2015 年 10 月 Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

文章编号: 2095-4980(2015)05-0684-08

近太赫兹频段线性注真空器件的研究

冯进军,蔡军,胡银富,李含雁,杜英华,唐 烨,李莉莉,潘 攀

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

摘 要:介绍了太赫兹频段真空电子器件的研究和开发进展,包括慢波结构理论、设计、模拟及优化,微加工和微组装技术,整管技术等。这些器件包括行波管、返波管、斜注管、止带振荡器及行波管谐波放大器等,高频结构以折叠波导慢波结构为主,在太赫兹返波管中则利用叶片加载波导慢波结构。器件技术包括微机电系统(MEMS)技术,微波等离子体化学气相沉积(MPCVD) 金刚石生长、金属化和封接技术等。最后给出W波段、G波段以及340 GHz部件和器件所达到的 性能。

关键词:太赫兹;行波管;返波管;微机电系统技术;金刚石 中图分类号:TN752 文献标识码:A doi: 10.11805/TKYDA201505.0684

Research of near-terahertz linear-beam vacuum electronic devices

FENG Jinjun, CAI Jun, HU Yinfu, LI Hanyan, DU Yinghua, TANG Ye, LI Lili, PAN Pan (National Key Laboratory of Science and Technology on Vacuum Electronics, Beijing Vacuum Electronics Research Institute, Beijing 100015, China)

Abstract: The research and development activities of near-terahertz linear beam vacuum electronic devices are described, including slow wave structure theory, parts design, simulation and optimization, micro-fabrication and micro-assembly techniques, tube integration technologies, etc. These devices include Traveling Wave Tubes(TWTs), Backward-Wave Oscillators(BWOs), clinotrons, Stop-Band Oscillators and TWT harmonic amplifiers, etc with folded waveguide and vane-loaded waveguide as high frequency interaction structures. The devices technologies are mainly composed of Micro Electro Mechanical System(MEMS) technology, Microwave Plasma Chemical Vapor Deposotion(MPCVD) diamond process, metallization and mounting technique, etc. Finally, specifications of devices at W-band, 220 GHz and 340 GHz frequency bands are given.

Key words: terahertz; Traveling Wave Tube; Backward-Wave Oscillator; Micro Electro Mechanical System; diamond

太赫兹频段的开发和应用很大程度上依赖于大功率辐射源。真空电子器件具有大功率的优势,特别是线性注器件,如行波管具有较宽的瞬时带宽,返波管具有较大的频率调谐范围,扩展互作用器件具有较大的输出功率,斜注管还将具有较高的互作用效率,在通信、探测、成像、等离子体诊断等领域具有很多应用,所以这些器件近年来在短毫米波及太赫兹频段受到了广泛关注,国内外相关研究机构开展了理论、技术和器件的研究工作,并取得了进展。美国L3公司在2013年研制出W波段脉冲行波管,在4GHz带宽内得到了100W以上的输出功率,采用了单级降压收集极,总效率大于12%,该指标与中电十二所行波管参数接近。美国Northrop Grumman公司,海军实验室,Teledyne公司,加州大学Davis分校等多家单位都在攻关220GHz行波管的研究工作(HIFIVE计划),其中Northrop Grumman公司报道了第一只样管的试验结果,在19.8 kV工作电压,1‰的占空比下,在214GHz得到了最大功率55.5 W的输出^[1]。海军实验室在2014年也取得了突破,在214.5 GHz得到了 60 W以上的输出功率,小信号增益带宽大于15 GHz。美国CPI公司还研制出了264 GHz的脉冲分布互作用速调管(Extended Interaction Klystron, EIK),工作电压18.5 kV,电流250 mA,采用线包磁场聚焦,能够产生20 W的脉冲功率,用于核磁共振。乌克兰国家科学院研制了G波段连续波斜注管,工作电压4 808 V,电流149 mA,电子注尺寸

