

太赫兹返波振荡器的应用及研究进展

胡林林, 蔡金赤, 陈洪斌

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川绵阳 621900)

摘要: 太赫兹返波振荡器是一种功率高、宽带可调谐、可在常温下连续波工作的辐射源。本文介绍了太赫兹返波振荡器在太赫兹技术研究中的应用需求及其发展现状, 说明返波振荡器在太赫兹技术研究中的重要作用和前景, 并对太赫兹返波振荡器的最新动态、技术难点进行了分析, 可供该种管型研究的参考。

关键词: 返波振荡器; 太赫兹

中图分类号: TN24 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2016)04-0974-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.04.031

Applications and Development of Terahertz Backward Wave Oscillators

HU Lin-lin, CAI Jin-chi, CHEN Hong-bin

(Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract: The terahertz backward wave oscillator (THz-BWO) is a THz radiation source with the virtue of high power, tunable broad bandwidth and continuous wave operating at normal temperature. The applications of terahertz backward wave oscillator and its development in THz technology were presented in this paper. It shows that the THz-BWO plays important roles and has bright future in THz research. The state of the art and difficulties of THz-BWO were summarized. It could be a reference for THz-BWO study.

Key words: backward wave oscillator; terahertz

1 引言

太赫兹 (Terahertz, THz) 波具有宽瞬时带宽、高信噪比、低辐射能量等独特性质。太赫兹波对非极性物质有很强穿透性, 许多大分子的振动和转动频率均落于此波段。因此, 太赫兹波可应用于雷达、通信、探测成像、光谱分析、医学诊断等领域。太赫兹技术已成为对国防建设、国民经济和科技发展有重要影响的前沿学科, 世界上主要发达国家对太赫兹技术的研究给予了高度重视^[1-3]。

随着太赫兹技术应用的迅速发展, 太赫兹信号源已成为技术发展的关键因素。在太赫兹探测成像、透射波谱分析、太赫兹波与物质的非线性作用现象研究、以及太赫兹雷达系统研制等方面都需要大功率、宽带可调谐、常温工作、结构紧凑、造价低廉的太赫兹信号源。返波振荡器 (Backward Wave Oscillator, BWO) 作为经典的电真空器件, 具有较高的功率水平、极佳的单色特性和极化性能^[3], 通过改变工作电压可实现频率的连续调谐, 相对带

宽能达到 30% 以上。BWO 为全金属结构, 结构紧凑, 热力学性能良好, 可在常温下以连续波状态工作。通过结合 LIGA、DRIE、MEMS 等微加工工艺, BWO 工作频率能延伸到 1.0 THz 以上, 采用倍频技术频率能达到 2.0 THz 以上。因此, 开展对 THz-BWO 的研究与应用具有重要的科学意义。本文将对 THz-BWO 目前的应用需求和研究状况进行介绍, 并对其发展过程中的难点进行分析, 期望能够为未来研究工作提供参考和帮助。

2 返波振荡器在太赫兹技术中的应用

2.1 基于 THz-BWO 的连续波成像系统

太赫兹波光子能量低, 与 X 射线相比不会造成电离损伤, 并且可以穿透大多数非极性的电介质, 因此可以通过太赫兹成像来进行无损探测、安全检查、质量检测等。太赫兹成像技术还具有较高的图像分辨率和景深, 在许多研究领域显示出无与伦比的实用价值。

鉴于 THz-BWO 可连续波工作、功率大, 而且成本较低, 国内外许多研究机构都建立起基于 THz-BWO 的连

续波成像系统. 太赫兹连续波成像系统不需要采用泵浦探测, 因此系统的复杂度和成本相比脉冲成像系统大大降低. 同时, 由于不需要像脉冲系统那样获得光谱数据, 因此成像速度更快.

早在 2004 年, 日本物理化学研究所、太赫兹遥感与成像实验室和名古屋大学就已经建立了基于 THz-BWO 的成像系统^[4]. 该系统调频范围 0.52 ~ 0.71THz, 信噪比可达到 10000:1, 具有良好的波前特性和稳定的功率输出, 最高输出功率 15mW. 日本利用这套基于 THz-BWO 的成像系统进行了多种成像实验, 检测了非透明材料制成的包裹、信封和其他包装物中的物体, 以此演示了太赫兹波具有对非透明材料的透射成像能力. 在此基础上, 开展了许多太赫兹成像的应用研究, 如对材料的无损探测、水吸收参数的检测、生物样本的成像以及对器官组织的成像.

2.2 物质的光谱分析与电参数测量

由于 THz-BWO 的频率连续可调, 因此基于 THz-BWO 成像系统能够获得物体的光谱信息, 能进行材料的时域光谱分析, 特性分析及参数测量.

早在上世纪 90 年代起, 俄罗斯科学院开始研究基于 THz-BWO 的光谱测量方法和实验系统. 利用基于 BWO 的光谱分析方法, 可以获得材料的入射/反射系数和介电参数(介电常数、吸收率、电导率等), 从而分析出材料的物理特性^[5~8]. 俄罗斯科学院开展了大量的材料分析实验, 研究了单晶材料、陶瓷、玻璃、粉末、液体、薄膜、纤维等多种材料在太赫兹频段的电学特性以及物质宽频介电特性. 实验的成像系统采用了一系列频段相衔接的 THz-BWO, 覆盖频率 0.1 ~ 1.0THz、频率分辨率 10^{-5} 、动态范围(信噪比) $10^{-4} \sim 10^{-6}$ 、极化率达到 99.99%.

