

用于高速无线通信的毫米波行波管

潘 攀, 字张雄, 蔡 军, 唐 烨, 刘世硕, 谢青梅, 边兴旺, 冯进军

(中国电子科技集团公司第十二研究所, 微波电真空器件国家级实验室, 北京 100015)

摘 要: 毫米波行波管可以为高速无线通信提供高性能与实用化的功率放大器解决方案. 国外正在开展多项基于毫米波行波管的高速无线通信技术研究, 工作频率范围在 71 ~ 300 GHz. 本文综述了国内外 71 ~ 235 GHz 的毫米波行波管的技术发展与研制水平, 并结合作者所在团队的研究成果分析了研制该类器件所需要解决的慢波结构微加工、新型慢波结构设计和宽带低损耗输能等关键技术.

关键词: 无线通信; 毫米波; 功率放大器; 真空电子器件; 行波管; 折叠波导

中图分类号: TN124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2020)09-1834-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.09.022

Millimeter Wave Traveling Wave Tubes for High Data Rate Wireless Communication

PAN Pan, ZI Zhang-xiong, CAI Jun, TANG Ye, LIU Shi-shuo,

XIE Qing-mei, BIAN Xing-wang, FENG Jin-jun

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

Abstract: Millimeter wave traveling wave tubes are potentially effective and feasible power amplifier solutions for high data rate wireless communication. Research projects of high data rate wireless communication technology based on millimeter wave traveling wave tubes, whose operation frequency ranges are between 71 GHz and 300 GHz, are being developed abroad. The development of millimeter wave traveling wave tubes between 71 GHz and 235 GHz are presented. The enabling technologies of these devices are also overviewed, such as microfabrication of slow wave structures, novel design of slow wave structures and transmission with broadband and low loss.

Key words: wireless communication; millimeter wave; power amplifier; vacuum electron device; traveling wave tube; folded waveguide

1 引言

通过无线网络传送的海量数据流正以指数级增长, 积极开拓闲置的高频率频谱资源成为一种极具竞争力的通信升级方案. 毫米波既能提供足够的带宽以满足日益增长的数据需求, 又能作为光纤的补充同时为移动用户和固定用户提供廉价的数据接入方案. 由于毫米波段的大气衰减较大, 通信系统为保证传输距离和信号覆盖面积, 需要输出功率数十瓦至百瓦的功率放大器. 在毫米波频段, 真空电子器件具有大功率的优势(图 1^[1]), 在未来基于毫米波的高速无线通信系统中大有可为.

在众多类型的真空电子器件中, 行波管兼有宽频

带和高增益这一电子设计师梦寐以求的特性. 行波管的基本工作原理是让电子穿过一个长长的慢波结构, 并在其中和电磁场进行互作用. 虽然相比于谐振腔, 慢波结构和电子的互作用较弱, 但是由于互作用的时间长, 增益仍然可以很高, 而且工作带宽可以大大增加^[2].

2 基于毫米波行波管的高速无线通信研究项目

国际上已开展了多项基于毫米波行波管的高速无线通信技术研究, 其中有代表性的包括: 美国国防部高级研究计划局(DAPRA)支持的“100Gbps 射频骨干网”项目; 欧盟地平线 2020 计划(Horizon 2020)中支持的“具有高数据率分发、频谱和能量效率的 W 波段无线网

