳米膜自引导组装特性器件的 1 THz 螺旋线慢波结构

Fig. 15 1 THz spiral slow-wave structure based on self-guided assembly of nano-membrane devices

2.3 高次谐波行波管

谐波行波管是以输入信号倍频方式进行输出, 虽然被输入信号调制的电子束所携带的谐波被放

大, 但是效率仍然很低, 所输出信号功率水平与输入信号在同一功率水平。图 16(a)为一种 W 波段三次谐波行波管, 器件的基本结构与传统结构类似, 只是在群聚段及辐射段之间多了一段电子注的漂移段。当输入 200 mW 的 44.5 GHz 信号时, 输出信号为 280 mW 的 133.5 GHz^[30]。图 16(b)为 G 波段二次谐波行波管, 存在三段结构, 包括两段基波段及一段谐波段, 对基波的放大信号也进行了输出。以占空比为 1% 的脉冲方式工作时, 在 11.4 GHz 带宽范围内实现 100 mW 以上的二次谐波输出功率^[31], 最高功率输出达 500 mW。

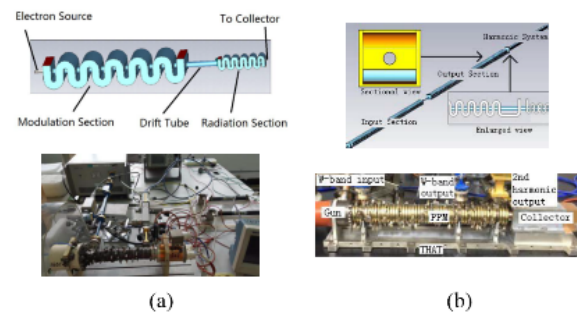


图 16 折叠波导谐波行波管

Fig. 16 Folded waveguide harmonic Traveling Wave Tube

3 扩展相互作用器件

为了满足深空探测、加速器应用等场景的需求, 大功率速调管的研究从未停下过脚步。此类速调管的研究频率主要集中在 Ka 波段及以下, 以发展千瓦和兆瓦级功率脉冲速调管为主。由于速调管采用谐振腔来对电子束进行调制, 有很高的增益, 因此导致这一器件的带宽很小; 然而目前主流行波管以频带较宽的折叠波导来对电子注进行调制, 该类高频结构决定行波管有较大带宽, 但是增益相对较低。研究人员想把速调管的高增益及行波管宽频带的特性结合起来, 于是出现了扩展相互作用器件。扩展相互作用器件分为扩展相互作用振荡器和扩展相互作用速调管。

3.1 扩展相互作用振荡器

国内对于太赫兹扩展相互作用器件的研究主要集中在高校及研究所, 并且以振荡器的研究为主。带状电子注具有更小的空间电荷力, 减小了聚焦磁场的压力; 且有较大的功率容量, 这也与扩展相互作用器件的特性更加契合。所以在太赫兹波段扩展相互作用振荡器的研究过程中, 相对柱状电子束受到了更多的青睐。图 17-(b)为一种采用带状电子注

的 W 波段扩展相互作用振荡器 (Extended Interaction Oscillator, EIO) 的一种设计, 初步测试结果表明, 在 47.2 kV 和 2.1 A 电子注条件下, 最大输出峰值功率为 6 kW^[45]。此类大功率器件一般在一定占空比的准连续波状态下进行工作, 在 20% 的工作负荷下, 平均功率为 1.2 kW, 静态电子流通率为 99%, 饱和输出情况下电子束流通率为 94.4%。极大地体现了带状电子束的优势。图 17(a) 中采用了 24 个周期 2π 模式工作的梯型慢波结构^[44], 采用精度相对较低的加工方式使束流通过率只有 50% 左右, 阴极电流为 0.14 A, 在 11.4 kV 电压下测得 95.16 GHz 峰值功率大于 30 W。

大功率 EIO 一般都以脉冲方式进行工作, 前文提到的赝火花电子束的高密度、脉冲工作、无需磁场等特点与脉冲扩展相互作用振荡器的工作方式较为契合。如下图分别为采用圆柱及带状注电子束的赝火花扩展相互作用振荡器。两种结构均为阶梯状慢波线, 图 17(c) 中圆柱形电子注振荡器可以产生 38 W 的 W 波段信号^[42], 图 17(d) 中为矩形电子注, 电子注发射面积较大, 因此电流会相对圆柱形电子束大很多, 最终得到了 1.2 kW 的脉冲功率输出^[43]。

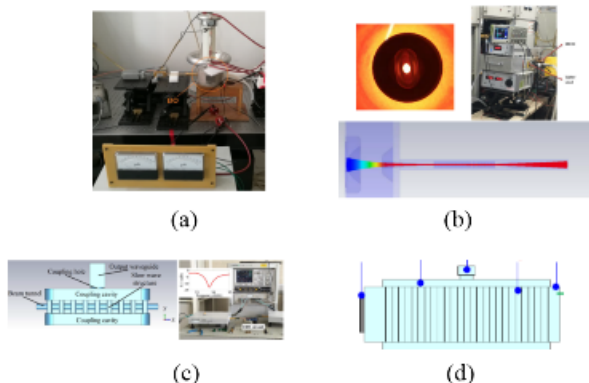


图 17 梯形慢波结构扩展相互作用振荡器

Fig. 17 Trapezoidal interaction structure Extended Interaction Oscillator

扩展相互作用器件的研究除了使用较多的梯形慢波结构外, 中科院研究机构还进行了折叠波导结构 EIO 的尝试, 如图 18 所示, 该结构在 308 GHz 获得了 2 W 以上的输出功率^[46]。国际范围内, CPI 公司对真空电子器件有较为系统且深入的研究, 但该公司对于 EIO 的报道相对较少, 图 19 为 2013 年展示的一种小型高功率 264 GHz 的连续波扩展相互作用振荡器, 该器件可以通过机械调谐和两种工作模式的电

子切换, 在 258 GHz 至 270 GHz 范围内提供超过 1 W 功率的输出^[39]。



图 18 折叠波导扩展相互作用振荡器

Fig. 18 Folded waveguide Extended Interaction Oscillator

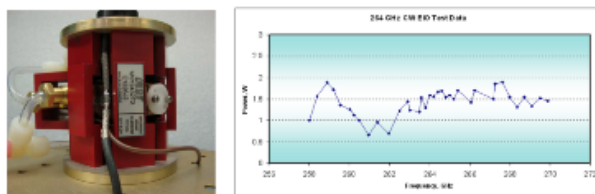


图 19 0.264 THz 扩展相互作用振荡器

Fig. 19 0.264 THz Extended Interaction Oscillator

通常情况下利用梯形慢波结构进行工作的器件一般都是激励起 TM₁₁ 模式。图 20 为近期提出的一种利用更高次模式进行工作的梯形慢波结构, 通过调节尺寸参数, 使 TM₅₁ 模式的频点刚好是 TM₁₁ 模式频点的三倍。电子束被基模调制以后会同时激励起高次模式, 从而使电子束被该模式进行再次调制, 进而实现对谐波的输出^[47]。