2.3 射电天文观测和遥感中的应用

THz-BWO 可作为低噪声外差接收机的本振源, 应用于低背景的射电天文观测, 彗星、地球及其他行星大气层的遥感. 德国研制的第一代用于红外天文学研究的平流层观测天文台 SOFIA (the Stratospheric Observatory For Infrared Astronomy) 即装备了太赫兹波段外差式接收机 GREAT, 采用的是俄罗斯 ISTOK 公司 OB80 型 BWO (频率 0.62 ~ 0.65THz) 和倍频器作为本振信号源, 可覆盖频率 1.6 ~ 1.9THz、2.4 ~ 2.7THz 及 4.7THz^[9]. 如在低频段, 通过该 BWO 产生 633GHz 的信号, 再经过三倍频器, 产生 1.9THz 的本振信号, 发送信号功率 2.5 μ W. 该外差式接收机初步的实验测试结果表明其性能指标已满足德国联邦航空局的安全标准和航空认证要求.

2.4 其他方面的应用需求

(1) 作为太赫兹放大器的前级驱动源

在对太赫兹电真空器件, 如回旋行波管放大器、折

叠波导行波管、扩展互作用速调管放大器的研究中, 为获得更大的功率, 前级驱动源要求具有足够高的功率水平, 并且能有足够的带宽且频率可调. THz-BWO 是比较理想的太赫兹波段放大器前级驱动源. 从 2009 年至今, 中国工程物理研究院应用电子学研究所一直在进行对太赫兹电真空器件的研制^[10,11]. 在对 0.14THz 回旋行波管、0.14THz/0.22THz 折叠波导行波管等实验中采用了 THz-BWO 源作为驱动前级.

(2) 作为太赫兹波段元件检测与参数标定的标准信号源

由于 THz-BWO 能覆盖频率 0.1THz ~ 1.0THz, 通过扩频能到更高的太赫频段, 且功率高, 可调频, 单频性能好. 因此, THz-BWO 能为太赫兹波段元件, 如衰减器、检波器、隔离器、波导等的检测和标定提供标准信号源^[12].

此外, THz-BWO 还能用于太赫兹雷达通信的演示实验. 随着太赫兹波的独特性质在物理、化学、生物、医学等基础领域的深入研究, 以及在宽带通信、探测成像、材料表征、医疗诊断、环境监测等应用方面的技术成熟, 由此带动的交叉研究将会有力的推动和促进相关研究的进一步发展, THz-BWO 将会有更大的科学价值和更广阔的应用前景^[13].

3 THz-BWO 的研究进展

3.1 国外对 THz-BWO 的研究

随着频率进入太赫兹频段, BWO 慢波系统尺寸急剧缩小, 器件特征结构尺寸在亚毫米甚至微米量级, THz-BWO 必须采用新型的慢波结构. 同时, THz-BWO 慢波结构越来越精密, 已经达到了微机械加工的极限, 因此 THz-BWO 的研制必须结合先进的微加工工艺, 如 MEMS 技术、LIGA 技术、DEM 等工艺技术, 引入固态加工技术. 而由于器件结构小, 焊接封装工艺、阴极材料性能、磁场材料及装配、散热性能等都制约管有巨大影响. 因此, 目前世界上只有少数国家能完成 THz-BWO 的制管工作.

3.1.1 俄罗斯

早在上世纪 90 年代, 俄罗斯已经报道有 THz-BWO 产品销售^[14]. 俄罗斯 ISTOK 公司 60 年来一直在进行电真空器件及固态器件的研制工作. 目前, ISTOK 公司研制的 OB 系列可调谐 BWO 产品, 能覆盖频率 36GHz ~ 1.4THz, 部分型号参数如表 1 所示^[15,16]. OB 系列 BWO 作为产品已经出售到美国、加拿大、德国、法国、日本等国家, 用在各种设备上^[9]. 如图 1 所示为 OB-83 型号 BWO, 工作于 0.9THz ~ 1.1THz, 重量小于 250g. 近年来, ISTOK 正在研究如何降低功率损耗, 计划从 270W 降低至 40W, 直到能用风冷冷却; 同时增加输出功率, 减小磁系统体积, 扩展频率到 2THz ~ 3THz.

表 1 ISTOK 公司部分 THz-BWO 参数(永磁聚焦)

Type	f/GHz	Power/mW	U/V	Beam/mA	Diameter/mm	Length/mm	Mass/kg
OB-69	36-55	15-40	400-1200	20-25	76	64	1
OB-70	52-79	12-30	400-1200	20-25	76	64	1
OB-71	78-119	6-30	500-1500	20-25	76	64	1
OB-86	118-178	6-20	500-1500	20-25	76	64	1
OB-24	177-260	6-15	700-1900	15-22	82	84	1



图1 ISTOK公司OB-83型号THz-BWO

3.1.2 美国

美国 Microtech Instruments 公司拥有同 ISTOK 公司相同的太赫兹系列返波管产品,即 QS 系列 THz-BWO, 每种频段的 BWO 应用倍频技术,形成可覆盖频率从 0.1THz~2.2THz 的信号源^[17]. 图2为 QS1-180 型 BWO 的照片,图3为 QS 系列 THz-BWO 的内部结构示意图,显示慢波结构为一维光栅结构.