0.15 mm×2.5 mm, 采用 0.82 T 的永磁体聚焦, 在 258.5 GHz 得到了 635 mW 的功率输出^[2-3]。

在更高的频段, Northrop Grumman 公司开展了 0.85 THz 行波管放大器的研究工作,在 11.4 kV 工作电压, 2.82 mA 电流情况下,行波管最大功率达到 39.4 mW, 3 dB 带宽 11 GHz。这是目前开展的频率最高的行波管器件,也从 实验上验证了目前基于微细加工工艺的电真空器件是产生频率 1 THz 以下的大功率源的最为可行的技术途径^[4]。

作者所在的研究所在 20 世纪 80 年代开始了毫米波真空电子器件的研究,主要器件包括 Ka 波段的螺旋线和 耦合腔行波管。在 20 世纪 90 年代,随着微波电真空器件国家重点实验室的成立,开始进行 W 波段的梯形线和 折叠波导行波管的理论与试验研究。自 2000 年以来,开始研究 V 波段和太赫兹频段的器件及技术,包括返波管、 斜注管、行波管、行波管反馈振荡器等。本文将介绍 W 波段毫米波行波管和近太赫兹真空电子器件上的折叠波 导理论、微加工和微组装技术、金刚石材料以及几种器件的研究进展^[5-10]。

1 折叠波导慢波结构

折叠波导慢波结构(如图 1 所示)为全金属结构,具有高耐热性,特别是加工技术和现代 MEMS 技术相兼容,因此在太赫兹频段得到了广泛研究。折叠波导慢波结构支持一系列的空间谐波,当一个周期的相移为 4π 时(相移 =2*p*β),前向空间谐波(-1 次)与反向空间谐波(+1 次)模式之间存在交叉,并且在 2 个传输频带之间存在一个止带,对于构造振荡器至关重要。图 2 所示为折叠波导慢波结构的典型色散曲线,图中 B 代表返波,F 代表前向波,0,1,-1 分别代表空间谐波次数,如-1B,代表-1 次返波。这些色散曲线,具有非常丰富的信息,每一部分都具有特别的性质,利用这些特性可以研制不同类型的器件,如行波管、返波管、止带振荡器等。



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



2 新型折叠波导结构

为了克服普通折叠波导慢波结构的两大缺点,即带边不稳定性和相对低的耦合阻抗,提出了改进圆弧弯曲半径的新型折叠波导慢波结构^[11],如图 3(b)所示。与普通折叠波导慢波结构相比,新型折叠波导慢波结构有以下 4 个特点: a)保持易于加工的优点,仍与 MEMS 加工技术相兼容; b)由于直段的电场强度增大,耦合阻抗更高,这对于提高行波管的增益和效率尤为重要; c)为速度渐变尤其是多级渐变技术提供了好的选择,从而提高电子效率; d)与普通折叠波导慢波结构相比,新型折叠波导慢波结构的第一止带性能独特,比如直段模式(Straight Mode, SM)与弯曲段模式(Bending Mode, BM)之间相互转换,第一止带带宽可控,上/下截止频率可近似独立调整,这些对于抑制振荡都非常有效。





图 3(a)所示为普通折叠波导慢波结构,它的内外弯曲均为半圆弧(Semi-Circle, SC)。参数 r_{in} 和 r_{out} 是弯曲段的内外半径,分别为 p/2-b/2和 p/2+b/2,2个半圆弧的弧心在 O 点重叠。图 3(b)所示为改进圆弧弯曲(Modified Circular Bend, MCB)的折叠波导慢波结构,内外弯曲变为非半圆弧(Non-Semi-Circle, NSC),包括一大一小 2个圆弧,直段与普通折叠波导慢波结构相同。2个圆弧的弧心 O_{in} 和 O_{out} 与 O 的距离分别为 d_{in} 和 d_{out} ,半径 R_{in} 和 R_{out} 大小分别为($d_{in}^{2}+r_{in}^{2}$)^{1/2}和($d_{out}^{2}+r_{out}^{2}$)^{1/2}。图 3(c)和图 3(d)分别为改进内弯曲(Modified Inner Bend, MIB)和改进外弯曲(Modified Outer Bend, MOB)的折叠波导慢波结构。