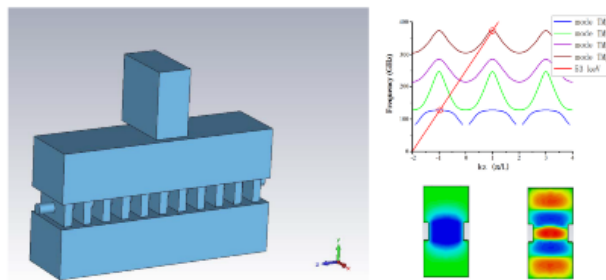


图 20 谐波扩展相互作用振荡器结构及色散情况

Fig. 20 Structure and dispersion of harmonic Extended Interaction Oscillator

3.2 扩展相互作用速调管

国外对此类器件研究较为深入的主要有加拿大的 CPI 公司以及美国海军实验室。其中早在 2007 年, CPI 公司就报道了其成功研制的 W 波段扩展相互作用速调管^[37]。器件的中心频点为 95 GHz, 带宽为 2.2%, 以脉冲方式进行工作, 峰值功率为 1 kW, 平均功率在 100 W 左右, 整体的重量小

于 6 kg。次年的 IVEC 会议上又报道了 G 波段的连续波扩展相互作用速调管,如图 21 所示,在 218 GHz 处可以产生 7 W 的连续波输出,整体重量进一步减小,仅为 4.3 kg^[38]。

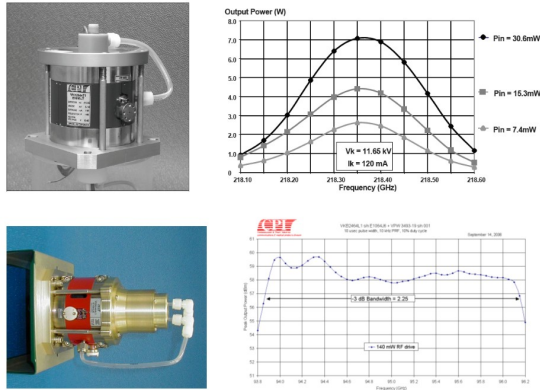


图 21 G 波段及 W 波段扩展相互作用速调管
Fig. 21 G-band and W-band Extended Interaction Klystron

美国海军实验室采用带状电子注及传统扩展相互作用腔结构成功研制峰值功率在 7.5 kW 的 94 GHz 扩展相互作用速调管如图 22 所示^[40]。为了保证器件的增益和带宽,三个腔体的本征频率会有一些的差别,且给每个谐振腔配置了可以进行机械调谐的结构。由于每个腔体的起振频率有所差别,且矩形电子注通道对谐振腔内的高频信号显示为导通特性,高频场之间的相互影响会导致增益减小,甚至无法进行放大。因此研究人员在腔体之间设置了 chokes 来对高频信号进行隔离,并采用收集极将效率提升至 17%。

除了以上两个研究机构做出的成熟产品外,人

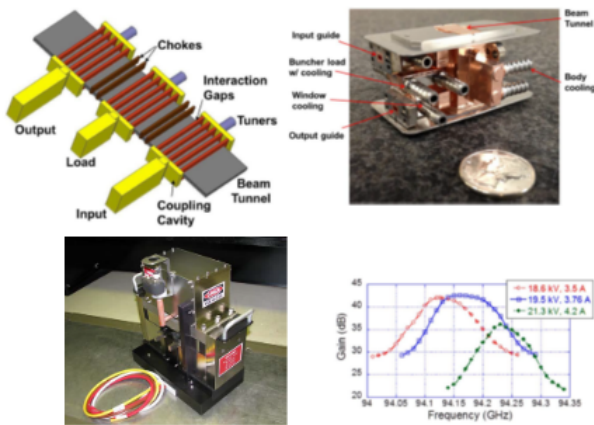


图 22 带状电子注 W 波段扩展相互作用速调管
Fig. 22 Banded electron beam W-band Extended Interaction Klystron

们还对新型扩展相互作用器件进行了不断的探索。图 23 为 MIT 利用光子晶体的电磁特性设计并制作了 W 波段扩展相互作用速调管 (Extended Interaction Klystron, EIK)。该光子晶体 EIK 由 6 个谐振腔组成,每个谐振腔是由 5*3 方阵组成的光子晶体单元^[41],电子束为 23.5 kV、330 mA,在 0.5 T 的螺线管均匀磁场中,可以产生 30 W 饱和输出的 93.7 GHz 高频信号,增益达 26 dB。

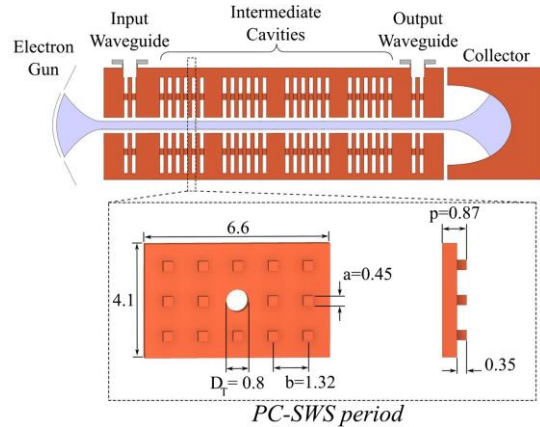


图 23 光子晶体扩展相互作用速调管
Fig. 23 Photonic crystal Extended Interaction Klystron

由于扩展相互作用腔拥有较高 Q 值,所以增益较大,这也导致其带宽相对较窄。国内对于扩展相互作用速调管的研究相对较少,实验成果基本集中在 W 波段。在 2015 年报道了采用 17 kV、0.34 A 电子束的设计,该器件在 94.77 GHz 频点处可以输出 580 W 的平均功率;最终实验中电子束为 18 kV、0.28 A 情况下,在 94.95 GHz 处可以获得 374 W 的平均功率输出^[79];随后在 2018 年出现了一种可以调谐的四腔 EIK,原型管的平均输出功率达 400 W,利用其可以调谐的特性,3 dB 带宽接近 200 MHz^[80];2019 年,成功设计出一款 40 dB 增益的 W 波段宽带 EIK,3 dB 带宽大于 1 GHz^[81]。在对 EIK 不断地探索过程中出现了一种不等长槽结构的 G 波段扩展相互作用速调管,如图 24 所示,长短槽的尺寸比例对有效特性阻抗及模式分离度影响较大。仿真结果表明,采用此结构的 G 波段器件有 400 W 的输出功率,带宽相对传统梯形结构的器件有较大提升,达到了 800 MHz。冷腔测试结果与模拟结果偏差 1 GHz,验证了该结构的合理性^[48]。