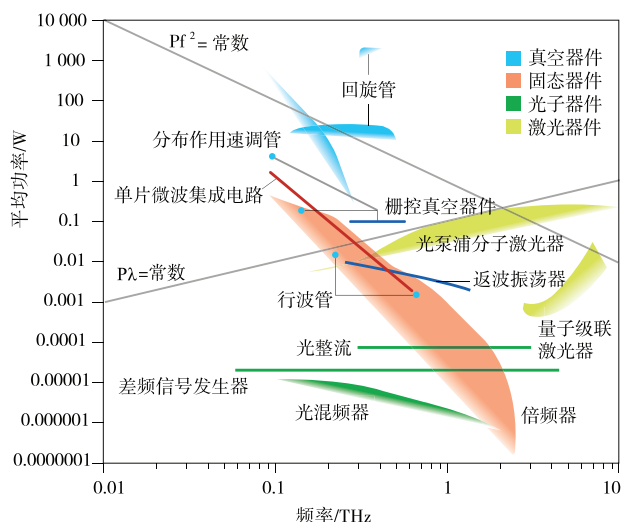


图1 毫米波及太赫兹频段真空电子器件、固态电子器件、光子器件和激光器的平均功率

络用行波管”(TWEETHER)项目和“基于毫米波行波管的100GHz以上超容量无线层”(ULTRAWAVE)项目。目前,国内公开的高速无线通信研究项目中还没有采用毫米波行波管的方案。

2.1 “100Gbps 射频骨干网”项目

“100Gbps 射频骨干网”项目于2012年启动^[3],其目标是构建等同于光纤的无线通信骨干网,在相距200km的机载平台之间或相距100km的机载平台与地面之间实现100Gbps的通信速率,联结各重要节点,提供全天候通信能力,从而极大地提高战场态势感知能力和联合作战能力。为了实现百km级的远距离通信,采用E波段(71~76GHz、81~86GHz)行波管作为末级功率放大器。2018年,该项目完成了第二阶段的演示验证,在地面实现了20km的通信距离和100Gbps的通信速率。接下来,该项目将进行空对地的飞行测试,并将通信距离提高至100km。

2.2 TWEETHER 项目

“具有高数据率分发、频谱和能量效率的W波段无线网络用行波管”(TWEETHER)项目于2015年启动^[4],该项目的目标是实现用于高容量数据分发业务的W波段(92~95GHz)无线通信系统,该系统首次将真空电子器件、单片毫米波集成电路和网络模型融合在一起来实现一种新型的发射机,从而促进未来无线网络的发展。

为实现这一目标,将利用W波段点对多点的网络架构来实现10Gbps/km²的通信容量覆盖。采用无线点对多点网络将为运营商节省大量仪器、场地和牌照费用支出。与点对点链路需要窄波束天线不同,点对多点链路需要使用低指向性天线。此外,考虑到雨雪天气的毫米波大气衰减,发射机需要具有较高的发射功率。根

据预设的应用场景,如果在1km半径内提供10Gbps/km²的通信容量,需要宏基站和终端的饱和发射功率必须分别达到40W和1W,将分别采用行波管和单片微波集成电路(Monolithic Microwave Integrated Circuit, MMIC)来实现。该项目已于2018年9月完成演示验证,实现了世界上首个W波段的点对多点无线回传。

2.3 ULTRAWAVE 项目

“基于毫米波行波管的100GHz以上超容量无线层”(ULTRAWAVE)项目面对高容量、高基站密度回传的挑战,计划开发高于100GHz的整个毫米波频谱^[5]。该项目于2018年启动,将在500m的半径范围内利用D波段(141~174.8GHz)的点对多点系统提供大于100Gbps/km²的能力,并接入超过600m距离的新型G波段(300GHz)点对点高容量链接。行波管是唯一能够在毫米波的数GHz带宽内实现十瓦级输出功率的器件,因此需要研制D波段和G波段的行波管。

3 国内外毫米波行波管的研制进展

虽然在通信领域,近几年才开始研究将毫米波行波管用于高速无线通信,但是在雷达领域,尤其是军用雷达方面,系统频率已经提高到了W波段(75~110GHz)至Y波段(170~260GHz)。针对雷达应用,国内和国外(主要是美国)已经研制出了一系列毫米波行波管。这些毫米波行波管的工作频率主要集中在几个大气窗口频段,即94GHz、140GHz和220GHz附近。

表1总结了国内外研制出的毫米波行波管的测试结果^[6-18],主要包括频率范围、输出功率、增益和效率。总体上看,这些毫米波行波管的带宽在5~10GHz,输出功率在十瓦至百瓦量级,增益约为30dB,效率在4%~25%。由于无线通信可以利用的毫米波电磁频谱资源有明确的规定,5~10GHz的带宽完全可以满足地面无线通信的需求,十瓦至百瓦量级的输出功率可以实现km级的远距离点对点通信或大面积覆盖的点对多点通信,30dB左右的增益可以降低对毫米波信号源的功率要求从而降低系统成本。