3 MPCVD 金刚石及输能窗

采用微波等离子体化学气相沉积(MPCVD) 制备的金刚石薄膜有许多优异性能,包括相对低 的介电常数,极小的毫米波损耗正切,以及高热 导率等,非常适合用在真空功率器件上^[12],尤其 在毫米波和亚毫米波频段,可以在输能窗和螺旋 线行波管中的夹持杆中有很好的应用。通过



MPCVD 系统合成出高质量金刚石薄膜和自支撑金刚石薄膜,过程主要包括以下步骤:首先,用金刚石粉末对 N(100)导电硅晶片进行机械抛光成核,再进行生长直到薄膜厚度达到 0.4 mm 左右;然后对薄膜进行研磨和抛光,达到要求的表面光洁度与厚度;最后根据应用将薄膜切割成设计尺寸。在进行微波管输能窗应用中,还需要对金 刚石进行精密金属化和封接。图 4 给出了利用 MPCVD 金刚石窗片的 W 波段盒型窗以及电压驻波比测试曲线,可以看出,在 75 GHz~105 GHz 频率范围内,电压驻波比均小于 1.4。图 5 给出了用于 340 GHz 行波管的 MPCVD 金刚石盒型输能窗样品的电压驻波比测试曲线和损耗测试曲线,可以看出,在 325 GHz~365 GHz 频率范围内, 电压驻波比全部小于 2.0,其中大部分频率的电压驻波比小于 1.6;在 325 GHz~355 GHz 频率范围内,窗的传输损耗小于 4 dB。



4 MEMS 微加工

2004 年以来,微波电真空器件重点实验室就开始建立 MEMS 工艺平台,并开展高深宽比(High Aspect Ratio, HAR)和大绝对深度的深槽加工技术,已经用于加工近太赫兹微波管中的慢波结构。实际上,真空电子器件慢波结构的宽高比并不是非常大,但是绝对深度很深,W 波段折叠波导结构的半腔深度达到 950 µm^[13]。表 1 为 Ka 波段 35 GHz~560 GHz 之间不同频率的折叠波导典型尺寸,数据基于作者的初步研究,从中可以看出这些微结构 与射频 MEMS 及光学 MEMS 不同,后者尺寸更小,典型的为微米至几十纳米量级,宽高比大于 10。常用的微加 工技术有 X 射线光刻、电镀和铸造(Lithographie,Galanoformung,Abformung,LIGA)、紫外 LIGA(Ultra Violet-LIGA, UV-LIGA)和深层离子蚀刻(Deep Reactive 表1 不同频率器件中折叠波导慢波结构的典型尺寸

UV-LIGA)和深层离子蚀刻(Deep Reactive Ion Etching, DRIE)技术。相比 X 射线 LIGA 的昂贵以及长时间等待 X 射线设备的耗时,使用 SU-8 和 KMPR 的 UV-LIGA 可在一到两周内完成,过程包括曝光、电铸、研磨和去胶等。利用硅晶片的 DRIE 通过

Table1 Typical structure dimensions of FWG at different frequencies of vacuum devices			
<i>f</i> /GHz	broadside/mm	narrow side/mm	electronic channel radius/mm
35	4.77	0.800	0.250
94	1.90	0.300	0.185
140	1.35	0.240	0.100
220	0.76	0.160	0.080
340	0.50	0.100	0.080
560	0.30	0.043	0.020

刻蚀和保形涂覆金属形成折叠波导慢波结构。

UV-LIGA制作的铜折叠波导慢波结构(如图6所示) 已经用于本文后边介绍的行波管谐波放大器,并实现了 180 GHz、500 mW 的功率输出,初步满足了高频率真 空器件电铸铜对含氧量、精确度、表面粗糙度和强度 的要求。利用 DRIE 也可以制作折叠波导慢波结构, 就是在体硅加工的结构上再涂覆一层金属膜,构成金 属波导,但存在热容量小、薄膜容易脱落等问题。

5 W 波段行波管

基于以上有关折叠波导的理论研究和相关的精密 组装技术,研制了中等功率水平、宽带宽的 W 波段行 波管,可用于精密探测、成像系统以及作为回旋管放 大器的前级驱动,器件有脉冲和连续波两类管型。图7 所示脉冲行波管的功率超过 150 W, 带宽为 4 GHz, 工作比为 20%^[14]。图 8 的脉冲行波管功率超过 100 W, 带宽达到超宽的 10 GHz, 增益为 40 dB^[15], 工作电压 和电流分别为 22 kV 和 180 mA,电子注流通率为 96%。