扩展相互作用电路向太赫兹波段迈进过程中主要的问题为加工工艺的限制及热效应的影响。在太赫兹波段的电子注尺寸相对毫米波会减小很多,

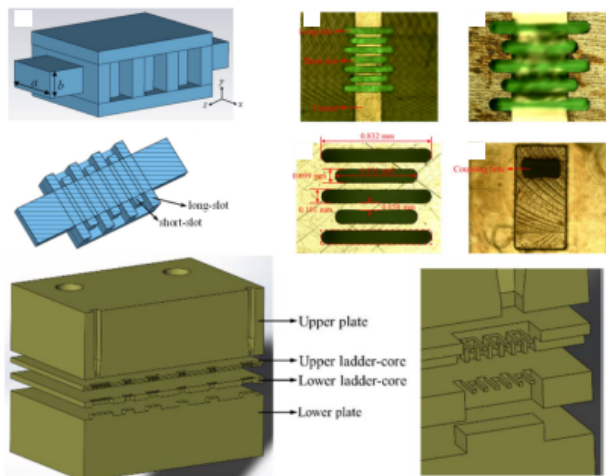


图 24 长短槽梯形慢波结构
Fig. 24 Unequal-length Slots interaction structure

所以电子束密度的要求也会越来越高。随着材料科技及光刻工艺的发展,终将得到太赫兹辐射的扩展互作用器件。

4 回旋管器件

回旋电子受激辐射的原理,于1958年由澳大利亚天文学家 R. Q. Twiss 通过分析电离层对电磁波的吸收效应时提出^{[60][61][62]}。后续的发展过程中,理论逐渐被其他学者相继进行补充。基于回旋电子受激辐射这一原理发展起来的回旋电子注器件相比于传统微波器件有诸多优势:a. 克服了高频结构与工作波长的尺寸共度效应,所以回旋器件在相对较大的尺寸情况下可以产生太赫兹频段的辐射;b. 回旋电子束的电流相对同频段传统器件要大很多,有更高的功率容量;c. 在传统器件中,电子束群聚以后会携带不同的相位信息,这些相位信息叠加以后会减弱辐射的功率,而回旋电子束的工作特性避免了这类情况。因此回旋电子器件极大推动了大功率毫米波及太赫兹波的进步与应用。回旋管器件发展过程中也逐渐出现几个分支:回旋振荡管、回旋返波管、回旋速调管、回旋行波管等。

线性注器件的高频场一般为 TM 模式来对电子注进行调制,然而回旋管中需要激励起 TE 模式的高频场,所以回旋管中主流的高频结构为圆波导,除此之外还有波纹波导、单共焦波导、双共焦波导及波纹波导等。波导的结构尺寸对器件的工作模式有较大影响,但是回旋器件的工作频率受到磁场的影响最大。因此在研究过程中大家意识到,通过增加磁场可以迅速提高器件的工作频率,在基频模式

情况下每 28 GHz 的频率大致需要 1 T 的磁场强度,回旋器件得到迅速发展。1965 年 Bott 在 5 T 的磁场中得到了 1 W 左右的 140 GHz 基波信号,并获得了 10 mW 的 280 GHz 的二次谐波输出信号;三年以后的 MIT 实验室中得到了 100 mW 量级的 414 GHz 和 2 μW 左右的 615 GHz 太赫兹信号。随着研究的深入,1974 年 Zaytsev 等人成功研制了 1.5 kW 连续波输出的 326 GHz 回旋管,该实验结果具有里程碑式的意义。经过不断地探索,当代回旋管的基本结构如图 25 所示,磁控注入电子枪产生的电子注穿过接近截止的开放式谐振腔以后产生高频信号,并经过一定的光路将高频信号转化为高斯波束进行输出来得到应用。^[63]

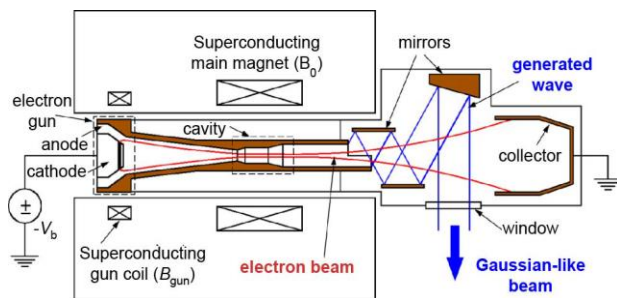


图 25 回旋管结构示意图
Fig. 25 The schematic diagram of Gyrotron structure

回旋管的发展过程中不断向高频率进行探索,然而提高工作频率最有效的办法为增加磁场强度。获得较高磁场的方法之一为使用脉冲工作的螺线圈来提供磁场。对于此研究方向,俄罗斯科研人员做了较多的探索,图 26(a)为 1983 年使用脉冲磁场获得了 60 kW 的 560 GHz 信号^[64]。随后,2008 年俄罗斯研究人员成功研制了 1 THz 的回旋管,如图 26(b),该器件在 40 T 的脉冲磁场中进行工作。当磁场为 38.5 T 时,输出 1.5 kW 的 1.022 THz 信号^[65]。2010 年又成功研制 50 T 脉冲磁场,图 26(c)是在 48.7 T 情况下产生 1.3 THz 的电磁辐射^[66]。

采用二次谐波的方式进行工作也是提高器件输出频率的重要途径之一。Spira - Hakkarainen 等

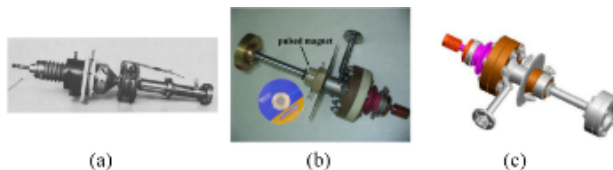


图 26 脉冲磁场回旋管
Fig. 26 Pulsed magnetic field Gyrotron

人通过调节磁场、工作电压等条件改变器件的谐振模式并最终在 301 GHz 至 503 GHz 范围内获得 14 种不同的输出模式,且输出功率在 1~22 kW^[67]。随后日本研究人员实现了 349 GHz 和 390 GHz 的单模相干辐射,功率分别为 50 kW 及 37 kW^[68]。图 27 为电子科技大学对 500 GHz 二次谐波回旋管的研究成果,可在 0.55 GHz 带宽范围内进行调谐,实现了连续频率调谐^[69]。



图 27 500 GHz 二次谐波回旋管

Fig. 27 500 GHz second harmonic Gyrotron

不同频段及工作特性的回旋管被不断研发出来离不开应用场景的需求。通过等离子体加热、等离子体检测以及动态核极化来提升核磁共振的信噪比等,对回旋管的性能均有不同的要求。对于大多数光谱学应用,需要连续波小功率回旋管,因此可调连续波回旋管也是一个很重要的分支。截至 2004 年,日本福井大学针对不同应用场景开发了一系列性能的回旋管,38 GHz 至 889 GHz 范围内频率可调,脉冲模式工作的器件输出功率从 0.1 kW 至千瓦量级,连续波模式工作的器件输出功率达几十瓦^[70]。如图 28(a)所示,随后该机构于 2009 年报道了用于材料和陶瓷烧结研究的 3.5 kW 的 300 GHz 回旋管系统^[71],并建立了对应的样品研究室。对于等离子体加热的回旋管性能基本要求为兆瓦级连续波输出。图 28(b)为 Ioannidis 等人近期报道的 1.6 MW 短脉冲的 140 GHz 回旋管,有望实现 1.5 MW 连续波输出的最终目标^[72]。