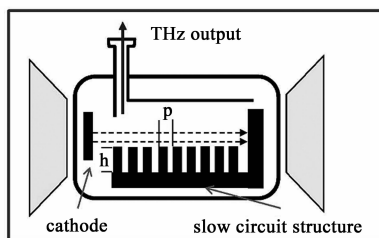


图2 QS系列BWO内部结构示意图



图3 QS1-180型BWO

从本世纪初开始,美国 Calabazas Creek Research (CCR) 公司在 NASA 的支持下进行高效率、轻型的 0.3THz~1.5THz-BWO 的研究^[18-20],这些 BWO 将用作外差接收机的本振源. 2003 年, Lawrence Ives 报道了 CCR 公司对 THz-BWO 的研究情况,介绍了 0.6THz~0.7THz-BWO 的电子枪、慢波结构、输出耦合器以及输

出窗等各部分的设计情况. 电子束为带状电子束,电流密度约 $125\text{A}/\text{cm}^2$,工作电压 $3\text{kV}\sim 6\text{kV}$,电流 $15\text{mA}\sim 40\text{mA}$. 慢波结构为二维金属柱阵列结构,如图4所示,它由五排垂直的矩形金属柱组成,每个金属柱横截面 $20\mu\text{m}\times 20\mu\text{m}$,高 $80\mu\text{m}$,每排相邻金属柱之间的距离为 $30\mu\text{m}$,排间隙 $34\mu\text{m}$,每排由 300 个金属柱组成. 电子紧贴金属柱阵列运动,由此得到更有效的相互作用. 计算得到的功率为 $6\text{mW}\sim 8\text{mW}$,带宽 100GHz. 慢波的制造采用的是 LIGA 工艺.

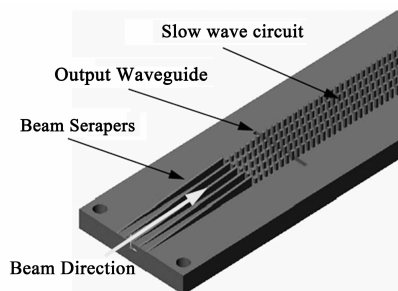


图4 CCR平面阵列金属柱慢波结构及600GHz~700GHz BWO样管

2004 年 11 月 CCR 公司研制出了 0.6THz~0.7THz-BWO 样管,并在 NASA JPL 实验室进行了测试^[19],但遗憾的是测试没有检测到太赫兹信号,通过对 BWO 解剖判断电子束产生了畸变,没有沿慢波电路方向. 随后,2007 年 CCR 公司对该 BWO 进行了改进和测试,样管得到了近 50% 的束流传输率,但太赫兹信号的测试结果依然没有报道^[20]. 到目前为止,作者尚未查询到 CCR 公司关于该 BWO 的后续报道.

3.1.3 韩国

除俄罗斯和美国外,其他国家如韩国、意大利和英国也在积极研究 THz-BWO,提出了一些新的慢波结构,做了很多理论与粒子模拟方面以及加工工艺方面的研究.

韩国学者 Young-Min Shin 对太赫兹微电真空器件理论设计和微加工工艺进行了长期的研究. 早在 2006 年, Young-Min Shin 采用两步 X-LIGA 工艺对两种 0.1THz-BWO 的慢波电路进行了加工和测试^[21]. 两步 X-LIGA 加工得到耦合腔结构本征频率与计算相差 1.1%, 折叠波导结构与计算相差 1.4%, 尺寸公差在 $2\mu\text{m}$ 以下, 测量得到表面粗糙度为 $20\text{nm} \sim 70\text{nm}$. 2010 年, 韩国首尔国立大学报道了对 0.1THz 耦合腔返波管的研制情况, 其制管工艺即采用了两步 X-LIGA^[22]. 图 5 为加工出的慢波线和整管照片, 经显微镜测量 X-LIGA 加工最大误差小于 $5\mu\text{m}$. 整管的 S_{11} 参数经过矢网冷测, 结果与计算相比较显示在 0.1THz 附近平均偏差为 2dB. 管子采用收敛型电子枪, 电压 12kV, 电流 50mA, 采用 PPM 聚焦, 降压收集极回收效率 75%. PIC 模拟计算得到的输出功率为 15W, 但文献[22]中没有报道实验结果.

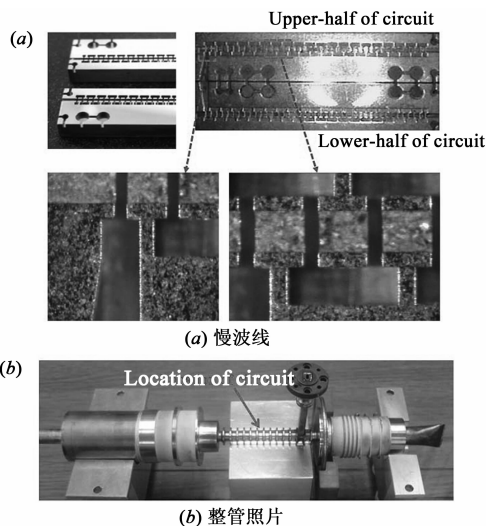


图5 韩国0.1THz耦合腔返波管慢波线和整管照片图

2008 年, Young-Min Shin 及其合作者提出了一种交错双栅慢波结构^[23,24], 其结构如图 6 所示, 交错双栅为两个一维梳状结构, 上下相对, 交错半个周期的封闭金属结构. Young-Min Shin 认为该结构具有良好的传输特性, 较宽的带宽和较大的增益, 其效率比一般太赫兹器件高, 非常适用于研制太赫兹宽带放大器或振荡器. Young-Min Shin 研究了用 UV-LIGA 和 DRIE 工艺来加工该结构^[25], 研究表明: 加工出的慢波结构的传输系数与模拟计算值相差小于 1dB, 工作模式的色散曲线偏差在 2% 以内. 扫描电子显微镜和原子显微镜对加工的样品分析显示, 两种微电加工工艺方法的尺寸公差为 $\pm 3\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$, 表面粗糙度 $\sim 30\text{nm}$.