W 波段连续波行波管有 2 种类型, 一种功率为 10 W^[16-17],另一种为 30 W^[18],工作电压均为 16 kV。10 W 功率 4 GHz 带宽的连续波行波管已经提供给用户做 生物效应试验以及综合通信与探测系统试验。30W 连续波行波管的折叠波导结构尺寸根据以下要求做了优化:

a) 工作频率的耦合阻抗高; b) 色散平坦,确保足够带宽; c) 低损耗因数; d) 尽量减小寄生振荡风险。在早期 研制的 W 波段折叠波导行波管中有时会观察到带边振荡,原因是止带附近的阻抗较高。在新的设计中,为了避 免电子注与止带边缘同步,将电子注线下移。图 9 为扫描相移得到的布里渊图,可以看到一条止带,这是由折叠 波导中波导弯曲以及电子注孔反射造成的。连续波行波管条件下,静态电子注流通率超过98.5%,饱和时动态电 子注流通率超过 97%。由于合适的设计以及输能窗和衰减器匹配良好,热测过程中没有观察到寄生振荡。



Fig.7 Tested 150 W power and 4 GHz bandwidth of W-Band pulsed TWTs









(b) tested VSWR results of FWG connected with diamond-disc pill-box window

Fig.6 Photo and tested VSWR results of FWG SWS for 340 GHz BWO 图 6 340 GHz 返波管折叠波导慢波结构照片及测试结果





6 止带振荡器

根据折叠波导的研究结果,带边的耦合阻抗极 大,可以产生强烈的互作用,因此提出了慢波结构 带边振荡器(Band-edge Oscillator,BO)的概念,并 用折叠波导慢波结构成功进行了实验验证,这种 结构适用于频率超过 100 GHz 的小型射频源。折叠 波导慢波结构支持一系列空间谐波模式,本文选择 带边作为工作模式,其所在区域为-1 次前向空间谐 波曲线与+1 次反相空间谐波曲线之间,而一个周期



Fig.12 Axial coupling impedance at the vicinity of the band-edge 图 12 带边附近的轴上耦合阻抗



Fig.13 Prototype and test system of the F-Band FWG band-edge oscillator 图 13 F 波段折叠波导慢波结构带边振荡器及测试系统

的相移为 360°。图 11 和图 12 分别给出了色散曲线和轴上耦合阻抗曲线。利用 CST 粒子工作室,建立了 F 波段 折叠波导慢波结构带边振荡器的全三维模型,包括金刚石输能窗、过渡波导、折叠波导慢波结构,在北京真空电 子技术研究所的云计算平台进行模拟。模拟的功率可达到 70 W,快速傅里叶变换显示振荡频率在 122.68 GHz。 图 13 为研制的 F 波段折叠波导慢波结构带边振荡器样管,采用周期永磁聚焦系统以实现小体积和轻重量^[19]。图 14 为脉冲输出功率的测试曲线和振荡频率。由于慢波结构很短,而且加工控制很好,电子注流通率很容易超过 90%。测量的最大功率为 32.5 W,振荡频率为 124.443 GHz,电压为 23.1 kV,电流为 150 mA。频谱分析显示主 振幅比寄生振荡的幅值高 18.67 dB。



7 G 波段行波管谐波太赫兹放大器

研究过程中提出了一种行波管谐波太赫兹放大器,图 15 为其结构原理图,可以实现大功率、宽频带实用化的真空太赫兹辐射源。其原理基于一般行波管中互作用后电子注的再利用技术,主要有谐波的产生、选择、放大和耦合等过程。为了验证这个概念,利用W波段脉冲行波管,加上级联的二次谐波能量提取系统,研制了G波段(170 GHz~260 GHz)行波管二次谐波放大器样管,输出窗采用金刚石窗片WR4标准波导盒型输出窗。测试结果如图 16、图 17 和图 18 所示,可以看出,在 1%的工作比条件下,在 172 GHz~183.4 GHz 的 11.4 GHz 的带宽范围内,输出功率大于 100 mW,最大输出功率在 173 GHz 频率处达到 500 mW^[20]。该放大器的高频慢波结构由 MEMS 工艺加工,折叠波导的主要尺寸,宽边 1 mm,窄边 0.18 mm,直波导段 0.5 mm,电子注通道 XX,测试电压 21.1 kV,电流 168 mA。这是国内第一只采用微加工技术制作慢波结构的真空电子器件放大器。