动态核极化是增强核磁共振波谱信号的重要手段,可以通过使用高频电磁辐射源来激发被测试对象中的电子自旋来实现。该系统对辐射源有很高的要求,连续波输出功率在十瓦至百瓦量级,功率稳定性要优于 1%,且输出信号频率稳定性在 MHz 量级^[63]。因此在能满足动态核极化需求的辐射源中,回旋管拥有无可匹敌的优势。美国麻省理工学院及日本福井大学针对此应用做了大量的研究工作。早在 1992 年, Becerra 等人开发了 20 W 输

出的 140 GHz 的回旋管,应用在了动态核极化的核磁共振系统中,得到了远远大于预期的增强信号^[73]。自此开始,基于动态核极化的回旋管研究受到了越来越多的关注,开发了各种频段的可以满足应用需求回旋管。图 28(c)为 2009 年,福井大学研究人员基于 20 T 磁场环境研制了以二次谐波进行输出的 1.08 THz 动态核极化回旋管。^[74]

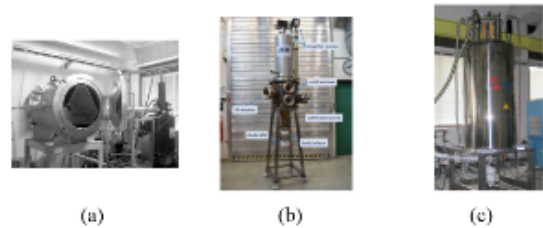


图 28 不同应用场景的回旋管系统

Fig. 28 Gyrotron system for different application scenarios

真空电子器件的发展道路之一就是高频结构进行创新,回旋管也不例外。逐渐出现了共焦波导结构、波纹波导结构等一系列具有特殊性质的结构。对于共焦波导结构,图 29(a)为近期电子科技大学研究人员使用单共焦波导结构实现的 205.66 GHz 至 208.97 GHz 连续频率调谐回旋管,且测得热腔激励起来的谐振模式与计算结果吻合较好,在基模状态下有望实现连续波输出^[75]。波纹波导结构主要用于回旋返波管、回旋行波管与回旋速调管的研究,由于波纹波导加工难度相对较大,所以现阶段的实验研究基本集中在 Ka 波段。图 29(b)中回旋返波管的实验研究实现了 Ka 波段 1 GHz 带宽平均功率 40 kW 的输出^[76]。而对于回旋行波管,我国已实现 20.3 kW 平均功率输出^[77],增益达到 52 dB,如图 29(c)所示。俄罗斯研究人员最近实现了 W 波段回旋行波管的连续波输出,如图 29(d)所示,使用两段式的高频结构使增益达到 54 dB,并测得了 2.5 GHz 的工作带宽,此研究为现阶段最高频段连续波回旋行波管,对于回旋管的发展具有里程碑意义^[78]。

5 其他小型化太赫兹辐射源

5.1 太赫兹磁控管

在传统结构的各类小型化器件不断发展过程中,出现了许多新结构甚至新原理的适合向太赫兹迈进的小型化真空电子器件。磁控管是如今唯一成功商业化的真空电子器件,由于该器件相比其他振荡器具有体积小、加工简单、磁系统简单且成本

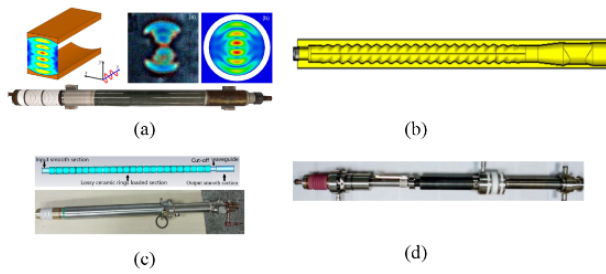


图 29 创新结构回旋振荡器及放大器
Fig. 29 Innovative structure Gyrotron and Gyrotron amplifier

较低等诸多优点,所以被应用在了微波炉中。由于水在特定的频点有较强的吸收峰,因此微波炉中的磁控管工作在了 2.45 GHz,用来对食物进行加热^[1]。在较低频段磁控管的优点成为了向太赫兹频段发展过程中的阻碍。磁控管的高频结构尺寸相对较小也导致太赫兹波段结构难以加工,但是该器件的磁系统相对其他器件简单很多,所以也吸引了很多研究人员。

对于 W 波段磁控管的研究均采用了空间谐波的方式进行工作,激励起 $2\pi-1$ 的高频模式。在 2016 年的研究中实现了 2 kW 的输出功率,总体尺寸为 $36*36*80$ mm^[49],如图 30(a)所示;随后在 2019 年的 UCMMT 会议上报道了一种成熟的 95 GHz 输出频点的产品,如图 30(b)所示,相同的工作模式下可以输出 200 ns 脉宽的 6.18 kW 信号,设备的整体效率在 7.25% 以上^[50]。除了以上报道外,早在 2013 年曾有研究人员对 THz 磁控管进行了较为系统的研究,图 31 为以空间谐波的方式进行工作,在 95 GHz、140 GHz、210 GHz 以及 225 GHz 频点均实现脉冲功率千瓦级输出^[51]。

5.2 太赫兹斜注管

真空电子器件向太赫兹发展过程中,各个结构的尺寸都会趋于微米量级,电子束的尺寸也会减小到微米量级,传统密度的电子束随着尺寸的减小,束流的大小也会急剧下降。因此为了满足其工作的需求,大束流密度的电子束是发展的必然趋势。

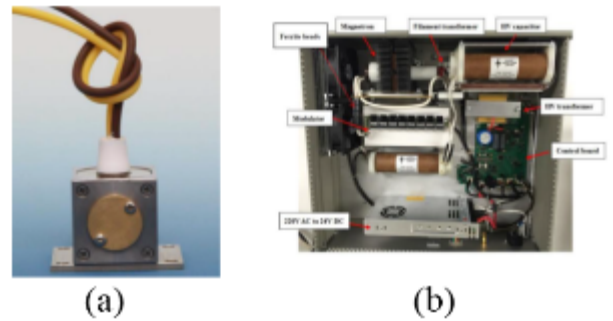


图 30 两种 W 波段空间谐波磁控管
Fig. 30 Two types of W-band spatial harmonic Magnetrons

电子束发射密度的大小与阴极材料有很大关系,短时间内无法突破材料限制的情况下,减小结构的起振电流也是方法之一。就传统基于光栅结构的线性注器件而言,减小电子注与光栅表面的距离可以显著减小器件的起振电流。基于以上思路,研究人员提出了电子注以斜入射方式进入相互作用区域的器件,称为斜注管。该器件的原理性示意图如图 32 所示^[52],结构类似于返波管,区别为电子注的入射方式,由于此器件的起振电流较低,所以相对返波管容易做到更高频率的输出。