3.1.4 意大利和英国

在过去十多年的时间里, 欧盟为研制太赫兹源启动了多个项目, 其中 FP7 European Community Project

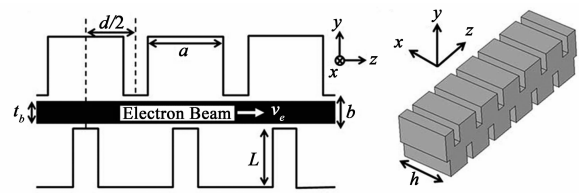


图6 Young-Min Shin提出的交错双栅慢波结构

“Optically Driven Terahertz Amplifiers (OPTHER)” 项目目标在于研制太赫兹领域特定应用的元件, 即基于行波管机理的小型化太赫兹放大器的设计与集成^[26,27], 选择的技术路线为返波放大器. 在 OPTHER 支持下, 意大利 Roma Tor Vergata 大学电子工程学院 Claudio Paoloni、Mauro Mineo 及英国 Lancaster 大学 Rosa Letizia 等人开展了对太赫兹真空器件, 如返波振荡器、返波放大器、行波管等的研究.

2010 年, 在 THz-BWO 和 THz-TWT 方面, Mauro Mineo 和 Claudio Paoloni 提出了矩形波纹-矩形波导 (Corrugated Rectangular Waveguide) 慢波结构^[28], 如图 7 所示, 即矩形波导内部的一宽边为光栅结构. 这种结构具有较高的耦合阻抗能补偿在太赫兹频率下的高损耗, 并且输能耦合部分不需要结构转换, 直接以波导方式输出. 这种结构适合 DRIE、LIGA 或 UV-LIGA 微加工工艺. 对采用此慢波结构的 0.9THz \sim 1.1THz-BWO 模拟计算表明: 在电压从 8kV 增加到 16kV 时, 频率从 0.9THz 增加到 1.1THz, 功率从 100mW 增大至 420mW, 互作用效率达到最大 0.3%.

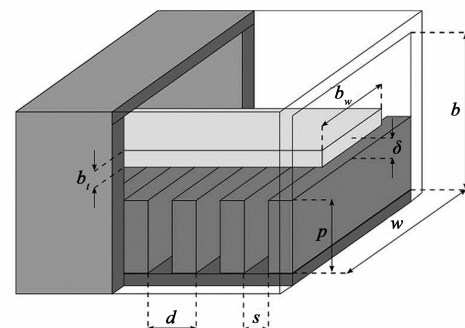


图7 Mauro Mineo和Claudio Paoloni提出的单矩形波纹-矩形波导慢波结构

虽然波纹波导中的场分布适用于带状电子束, 但是带状电子束毕竟不如圆形电子束成熟. 然而, 圆形电子束又由于局限在纵向电场分量分布的小区域范围内, 束波相互作用效率不高. 因此, Mauro Mineo 和 Claudio Paoloni 提出了另一种慢波结构, 即双矩形波纹-矩形波导慢波结构^[29,30], 其结构如图 8 所示, 即在矩形波导内部的一宽边面上中间沿纵向周期排列两列矩形块, 在这两排矩形块之间为电子束通道. 这种慢波结构的明显优点在于能利用现有的成熟的 Pierce 电子枪产生圆形电子束, 结构的微加工也比较容易. 两排矩形块之间

的纵向电场分量呈准圆形的横向分布,保证了电子束与太赫兹波之间的强相互作用.他们在 0.65THz-BWO 和 1.0THz-BWO 的设计中采用了这种慢波结构.

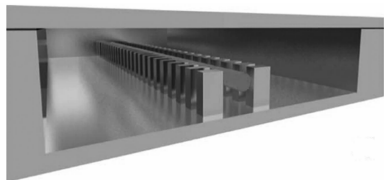


图8 Mauro Mineo和Claudio Paoloni提出的双矩形波纹-矩形波导慢波结构

从公开发表的文献上看,尽管 Claudio Paoloni 和 Mauro Mineo 等人在 THz-BWO 研究上提出了一些新的慢波结构,并做了很多粒子模拟的工作,但对器件的研究也仅限于束波相互作用部分,并没有考虑实际结构的损耗、输能结构的损耗、电子束质量影响等问题.至今为止,尚没有关于实验结果方面的报道.

3.2 国内对 THz-BWO 的研究

自 2005 年后,国家对太赫兹技术研究给予了大力的支持,国内的一些高校和科研院所相继开展了太赫兹源方面的研究.在太赫兹电真空器件的研究方面,电子科技大学、北京真空电子技术研究所、中科院电子所、中国工程物理研究院应用电子学研究所等单位对太赫兹电真空器件,如太赫兹扩展相互作用器件、太赫兹折叠波导器件、THz-BWO 以及制管工艺等方面开展了研究^[31-34],目前尚未有研制成功 THz-BWO 的报道.

电子科技大学对矩形波导栅型慢波结构、交错双栅结构等慢波电路进行了理论研究,并开展了 PIC 仿真设计.例如,2008 年路志刚的博士论文中对矩形波导栅型慢波结构做了大量的理论工作并进行了初步实验研究,提出了多种有利于提高性能的变形结构^[35];2010 年,殷勇在论文中对齿状光栅结构的慢波电路进行了研究^[36],并设计了一种工作频率 360GHz 的 BWO.通过对相互作用电路的耦合阻抗的分析认为,齿状光栅结构可以减小辐射源对阴极发射电流密度的要求.在工作电压为 19.5kV,电流 75mA 时,PIC 模拟得到 8W 的平均功率,考虑器件在脉冲状态工作,该 BWO 可以得到 4mW 的平均功率输出;2012 年,赖剑强博士论文中对交错双栅结构进行了研究^[37],并设计了交错双栅慢波结构的 W 波段和 140GHz 频段带状电子注 BWO.但是,上述的研究目前都尚未见实验成功的报道.

由此可见,国内的太赫兹技术研究的开展仍然受到缺乏大功率、宽带可调谐、结构紧凑、常温工作、造价低的太赫兹辐射源的困扰.许多科研单位不得不进口 THz-BWO 源以及元器件产品,然而这些产品价格昂贵,维护和检修费用高且极不方便.因此,自主研发以 THz-BWO 为代表的太赫兹辐射源是我国太赫兹研究领域的

紧要任务.