Fig.15 Schematic drawing of THAT 图 15 太赫兹行波管谐波放大器结构原理图









Fig.18 Tested harmonic power transfer curve at 172.4 GHz 图 18 测量的 172.4 GHz 的谐波功率转换曲线

8 G波段折叠波导行波管

近年来,G波段(170 GHz~260 GHz)行波管得到广泛研究, 用于宽带通信和视频合成孔径雷达成像。目前有多种射频电路 设计,采用的电子注形式和聚焦磁系统各不相同,如多/单电路 结构、多圆形电子注结构、带状电子注结构,目标为连续波 50 W 甚至更高功率^[21-24]。本文的设计目标是 10 W 低功率小型行波管



Fig.19 Picture of the G-band TWT prototype 图 19 G 波段行波管样管照片

放大器,设计中采用了折叠波导慢波结构、周期永磁系统以及盒型金刚石输能窗,慢波结构采用 LIGA 技术加工。测试结果显示,在 210 GHz~230 GHz 频率范围内,输能窗的电压驻波比小于 1.6,在 22 kV 的高频电压下,收集 极接收到电子注电流为 30 mA,这将有望满足所需的输出功率。图 19 所示为 G 波段行波管的照片,很快将进行测试。

9 结论

本文介绍了近太赫兹频段真空电子器件的理论、技术和器件的研究情况,器件包括行波管、返波管、回旋管 以及其他振荡器; MEMS 技术包括 UV-LIGA 和 DRIE,用于加工折叠波导慢波结构;开展了 MPCVD 金刚石研 究,沉积的自支撑金刚石窗片已用于实际管型的盒型输能窗。器件性能包括可以实现 W 波段连续波行波管 35 W, W 波段脉冲行波管 150 W,G 波段行波管谐波放大器 500 mW,同时完成了 G 波段行波管工艺样管,收集极可以 得到 30 mA 的电流。下一步将进一步突破微加工和微组装工艺,以及测试技术,发挥真空器件在高频率大功率 方面的优势,实现工程化的太赫兹器件。

参考文献:

- Tucek J C,Basten M A,Gallagher D A,et al. 220 GHz power amplifier development at Northrop Grumman[C]// 2012 IEEE 13th International Vacuum Electronics Conference(IVEC). Monterey,CA,USA:IEEE, 2012:553-554.
- [2] Mil'Cho M V,Lopatin I V,Zavertanny V V,et al. CW clinotrons for the short-wave part of the millimeter waveband[C]// 2014 IEEE 15th International Vacuum Electronics Conference(IVEC). Monterey,CA,USA:IEEE, 2014:71-72.
- [3] Kuleshov A,Ponomarenko S,Kishko S,et al. Sub-THz CW clinotron oscillators with increased output power[C]// 2014 IEEE 15th International Vacuum Electronics Conference(IVEC). Monterey,CA,USA:IEEE, 2014:73-74.