对于此类器件,国内外的水平较为一致。图 33 为我国 0.26 THz 的斜注管^[52],在连续波的工作模式下可以提供 0.82 W 的功率输出,可以在 0.25~0.262 THz 范围内进行调谐。该器件的优异性能归功于新型的带状注电子枪,该阴极采用电子轰击的加热方式进行工作,比传统的灯丝加热方式更容易得到大的电子束流。图 34(a)和图 34(b)为国外研究机构对 3 mm 和 1 mm 的斜注管进行的研究,对于 1 mm 的斜注管,在 0.2585 THz 有 635 mW 输出^[53]。最近有研究人员对此结构进行了更高频率的尝试,如图 34(c)所示,器件可以在 320 GHz~380 GHz 进行电调谐,最大输出功率在 100 mW 以上^[54]。

5.3 太赫兹奥罗管

人们在辐射机制上的创新主要体现在奥罗管

Frequency, GHz	Peak output power, kW	Average output power, W	Pulse duration, μ s	Peak anode voltage, kV	Weight, kg
95	20	20	0.1	18	2.0
95	13	20	0.2	16.5	1.8
95	4	4	0.2	10	0.7
95	1	1	0.3	6.5	0.5
140	7	7	0.07	15	1.7
140	3	3	0.1	13	1.5
210	1.3	0.13	0.05	15	1.3
225	1.7	0.17	0.05	15	1.3

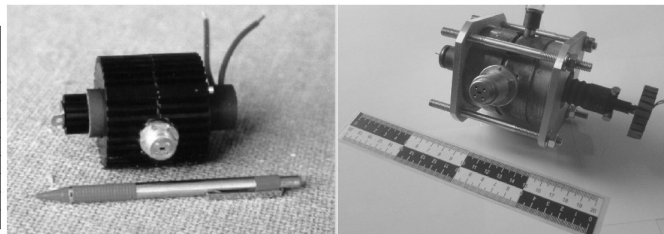


图 31 太赫兹空间谐波磁控管
Fig. 31 Spatial harmonic Magnetrons in terahertz band

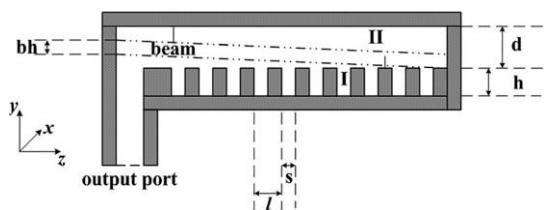


图 32 斜注管原理示意图

Fig. 32 The schematic diagram of Clinotron



图 33 0.26 THz斜注管加工及装配情况

Fig. 33 Processing and assembly of 0.26 THz Clinotron

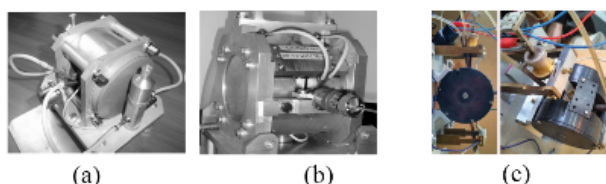


图 34 0.346 THz斜注管实验研究

Fig. 34 Experimental research of 0.346 THz Clinotron

上面。该器件主要分为两类,一种是以光栅表面波频率进行工作称为奥罗管,另一种是以表面波倍频的方式进行输出称为超辐射奥罗管。对于以表面波方式进行工作的器件研究相对较多,大致结构如图 35 所示^[55],电子注激励起来的表面波被束缚在光栅的表面,但是光栅与反射镜组成的谐振腔对表面波进行了收集并进行输出。最近的低电压奥罗管的研究报道指出,该器件在 95 GHz 可以进行 20 W 的连续波输出,总体重量小于 8 kg^[56]。

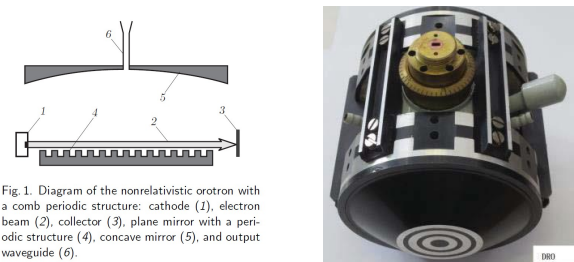


Fig. 1. Diagram of the nonrelativistic orotron with a comb periodic structure: cathode (1), electron beam (2), collector (3), plane mirror with a periodic structure (4), concave mirror (5), and output waveguide (6).

图 35 W 波段奥罗管及实物示意图

Fig. 35 W-band Orotron schematic and experimental diagram

当自由电子掠过光栅表面时,会有不同频率的波从不同角度辐射出来,频率与电子的速度、光栅周期以及谐波次数有关,此辐射称为 SP 辐射,为非相干辐射。当电子束被表面波调制以后,电流信号中会存在以表面波倍频的谐波信号,当谐波信号与 SP 辐射信号重叠时,就会形成相干辐射,以表面波倍频方式进行输出的超辐射奥罗管主要以此原理进行工作,原理示意图如图 36 及图 37 所示^[57]。由于 90°左右的辐射角度收集效率较高,此时对应的表面波工作在 π 模,且器件的谐振结构由反射镜组成,调节范围有限,所以此器件的带宽相对较窄。由于器件以谐波方式工作,使辐射强度相对较低。通过使用脉冲电子束来增大束流密度为提高输出功率的一个途径。但是传统光栅结构的特性导致起振时间较长,所以采用图 38 中结构来缩短起振时间,从而获得表中所示的器件性能,该器件均以脉冲方式进行工作^[57]。

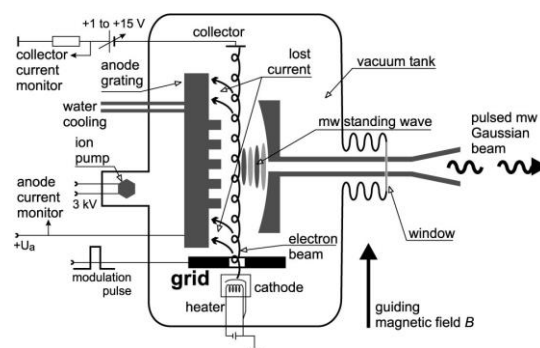


图 36 超辐射奥罗管结构示意图

Fig. 36 The schematic diagram of super-radiation Orotron structure

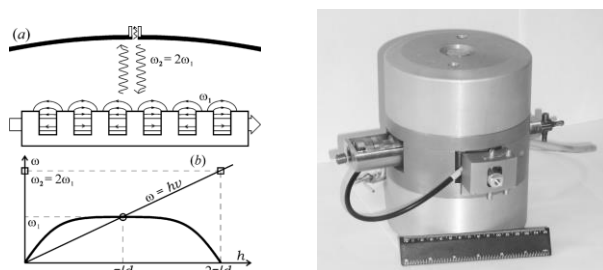
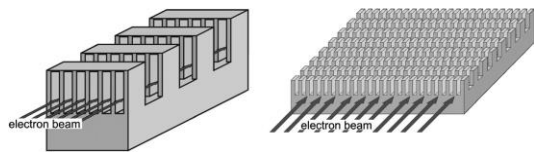