4 THz-BWO 的研究新动态与应用新动向

从前面分析看来,除了俄罗斯 ISTOK 公司和美国 Microtech 公司拥有成熟的 THz-BWO 产品外,还没有其他国家有研制成功 THz-BWO 的报道,也未见有实验结果.然而,最近几年不少研究机构提出了新的 THz-BWO 慢波结构,并开辟了 THz-BWO 新的应用领域,为 THz-BWO 的研究提供了新的思路.关于这方面的研究进展,在最近几年国际真空电子学会议(International Vacuum Electronics Conference, IVEC)上都有报道.

2014 年 IVEC 会议上,韩国三星高等技术研究所和美国 CCR 公司 Chan-Wook Baik 等人提出了一种增强束波相互作用效率,提高辐射功率的多通道 BWO 结构^[38].如图 9 所示,这种结构是在返波管谐振腔慢波结构电路基础上,在电子束通道上方和下方各增加了一条通道,Chan-Wook Baik 认为这两个辅助通道具有增强波传输效率、相互作用阻抗和真空电导率的作用.这种电路的制作工艺也比较容易,即在硅基片上采用 DRIE 进行多层微加工. PIC 计算表明在电压 12kV ~ 15kV、电流 50mA ~ 70mA 时,输出功率约 9W、频率在 0.096THz ~ 0.105THz,与无多通道结构相比,功率提高了 1.6 倍.

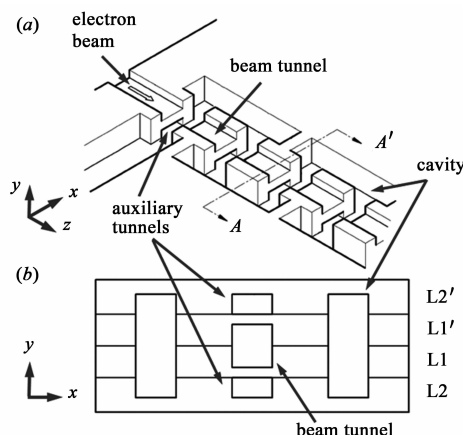


图9 多层多通道BWO慢波结构电路
(a) x-z平面透视图 (b) A-A横截面图

2013 年 IVEC 和 2014 年 IVEC 会议上,英国 Lancaster 大学的 Rosa Letizia 提出由光子晶体替代矩形波纹-矩形波导结构的波导壁的慢波结构^[39,40].Rosa Letizia 认为波导结构的优点在于输能结构与波导具有相同的尺寸,不需要另作结构转换,但是由于波导结构封闭且尺寸小,不利于管子排气,较难获得较高的真空度.光子晶体的禁带特点可作为一种有效而灵活的频率选择技术.用二维光子晶体结构替代波导侧壁,使波导由封闭结构变成自然开敞结构,但又不会影响波导中波的传输,因而扩大了波导的空间,利于管子的排气和装配.光子晶体结构如图 10 所示,它由正方形金属铜柱在

平面上排列的周期方阵组成. 在 0.6THz ~ 0.7THz 频率范围内,光子晶体限制了 TE 和 TM 模式的传输,将波的传输限制在矩形波纹内. 通过 PIC 模拟表明:采用 $200 \times 20 \mu\text{m}^2$, 10kV/6mA 的带状电子束,0.6T 的均匀磁场,110 个周期结构时,输出峰值功率为 90mW,频率 0.641THz.

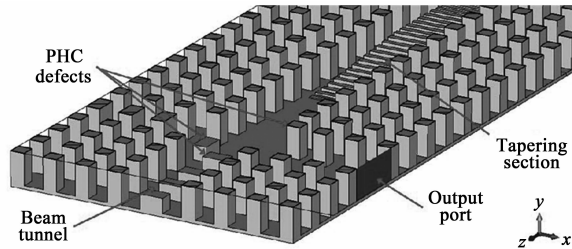


图10 光子晶体侧壁及输出端口三维图

值得关注的是在 2015IVEC 会议上,英国 Lancaster 大学 Claudio Paoloni 和美国 California 大学 Davis 分校的 Branko Popovic 报道了 THz-BWO 新的应用需求及目前的研究进展^[41]. 太赫兹波由于能探测等离子体中电子的密度波动,表征小尺度等离子体扰动的特性,而广泛地用于核聚变反应堆中 High-k 等离子体 collective scattering 诊断. 譬如,美国 Princeton 大学等离子体物理实验室的 NSTX-U 装置,诊断用太赫兹波的频率要求在 0.346THz ~ 0.693THz. 体积大、费用昂贵的远红外激光器是目前唯一可用的仪器. 目前,一个由美国 UC Davis、英国 Lancaster 大学、中国的电子科技大学和北京真空电子技术研究所参与的国际合作项目正在进行,该项目计划研制工作频率 0.346THz 以上、输出功率几百毫瓦的 BWO,替代目前在等离子体诊断中使用的光学泵浦远红外激光器.

该项目的 BWO 慢波结构采用交错双栅结构和双波纹波导两种候选结构,交错双栅结构采用 16mA、宽度 $300 \mu\text{m}$ 的椭圆电子束, PIC 模拟功率为 1W; 双波纹波导采用 10mA, 半径 $50 \mu\text{m}$ 的圆形电子束, PIC 模拟功率为 0.45W. 目前,这两种结构 THz-BWO 都在加工阶段,由 DMG-Mori-Seki 下属子公司 Digital Technology Laboratory (DTL),采用最先进的 NN1000 纳米 CNC 机床加工,并已经加工出了用于冷测的交错双栅结构^[42].