- [4] Basten M A, Tucek J C, Gallagher D A, et al. A 0.85 THz vacuum-based power amplifier[C]// 2012 IEEE 13th International Vacuum Electronics Conference(IVEC). Monterey, CA, USA: IEEE, 2012:39–40.
- [5] 冯进军,唐烨,李含雁,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,TANG Ye,LI Hanyan, et al. 340 GHz terahertz backward wave oscillators[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(1):32-37.)
- [6] FENG Jinjun, CAI Jun, HU Yinfu, et al. Investigation of high frequency vacuum devices using micro-fabrication[C]// 2010
 8th International Vacuum Electronic Source Conference and Nanocarbon. Nanjing, China: [IEEE], 2010:33-34.
- [7] QU Bo,FENG Jinjun. Design and simulation of 140 GHz folded waveguide TWT slow-wave structure[C]// 2006 Infrared Millimeter Waves and 14th International Conference on Teraherz Electronics. Shanghai, China: [IEEE], 2006:226.
- [8] CAI Jun, FENG Jinjun, HU Yinfu, et al. Investigation of THz regenerative oscillator[C]// 2010 IEEE International Vacuum Electronics Conference(IVEC). Monterey, CA, USA: IEEE, 2010:323-324.
- [9] REN Dapeng, FENG Jinjun, WU Xianping. Investigation of 220 GHz clinotron HF structure[C]// 4th Europe/UK-China Conference on Millimeter Waves and Terahertz Technologies. Glasgow, UK:[s.n.], 2011.
- [10] TANG Ye, FENG Jinjun. Research on W-band folded waveguide BWO[C]// 4th Europe/UK-China Conference on Millimeter Waves and Terahertz Technologies. Glasgow, UK: [s.n.], 2011.
- [11] CAI Jun, FENG Jinjun, WU Xianping. Folded waveguide slow wave structure with modified circular bends[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2014,61(10):3534-3538.
- [12] DING M Q,LI Lili, FENG Jinjun, et al. A study of high-quality freestanding diamond films grown by MPCVD[J]. Applied Surface Science, 2012,258(16):5987-5991.
- [13] FENG Jinjun, REN Dapeng, LI Hanyan, et al. Study of high frequency folded waveguide BWO with MEMS technology[J]. Terahertz Science and Technology, 2011,4(4):164-180.
- [14] FENG Jinjun, CAI Jun, HU Yinfu, et al. Development of W-band folded waveguide pulsed TWTs[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2013,61(6):1-2.
- [15] CAI Jun, FENG Jinjun, HU Yinfu, et al. 10 GHz bandwidth 100 watt W-band folded waveguide pulsed TWTs[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letter, 2014, 24(9):620-621.
- [16] FENG Jinjun, CAI Jun, WU Xianping, et al. Design investigation of 10 W W-band folded waveguide TWT[C]// IEEE International Vacuum Electronics Conference. Kitakyushu, Japan: IEEE, 2007:77-78.
- [17] HU Yinfu, FENG Jinjun, CAI Jun, et al. Performance enhancement of W-band CW TWT[C]// 2011 IEEE International Vacuum Electronics Conference(IVEC). Bangalore, India: IEEE, 2011:21-22.
- [18] HU Yinfu, FENG Jinjun, CAI Jun, et al. Design and experimental study of a wide bandwidth W-band folded waveguide continuous-wave TWT[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014,42(10):3380-3386.
- [19] CAI Jun, WU Xianping, FENG Jinjun, et al. SWS band-edge oscillator[C]// IEEE International Vacuum Electronics Conference. Monterey, CA, USA: IEEE, 2014:63-64.
- [20] CAI Jun, FENG Jinjun, WU Xianping, et al. Traveling wave tube harmonic amplifier in terahertz and experiment demonstration[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2015, 62(2):648-651.
- [21] Field M,Griffith Z,Young A,et al. Development of a 220 GHz 50 W sheet beam traveling wave tube amplifier[C]// IEEE International Vacuum Electronics Conference(IVEC). Monterey,CA,USA:[IEEE], 2014:225-226.
- [22] Tucek J,Basten M,Gallagher D,et al. 220 GHz folded waveguide circuits for high power amplifiers[C]// IEEE International Vacuum Electronics Conference(IVEC). Rome,Italy:IEEE, 2009:108-109.
- [23] Joye C D,Cook A M,Calame J P,et al. Development of a 233 GHz high-gain traveling wave amplifier[C]// IEEE International Vacuum Electronics Conference(IVEC). Monterey,CA,USA:IEEE, 2014:219-220.
- [24] Nguyen K T, Joye C D, Wright E L, et al. Design of a 233 GHz high-gain single-stage hybrid-serpentine TWT[C]// IEEE International Vacuum Electronics Conference(IVEC). Monterey, CA, USA: IEEE, 2014:217-218.

(下转第706页)