图 37 超辐射奥罗管原理示意图及装配示意图

Fig. 37 The schematic and assembly diagram of super-radiation Orotron

目前对于超辐射奥罗管的研究相对较少,除了以上的实验研究外,有研究利用非 90°附近的超辐射与三反射镜系统对谐波进行收集。如图 39 结构



PARAMETERS OF DEVELOPED OROTRONS

Structure period (μm)	170	140	120	100	90	82
Frequency (GHz)	90-190	90-300	140-300	260-370	220-355	170-400
Power (mW)	1000-100	500-100	500-50	70-30	50-100	50

图 38 超辐射奥罗管高频结构及实验结果示意图

Fig. 38 The schematic diagram of the interaction structure and experimental results of super-radiant Orotron

中为圆柱形光栅与半圆球形三反射镜系统,输出耦合结构开在反射镜的一端,并采用圆形空心电子注进行工作,仿真表明可以产生 0.4 W 的稳定输出^[58]。基于三反射镜结构的超辐射奥罗管,由于谐振系统对反射镜的加工及装配要求相对较高,最近有研究利用特异形光栅与 SP 相干的方式进行工作。如图 39 所示,并在光栅上方放置平面反射镜与其组成谐振系统来对谐波进行收集^[59],此结构在低电压电子注下可以产生瓦级输出。随着人们对大功率太赫兹辐射源需求的不断增加,超辐射奥罗管逐渐成为该问题一个较好的解决方案。

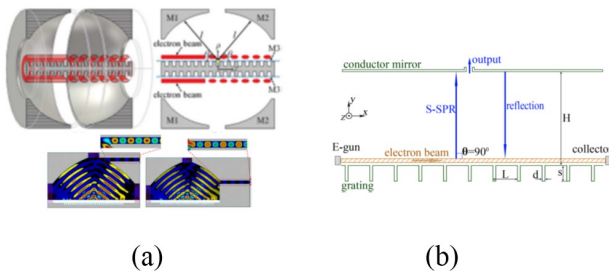


图 39 特异型超辐射奥罗管结构及仿真结果

Fig. 39 The structure and simulation results of special type super-radiant Orotron

6 总结与展望

主要总结了最近几年的小型化太赫兹真空电子器件的发展状况及趋势,主要包括返波管、行波管、扩展相互作用器件、回旋管及其他结构和原理的小型化器件。其中,返波管和斜注管由于其结构简单,对此器件的研究主要集中在高频段的探索中,

通过各种先进的跨学科加工手段对此器件的工作频率上限进行探索;行波管是现在应用领域最为广泛的器件,在雷达、电子战、空间通信等方面已经成功应用,随着民用领域通信要求的提高,太赫兹行波管逐渐成为该领域很有竞争力的信号源;在某些有大功率脉冲信号需求的场景,扩展相互作用器件以及太赫兹磁控管完全可以满足需求;回旋管主要用来满足某些大功率及高频率的需求,例如动态核极化、核聚变的等离子体加热;对于新机理及新结构的研究脚步从未停止,不断为更高频率的太赫兹器件的发展提供更多选择。

以上太赫兹器件的发展离不开基础学科的进步。材料学科是此领域发展进步的基石,阴极发射材料极大地影响着电流的发射密度,而太赫兹器件对发射密度参数有较高的要求;高频结构材料的电导率等参数对器件的高频损耗及相互作用特性也有极大影响;高频结构及电子枪聚焦的尺寸精度和表面粗糙度对器件的加工工艺有很高的要求,因此加工工艺也是迈向更高频段的重中之重,对于传统机械加工领域需要不断培养技术性人才,在不断的实践过程中积累对特殊结构的加工经验;除此之外也需要各个学科相互交叉融合,发展出来一套适合太赫兹频段器件加工的新方法和新工艺;由于太赫兹器件的各部分结构较小,所以各部分的严密配合相对更有难度,考验着装配的工艺,因此需要不断磨合装配工艺;测试和调试是制作辐射源的最后一步,太赫兹波段发展时间较短且有一定特殊性,导致检测及衡量手段相对其他频段电磁波有一定的局限,在此方面需要不断拓宽电子学检测手段的覆盖范围,并结合其本身光子学的特点,相互结合交叉来解决这一频段的检测问题。总之,需要不断发展基础学科及技术,将各领域进行交叉融合,在逐步的积累中解决每一环问题,最后填补真空电子器件在低太赫兹频段的空缺。

References

- [1] WANG Wenxiang. Microwave Engineering Technology [M]. National Defense Industry Press (王文祥. 微波工程技术 [M]. 国防工业出版社), 2014.
- [2] QI Na, ZHANG Zhuoyong, XIANG Yuhong. Research on the Application of Terahertz Technology in Medical Testing and Diagnosis [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis (齐娜, 张卓勇, 相玉红. 太赫兹技术在医学检测和诊断中的应用研究 [J]. 光谱学与光谱分析), 2013, 33(08): 2064-2070.
- [3] ZHU Min. Research on Efficient Analysis of Electromagnet-