5 THz-BWO 的技术难点

5.1 加工工艺

工作频率进入太赫兹频段后,通常的精密加工工艺很难达到微米乃至亚微米这样的精度,因此必须采用新的加工工艺. 目前, LIGA、DRIE、EDM 等精密微加工技术已经应用到了太赫兹器件的加工中,尤其是 UV-LIGA 技术已成为太赫兹慢波结构加工最有效的方法之一. 国内在 UV-LIGA 加工工艺研究方面,北京真空技

术研究所具有较高的水平. 2012 年,他们对 0.34THz 折叠波导行波管慢波结构 UV-LIGA 加工精度达到了 $0.1 \mu\text{m}$. 2013 年 IVEC 会议上,美国海军实验室报道他们在太赫兹慢波电路 UV-LIGA 微加工方面取得了突破性的成果^[43],成功地加工出了 670GHz-EIK 阶梯结构,束通道直径 0.004inch (0.1016mm),精度在亚微米量级. 这种工艺还具有应用于 0.85THz、1.03THz、1.35THz、1.5THz 器件加工的能力. 另外,纳米 CNC 也是目前正在尝试的微加工工艺,如文献^[42]报道,采用纳米 CNC 工艺加工出了 0.346THz-BWO 的交错双栅结构,但表面粗糙度较差,表征参数为 100nm ~ 200nm.

5.2 阴极技术

THz-BWO 的电子束靠强均匀磁场约束,电子枪通常为非收敛型电子枪. 在保证起振及一定大小功率,且微细结构的情况下,阴极发射电流密度需要达到上百安培每平方厘米,这远远超过了常规微波器件中的阴极电流发射密度. 目前,国内比较成熟稳定的阴极发射电流密度在几安培每平方厘米. 北京真空电子技术研究所一直致力于对阴极性能的研究,最近报道的热阴极研究结果为:采用溶胶-凝胶法制备的平均粒径 450nm 含钨扩散阴极,在 1050°C 得到了超过 $100\text{A}/\text{cm}^2$ 的脉冲发射电流密度,重复频率 200Hz,脉宽 $10 \mu\text{s}$. 这是目前国内在脉冲状态下最大阴极发射电流密度^[44].

值得注意的是在 2013 年 IVEC 会议上,美国 California 大学 Davis 分校 Anisullan Baig 介绍了美国 DARPA HiFIVE 项目对 220GHz 超宽带行波管放大器研究进展^[45],其第一支 HiFIVE-TWT 器件的阴极采用的正是北京真空电子技术研究所的含钨扩散阴极. 经过用带状电子枪分析仪测试表明:在 20kV 脉冲电压下,最大电流 420mA,截面 0.00747cm^2 ($614 \mu\text{m} \times 1550 \mu\text{m}$ 椭圆阴极),阴极发射电流密度达到 $56.2\text{A}/\text{cm}^2$ ^[46].

国外的阴极技术比国内高,从俄罗斯 ISTOK 公司和美国 Microtech 公司的 THz-BWO 产品介绍中可以看出阴极发射电流密度能达到 $100\text{A}/\text{cm}^2 \sim 300\text{A}/\text{cm}^2$. 大电流密度阴极的另外一个发展方向是场致发射阴极,场致发射阴极具有启动速度快,电流密度大,容易实现小型化,和 MEMS 工艺兼容的特点,在常温下就可以发射电子,不会产生热变形问题,以场致发射冷阴极作为太赫兹源有着十分诱人的前景,其缺点是工艺可靠性不高,工作过程中易发电弧损坏,目前还没法替代热阴极.

5.3 损耗问题

信号传输的主要障碍在于传导损耗,尤其在太赫兹频段,金属壁的表面粗糙度接近或大于趋肤深度,会产生比理论损耗大得多且不可估量的损耗. 因此,在互作用结构设计时必须仔细评估损耗. 损耗问题与加工

工艺直接相关,在制造阶段应采用满足表面粗糙度要求的加工工艺。

5.4 磁场技术

THz-BWO 需采用暴力聚焦的方式对电子束进行聚焦,磁场强度非常大,如 Microtech 公司的 QS1-710BWO,磁场强度达到 1.2T。磁块材料的选择与磁场的安装成为较大的难题,磁场的组装需要克服巨大的吸引力或斥力,稍有不慎会造成人员伤害和磁钢的破碎。因此,磁场系统需要精心的设计与装配。

除上述几点外,THz-BWO 的技术难点还包括注波相互作用的效率问题、小尺寸宽带大功率容量输能窗的设计问题、高效热控制和高效散热问题,以及制管时零部件的焊接、封装、排气等工艺。可以说 THz-BWO 的每一部分都存在很大的技术难度,制管过程的每一步都充满了风险。

6 结束语

本文对 THz-BWO 的技术应用及发展水平现状进行了调研,介绍了 THz-BWO 在太赫兹技术研究领域的诸多方面的应用,充分显现了 THz-BWO 在太赫兹技术研究中的科学价值和光明的应用前景。同时,对 THz-BWO 的研究现状、新的动态和应用和技术难点进行了分析或总结。

我国在 THz-BWO 的研究上相对落后,许多关键技术和制管工艺有待突破,早日研制出能覆盖全太赫兹电子学频段 0.1THz ~ 1.0THz 的返波管源,将摆脱对进口 THz-BWO 源的依赖,为推动我国太赫兹技术的发展起到巨大的促进作用。