- ic Scattering Characteristics of Mixed Targets and RCS Reduction[D]. Southwest University of Science and Technology (朱敏. 混合目标电磁散射特性高效分析及其 RCS 缩减研究. 西南科技大学), 2021.
- [4] LI Jueqi. Research on THz Backward Wave Oscillator[D]. University of Electronic Science and Technology of China (李珏岐. THz 返波管的研究. 电子科技大学), 2011.
- [5] Xi Hongzhu, Wang Jianguo, He Zhaochang, *et al.* Continuous-wave Y-band planar BWO with wide tunable bandwidth.[J]. *Scientific reports*, 2018, **8**(1).
- [6] Feng J, Tang Y, Gamzina D, *et al.* Fabrication of a 0.346-THz BWO for Plasma Diagnostics [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2018: 1-8.
- [7] Paoloni C, Carlo A D, Bouamrane F, *et al.* Design and Realization Aspects of 1-THz Cascade Backward Wave Amplifier Based on Double Corrugated Waveguide [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2013, **60** (3) : 1236-1243.
- [8] Chen Zaigao, Wang Jianguo, Wang Yue. Novel Low-voltage Subterahertz-range Radial Backward Wave Oscillator [J]. *Physics of Plasmas* 24.1 (2017) : 13109.
- [9] Ji Ru-Jing. The Design and Experiment of 3mm Traveling Wave Tube[D]. University of Electronic Science and Technology of China(姬如静. 3mm 行波管设计与测试. 电子科技大学), 2020.
- [10] Dayton J A, Kory C L, Mearini G T, *et al.* Fabrication and testing of the 0.650 THz helical BWO [C]. Vacuum Electronics Conference (IVEC) , 2012 IEEE Thirteenth International. IEEE, 2012.
- [11] Dayton J A, Kory C L, Mearini G T, *et al.* A 650 GHz helical BWO [C]. IEEE International Vacuum Electronics Conference. IEEE, 2008.
- [12] Kumar M, Aditya S, Wang S. A W-Band Backward-Wave Oscillator Based on Planar Helix Slow Wave Structure[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2018, PP (99):1-6.
- [13] Hu L , Cai J , Zhou Q , *et al.* Design and test of 220GHz folded-waveguide backward-wave oscillator [C]. 2016 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). IEEE, 2016.
- [14] Zhang M, Wei Y, Yue L, *et al.* A D-band backward-wave oscillator based on quasi-parallel-plate slow-wave structure [C]. 2015 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). IEEE, 2015.
- [15] Popovic B, Himes L, Gamzina D, *et al.* Design and fabrication of a sheet beam BWO at 346 GHz [C]. Vacuum Electronics Conference. IEEE, 2015..
- [16] Zhang J, Zhang T, Alfadhl Y, *et al.* Study on Wideband THz Backward Wave Oscillator Driven by Pseudospark-Sourced Sheet Electron Beam [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2020, PP(99):1-8.
- [17] Xiong X, Wei Y, Fei S, *et al.* Sine waveguide with a grating reflector for 1-THz backward wave oscillator [C]. Vacuum Electronics Conference. IEEE, 2012.
- [18] Yin P C, Yin H R, Xu J, *et al.* 220GHz Sine Waveguide BWO with large Beam Tunnel [C]. 2019 International Vacuum Electronics Conference (IVEC). 2019.
- [19] Wang S, Shao W, Wang W, *et al.* High Power Angular Radial Staggered Vane Backward Wave Oscillator at W-Band [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2020, PP(99) : 1-1.
- [20] Zhao C, Aditya S, Wang S. A Novel Coplanar Slow-Wave Structure for Millimeter-Wave BWO Applications [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2021, **68** (4) : 1924-1929.
- [21] Letizia R, Mineo M, Paoloni C. Photonic band gap corrugated slow wave structure for THz sheet-beam vacuum electron devices [C]. Vacuum Electronics Conference. IEEE, 2016.
- [22] Letizia R, Mineo M, Paoloni C. Photonic Crystal-Structures for THz Vacuum Electron Devices [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2014, **62**(1) : 178-183.
- [23] Pan P, Tang Y, Bian X, *et al.* A G-band Traveling Wave Tube with 20 W Continuous Wave Output Power [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2020, **41**(12) : 1-1.
- [24] Jiang Y , Lei W , Hu P , *et al.* Demonstration of a 220-GHz Continuous Wave Traveling Wave Tube [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2021, PP(99) : 1-5..
- [25] Jiang Y, Lei W, Hu P, *et al.* Demonstration of a 220-GHz Continuous Wave Traveling Wave Tube [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2021, PP(99) : 1-5.
- [26] Bian X, Pan P, Tang Y, *et al.* Demonstration of a Pulsed G-Band 50 W Traveling Wave Tube [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2020, PP(99) : 1-1.
- [27] W Liu, Z Zhang, W Liu, *et al.* Demonstration of a High-Power and Wide-Bandwidth G-Band Traveling Wave Tube With Cascade Amplification [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2021, PP(99) : 1-1.
- [28] Cook A M, Wright E L, Nguyen K T , *et al.* Demonstration of a W-Band Traveling-Wave Tube Power Amplifier With 10-GHz Bandwidth [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2021, PP(99) : 1-7.
- [29] Hu P, Lei W, Jiang Y, *et al.* Demonstration of a Watt-Level Traveling Wave Tube Amplifier Operating Above 0.3 THz [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2019, PP(99) : 1-1.
- [30] Gong H, Wang Q, Deng D, *et al.* Third-Harmonic Traveling-Wave Tube Multiplier-Amplifier [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2018: 1-6.
- [31] Cai J, Wu X, Feng J. Traveling-Wave Tube Harmonic Amplifier in Terahertz and Experimental Demonstration [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2015, **62** (2) : 648-651.
- [32] Xu D, Wang S, Wang Z, *et al.* Theory and Experiment of High-Gain Modified Angular Log-Periodic Folded Waveguide Slow Wave Structure [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2020, PP(99) : 1-1.
- [33] Fang S, Xu J, Yin H, *et al.* Experimental Verification of the Low Transmission Loss of a Flat-Roofed Sine Waveguide Slow-Wave Structure [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2019, **40**(5) : 808-811.
- [34] Lu Z, Ding K, Wen R, *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) : 1-1.
- [35] Kowalski E J, Shapiro M, Temkin R J. An Overmoded W-Band Coupled-Cavity TWT [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2015, **62**(5) : 1609-1616.

- [36] Prakash D J, Dwyer M Mr, Argudo M M, *et al.* Self-Winding Helices as Slow-Wave Structures for Sub-Millimeter Traveling-Wave Tubes[J]. *ACS Nano*, 2020, **15**(1).
- [37] Horoyski P, D Berry, Steer B. A 2 GHz Bandwidth, High Power W-Band Extended Interaction Klystron[C]. IEEE International Vacuum Electronics Conference. IEEE, 2007.
- [38] Hyttinen M, Roitman A, Horoyski P, *et al.* A compact, high power, sub-millimeter-wave Extended Interaction Klystron[C]. IEEE International Vacuum Electronics Conference. IEEE, 2008.
- [39] Roitman A, Horoyski P, Steer B, *et al.* High power CW 264 GHz tunable Extended Interaction Oscillator[C]. Vacuum Electronics Conference (IVEC), 2013 IEEE 14th International. IEEE, 2013.
- [40] Pasour J, Wright E, Nguyen K T, *et al.* Demonstration of a Multikilowatt, Solenoidally Focused Sheet Beam Amplifier at 94 GHz.[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2014.
- [41] Stephens J C, Rosenzweig G, Shapiro M A, *et al.* Sub-terahertz Photonic Crystal Klystron Amplifier[J]. *Physical Review Letters*, 2019, **123**(24).
- [42] Yong Y, He W, Liang Z, *et al.* Simulation and Experiments of a W-Band Extended Interaction Oscillator Based on a Pseudospark-Sourced Electron Beam [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2015, **63**(1):512-516.
- [43] Shu G X, Yin H, Zhang L, *et al.* Demonstration of a Planar W-Band, kW-Level Extended Interaction Oscillator Based on a Pseudospark-Sourced Sheet Electron Beam [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2018, **39**(3):432-435.
- [44] Qu Z, Zhang Z, Ding Y, *et al.* Design and test of a W-band 100-watts extended interaction oscillator[C]. 2018 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). IEEE, 2018.
- [45] Wang J, Li X, Rui L, *et al.* Experimental Study of a 6 kW W-band PCM Focused Sheet Beam EIO[C]. 2019 International Vacuum Electronics Conference (IVEC). IEEE, 2019.
- [46] Liu W, Zhang Z, Chao Z, *et al.* Test of terahertz Extended Interaction oscillator[C]. Vacuum Electronics Conference. IEEE, 2015.
- [47] Zhang P, Ying Y, Wang X, *et al.* Third-Harmonic Operating Extended Interaction Oscillator [C]. 2019 International Vacuum Electronics Conference (IVEC). 2019.
- [48] Li R, Li S, Ruan C, *et al.* Design and Fabrication of G-band Extended Interaction Klystron with Unequal-length Slots[C]. 2019 International Vacuum Electronics Conference (IVEC). 2019.
- [49] Li S, Li F, Yang J, *et al.* Development of a Miniaturized W-Band Spatial Harmonic Magnetron[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2016, **63**(7):1-5.
- [50] Zhang T, Zhang J, Lang J, *et al.* Experimental Testing of a W-band spatial harmonic magnetron [C]. 2019 12th UK-Europe-China Workshop on Millimeter Waves and Terahertz Technologies (UCMMT). IEEE, 2020.
- [51] Avtomonov N I, Naumenko V D, Vavriv D M. Development of terahertz spatial-harmonic magnetrons[C]. Microwave Conference (EuMC), 2013 European. IEEE, 2013.
- [52] Xi H Z, He Z C, Wang J G, *et al.* A continuous-wave clinotron at 0.26 THz with sheet electron beam[J]. *Physics of Plasmas*, 2017, **24**(3).
- [53] Mil'Cho M V, Lopatin I V, Zavertanny V V, *et al.* CW clinotrons for the short-wave part of the millimeter waveband[C]. IEEE International Vacuum Electronics Conference. IEEE, 2014.
- [54] Danik A A, Likhachev A A, Ponomarenko S S, *et al.* Compact THz Continuous-Wave Clinotron Oscillators[C]. 2019 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). 2019.
- [55] Bratman V L, Fedotov A E, Makhlov P B. Experimental demonstration of Smith - Purcell radiation enhancement by frequency multiplication in open cavity [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, **98**(6):1069.
- [56] Liu L, Xi H, Zhang J, *et al.* The recent progress of THz radiation sources in An Hui Huadong photoelectric technology institute[C]. Millimetre Waves & Terahertz Technologies. IEEE, 2016.
- [57] Grishin Y A, Fuchs M R, Schnegg A, *et al.* Pulsed Orottron - A new microwave source for submillimeter pulse high-field electron paramagnetic resonance spectroscopy [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2004, **75**(9):2926-2936.
- [58] Zhou Y, Zhang Y, Liu S. Electron-Beam-Driven Enhanced Terahertz Coherent Smith-Purcell Radiation Within a Cylindrical Quasi-Optical Cavity[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2016:262-267.
- [59] Liu W, Lu Y, Lin W, *et al.* A multimode terahertz-Orottron with the special Smith - Purcell radiation[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, **108**(18):97-105.
- [60] Twiss R Q, Roberts J A. Electromagnetic radiation from electrons rotating in an ionized medium under the action of a uniform magnetic field[J]. *Australian Journal of Physics*, 1958, **11**(1):424-432
- [61] Twiss R Q. Radiation transfer and the possibility of negative absorption in radio astronomy[J]. *Australian Journal of Physics*, 1958, **11**(1):567-579
- [62] Schneider J. Stimulated emission of radiation by relativistic electrons in a magnetic field[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1959, **2**(12):504-508
- [63] Booske J H, Kory C L, Joye C D, *et al.* Vacuum Electronic High Power Terahertz Sources[J]. *IEEE transactions on terahertz science and technology*, 2011, **1**(1):54-75.
- [64] Flyagin V A, Luchinin A G, Nusinovich G S. Submillimeter-wave gyrotrons: Theory and experiment [J]. *International Journal of Infrared&Millimeter Waves*, 1983, **4**(4):629-637.
- [65] Glyavin M Y, Luchinin A G, Golubiatnikov G Y. Generation of 1.5-kW, 1-THz Coherent Radiation from a Gyrotron with a Pulsed Magnetic Field[J]. *Physical Review Letters*, 2008, **100**(1):015101.
- [66] Luchinin A G, Rodin Y V, Novgorod N. Generation of 5 kW/1 THz coherent radiation from pulsed magnetic field gyrotron[C]. International Conference on Infrared. IEEE, 2010.
- [67] Spira-Hakkarainen S, Kreischer K E, Temkin R J. Sub-millimeter-wave harmonic gyrotron experiment [J]. *IEEE*

- Transactions on Plasma Science*, 2002, **18**(3):334-342.
- [68] Notake T, Saito T, Tatematsu Y, *et al.* Development of a Novel High Power Sub-THz Second Harmonic Gyrotron [J]. *Physical Review Letters*, 2009, **103**(22):225002.
- [69] Song T., *et al.* Experimental Investigations on a 500GHz Continuously Frequency-Tunable Gyrotron[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2021, **42**(8): 1232-1235.
- [70] Idehara T, Mitsudo S, Ogawa I. Development of High-Frequency, Highly Stable Gyrotrons as Millimeter to Submillimeter Wave Radiation Sources[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2004, **32**(3):910-916.
- [71] Sako K, Kobayashi Y, Hashimoto S, *et al.* Development of a material heating system by using a 300 GHz gyrotron FU CW I [C]. *Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2009. IRMMW-THz 2009. 34th International Conference on. IEEE, 2009.
- [72] Ioannidis Z C, Avramidis K A, Rzesnicki T, *et al.*, Generation of 1.5 MW - 140 GHz Pulses With the Modular Pre-Prototype Gyrotron for W7-X [J]. *IEEE Electron Device Letters*, vol. **42**, no. 6, pp. 939-942, June 2021, doi: 10.1109/LED.2021.3073221.
- [73] Becerra L R, Gerfen G J, Temkin R J, *et al.* Dynamic nuclear polarization with a cyclotron resonance maser at 5 T [J]. *Physical Review Letters*, 1993, **71**(21):3561-3564.
- [74] Idehara T, Ogawa I, Mori H, *et al.* A THz Gyrotron FU CW III with a 20T superconducting magnet [C]. *International Conference on Infrared*. IEEE, 2009.
- [75] Fu W, Guan X, Yan Y. Generating High-Power Continuous-Frequency Tunable Sub-Terahertz Radiation From a Quasi-Optical Gyrotron With Confocal Waveguide [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2020, **41**(4):613-616.
- [76] Rozentel R M, Samsonov S V, Bogdashov A A, *et al.* High-Power Tunable Source of Chaotic Radiation Based on a Ka-Band Helical Gyro-BWO [J]. *IEEE Electron Device Letters*, vol. **42**, no. 9, pp. 1394-1397, Sept. 2021, doi: 10.1109/LED.2021.3100605.
- [77] Xu Y, Li H, Mao Y, *et al.* Proof-of-principle Experiment of a 20-kW-Average-Power Ka-band Gyro-Traveling Wave Tube with a Cut-off Waveguide section [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2020, (99):1-1.
- [78] Samsonov S V, Denisov G G, Gachev I G, *et al.* CW Operation of a W-band High-Gain Helical-Waveguide Gyrotron Traveling-Wave Tube [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2020, PP(99):1-1.
- [79] Zeng Z, Zhou L, Li W, *et al.* Design and optimization of a W-band extended interaction klystron amplifier [C]. 2015 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC), 2015, 1-2, doi: 10.1109/IVEC.2015.7224048.
- [80] Qu Z, Zhang Z, Ding Y, *et al.* Design and test of a W-band 100-watts extended interaction oscillator [C]. 2018 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC), 2018, 419-420, doi: 10.1109/IVEC.2018.8391529.
- [81] Wei Y, Li D, Zhou J, *et al.* A High Power W-band Extended Interaction Klystron [C]. 2019 International Vacuum Electronics Conference (IVEC). 2019.