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 Sheng-gang. Recent development of terahertz science and technology[J]. China Basic Science, 2006, 8(1): 7-12. (in Chinese)
- [2] 许景周,等. 太赫兹科学技术和应用[M]. 北京: 北京大学出版社, 2007.
- [3] 张存林. 太赫兹感测与成像[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [4] Dobroiu A, Yamashita M, Ohshima Y N, et al. Terahertz imaging system based on a backward-wave oscillator[J]. Applied Optics, 2004, 43(30): 5637-5646.
- [5] Spektor A, Anzin V, Goncharov Y, et al. Methodology and hardware of terahertz BWO-Spectroscopy[A]. Proceedings of the Joint 30th Conference on Infrared and Millimeter Waves & 13th International Conference on Terahertz Electronics[C]. Virginia, USA: IEEE, 2005. 168-169.
- [6] Volkov A A, Anzin V B, Goncharov Yu G, et al. BWO-characterization of materials and devices at frequencies 100-1000 GHz[A]. Proceedings of 2000 MRS & Exhibit[C]. San Francisco, USA: MRS, 2000. 631-AA2. 9.
- [7] B P Gorshunov, A A Volkov, A S Prokhorov, et al. Methods of terahertz-subterahertz BWO spectroscopy of conducting materials physics of the solid state[J]. Physics of the Solid State, 2008, 50(11): 2001-2012.
- [8] B Gorshunov, A Volkov, I Spektor, et al. Terahertz BWO-spectroscopy[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2005, 26(9): 1217-1240.
- [9] Philipp M, Graf U, Wagner G A, et al. Compact 1.9THz BWO local-oscillator for the GREAT heterodyne receiver[J]. Infrared Physics & Technology, 2007, 51(1): 54-59.
- [10] 周泉丰,等. 0.22THz 折叠波导行波管设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014, 12(2): 166-170.
Zhou Quan-feng, et al. Design of 0.22THz folded-waveguide traveling wave tube[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014, 12(2): 166-170. (in Chinese)
- [11] Hu Lin-lin, et al. Development of a 0.14THz folded waveguide traveling-wave tube[A]. Proceedings of 6th UK, Europe, China Millimeter Waves and THz Technology Workshop[C]. Rome, Italy: IEEE, 2013. 1-2.
- [12] 周逊,等. 太赫兹波混合器设计[J]. 信息与电子工程, 2011, 9(3): 296-298.
Zhou Xun, et al. Design of THz mixer[J]. Information and Electronic Engineering, 2011, 9(3): 296-298. (in Chinese)
- [13] 姚建铨,等. 太赫兹空间应用研究与展望[J]. 空间电子技术, 2013, 10(2): 1-16.
Yao Jian-quan, et al. Study and outlook of terahertz space-application[J]. Space Electronic Technology, 2013, 10(2): 1-16. (in Chinese)
- [14] Alexander N Korolev, Sergei A Zaitsev, et al. Traditional and novel vacuum electron devices[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2001, 48(12): 2929-2937.
- [15] Borisov A A, Budzinsky U A, Bykovsky S V, et al. The development of vacuum microwave devices in Istok[A]. Proceedings of IEEE International Vacuum Electronics Conference[C]. Bangalore, India: IEEE, 2011. 431-438.
- [16] 冯进军,等. 340 GHz 太赫兹返波振荡器[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(1): 32-37.
Feng Jin-jun, et al. 340GHz terahertz backward wave oscillators[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013, 11(1): 32-37. (in Chinese)
- [17] Walter C Hurlbut, Vladimir G Kozlov. Extended spectral coverage of BWO combined with frequency multipliers

- [A]. Proceedings of Terahertz Technology and Applications III [C]. San Francisco, USA; SPIE, 2010. 76010G1 - 76010G9.
- [18] Lawrence Ives, Carol Korya, Michael Read, et al. Development of backward wave oscillators for terahertz applications [A]. Proceedings of Terahertz for Military and Security Applications [C]. Orlando, USA; SPIE, 2003. 71 - 82.
- [19] R Lawrence Ives, Malcom Caplan, Carol Kory, et al. Design and test of a sub millimeter-wave backward wave oscillator [A]. Proceedings of Joint 30th International Conference on Infrared and Millimeter Waves & 13th International Conference on Terahertz Electronics [C]. Williamsburg, USA; IEEE, 2005. 93 - 94.
- [20] R Lawrence Ives, Carol Kory, Michael Read, et al. High frequency source development at Calabasas creek research [A]. Proceedings of Joint 32nd International Conference on Infrared and Millimeter Waves and the 15th International Conference on Terahertz Electronics [C]. Cardiff, UK; IEEE, 2007. 312 - 314.
- [21] Young-Min Shin, Jin-Kyu So, Seong-Tae Han, et al. Microfabrication of millimeter wave vacuum electron devices by two-step deep-etch x-ray lithography [J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(9): 091916/1-091916/3.
- [22] Ohjoon Kwon, Jin-Kyu So, Anurag Srivastava, et al. Micro-fabricated millimeter wave vacuum electronic devices [A]. Proceedings of the 35th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves [C]. Rome, Italy; IEEE, 2010. 1 - 2.
- [23] Young-Min Shin, Larry R Barnett, Neville C Luhmann. Strongly confined plasmonic wave propagation through an ultra-wideband staggered double grating waveguide [J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(22): 221504/1 - 221504/3.
- [24] Young-Min Shin, Larry R Barnett. Intense wideband terahertz amplification using phase shifted periodic electron-plasmon coupling [J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(9): 091501/1 - 091503/3.
- [25] Young-Min Shin, Larry R Barnett, Diana Gamzina, et al. Terahertz vacuum electronic circuits fabricated by UV lithographic molding and deep reactive ion etching [J]. Applied Physics Letters, 2009, 95(18): 181505/1 - 181505/3.
- [26] Carlo A Di, Paoloni C, Brunetti F, Terranova M L, et al. The European project OPTHER for the development of a THz tube amplifier [A]. Proceedings of IEEE International Vacuum Electronics Conference [C]. Rome, Italy; IEEE, 2009. 100 - 101.
- [27] Paoloni C, Brunetti F, Carlo A Di. The OPTHER project; Progress toward the THz amplifier [A]. Proceedings of IEEE International Vacuum Electronics Conference [C]. Bangalore, India; IEEE, 2011. 55 - 56.
- [28] Mauro Mineo, Claudio Paoloni. Corrugated rectangular waveguide tunable backward wave oscillator for terahertz applications [J]. IEEE Transactions on Electron devices, 2010, 57(6): 1481 - 1484.
- [29] Mauro Mineo, Claudio Paoloni. Double-corrugated rectangular waveguide slow-wave structure for terahertz vacuum devices [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2010, 57(11): 3169 - 3175.
- [30] Mineo M, Bariou D, David J F, et al. Backward wave oscillator for THz frequency range based on double corrugation slow-wave structure [A]. Proceedings of the 35th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves [C]. Rome, Italy; IEEE, 2010. 1 - 2.
- [31] 廖复疆. 微型真空电子器件和太赫兹辐射源技术进展 [J]. 电子学报, 2013, 31(9): 1361 - 1364.
- Liao Fu-jiang. Micro-vacuum electron devices and terahertz vacuum sources [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 31(9): 1361 - 1364. (in Chinese)
- [32] 张开春. 太赫兹扩展互作用振荡器的矩形耦合腔特性研究 [J]. 电子学报, 2011, 39(3): 632 - 635.
- Zhang Kai-chun. Study of characteristic of rectangular coupled-cavity slow-wave structure for extended interaction oscillator [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(3): 632 - 635. (in Chinese)
- [33] 吴振华. 折叠波导结构的 THz 振荡辐射源研究 [J]. 电子学报, 2009, 37(12): 2677 - 2688.
- Wu Zhen-Hua. Research of THz folded waveguide oscillator in terahertz band radiation source [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(12): 2677 - 2688. (in Chinese)
- [34] 马春燕, 等. 0.6THz 三次谐波回旋管的研究 [J]. 电子学报, 2012, 40(3): 495 - 499.
- Ma Chun-yan, et al. Study of a 3rd-harmonic 0.6THz gyrotron [J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(3): 495 - 499. (in Chinese)
- [35] 路志刚. 矩形波导栅行波放大器的研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2008.
- [36] 殷勇. 360 GHz 返波管的研究 [J]. 真空电子技术, 2010, (5): 1 - 4.
- Yin Yong. Study of a 360GHz backward wave oscillator [J]. Vacuum Devices, 2010, (5): 1 - 4. (in Chinese)
- [37] 赖剑强. 交错双栅慢波结构的应用研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2008.
- Lai Jian-qiang. Research and Applications of Staggered Double Vane Slow-Wave Structure [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2008. (in Chinese)

- [38] Chan-Wook Baik, Yongsung Kim, Ho Young Ahn, et al. Enhanced RF performance in multi-tunnel backward-wave oscillators [A]. Proceedings of IEEE International Vacuum Electronics Conference [C]. Monterey, USA; IEEE, 2014. 67 – 68.
- [39] R Letizia, C Paoloni, M Mineo, D Pinto. Photonic crystals assisted slow wave structure for THz vacuum devices [A]. Proceedings of IEEE International Vacuum Electronics Conference [C]. Paris, France; IEEE, 2013. 1 – 2.
- [40] Rosa Letizia, Mauro Mineo, Claudio Paoloni. THz backward wave oscillator based on PhC-wall corrugated waveguide [A]. Proceedings of IEEE International Vacuum Electronics Conference [C]. Monterey, USA; IEEE, 2014. 65 – 66.
- [41] Claudio Paoloni, Rosa Letizia, Mauro Mineo, et al. Magnetic fusion energy plasma diagnostic needs novel THz BWOs [A]. Proceedings of IEEE International Vacuum Electronics Conference [C]. Beijing, China; IEEE, 2015. 1 – 3.
- [42] Branko Popovic, et al. Design and fabrication of a sheet beam BWO at 346GHz [A]. Proceedings of IEEE International Vacuum Electronics Conference [C]. Beijing, China; IEEE, 2015. 1 – 3.
- [43] Colin D Joye, Alan M Cook, Jeffrey P Calame. Break-through UV-LIGA microfabrication of sub-mm and THz circuits [A]. Proceedings of IEEE International Vacuum Electronics Conference [C]. Paris, France; IEEE, 2013. 1 – 2.
- [44] 邵文生, 等. 用于太赫兹真空器件的大电流密度阴极 [J]. 真空电子技术, 2013, (1): 20 – 26.
Shao Wen-sheng, et al. High current density cathodes for terahertz vacuum devices [J]. Vacuum Electronics, 2013, (1): 20 – 26. (in Chinese)
- [45] Anisullah Baig, Diana Gamzina, Robert Barchfeld, et al. 220 GHz ultra wide band TWTA: Nano CNC fabrication and RF testing [A]. Proceedings of IEEE International Vacuum Electronics Conference [C]. Paris, France; IEEE, 2013. 1 – 2.
- [46] Jinfeng Zhao, Diana Gamzina, Na Li, et al. Scandate dispenser cathode fabrication for a high-aspect-ratio high-current-density sheet beam electron gun [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2012, 59(6): 1792 – 1798.

作者简介



胡林林 男, 1979 年 7 月出生, 湖北荆州人. 中国工程物理研究院应用电子学研究所副研究员. 研究方向为太赫兹电真空器件.
E-mail: 9970244@qq.com



蔡金赤 男, 1987 年 6 月出生, 四川南充人. 2011 年毕业于清华大学, 现为清华大学工程物理系在读博士研究生, 从事太赫兹技术方面的有关研究.
E-mail: caijinchao1@163.com

陈洪斌 男, 1971 年 9 月出生, 重庆丰都人. 中国工程物理研究院应用电子学研究所研究员. 研究方向为毫米波/太赫兹电真空器件.
E-mail: ch_hongbin@126.com