针对高速无线通信应用,作者所在的团队研制出了四个频段的毫米波行波管,分别为E波段(71~76GHz)行波管、E波段(81~86GHz)行波管、W波段行波管和G波段行波管,这些毫米波行波管都可以连续波工作。

3.1 E波段(71~76GHz)行波管

图2为E波段(71~76GHz)行波管。该行波管的工作电压为13kV,工作电流为77mA,在工作频带内的效率≥14%。图3为该行波管的输入-输出功率曲线,在工作频带内,连续波输出功率≥45.8dBm(38W),饱和增益≥36dB。图4为该行波管的输入-增益曲线,在工作频带内,小信号增益≥45.7dB。

表 1 国内外研制出的毫米波行波管的测试结果

序号	研制单位	频率 (GHz)	输出功率 (W)	增益 (dB)	效率 (%)
1	中国电子科技集团公司第十二研究所	71 ~ 76	38	36	14
2	美国 L3 技术公司	81 ~ 86	100	29	25
3	中国电子科技集团公司第十二研究所	81 ~ 86	75	36	16
4	美国 CPI 公司	93 ~ 95	50	-	-
5	中国电子科技集团公司第十二研究所	92 ~ 96	55	30	15
6	美国 L3 技术公司	90.5 ~ 90.7	400 (脉冲)	32	-
7	美国 L3 技术公司	91 ~ 95	100 (脉冲)	32	12
8	中国电子科技集团公司第十二研究所	90 ~ 98	250 (脉冲)	32	-
9	电子科技大学	94 ~ 96	100 (脉冲)	40	15
10	中国工程物理研究院应用电子学研究所	138.2 ~ 141.2	3.6	21	-
11	美国 Teledyne 公司	197 ~ 203	50 (脉冲)	30	-
12	美国 L3 技术公司	231.5 ~ 235	16 (脉冲)	30	3
13	美国诺斯罗普格鲁门公司	232.5 ~ 234.8	50 (脉冲)	23	-
14	中国工程物理研究院应用电子学研究所	209 ~ 220	9	25	-
15	中国电子科技集团公司第十二研究所	212 ~ 222	10	32	4

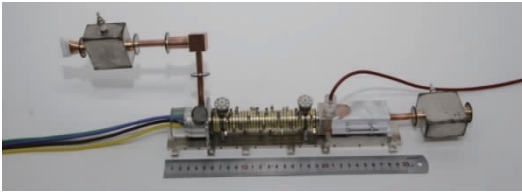


图2 E波段 (71~76GHz) 行波管

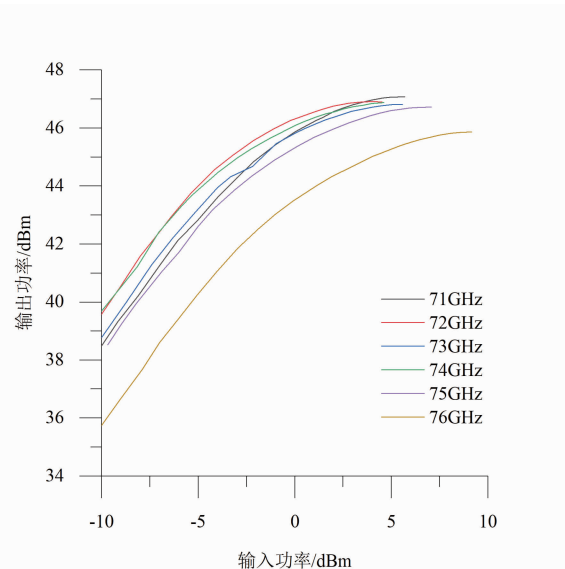


图3 E波段 (71~76GHz) 行波管的输入-输出功率曲线

3.2 E 波段(81 ~86GHz) 行波管

E 波段(81 ~86GHz)行波管的工作电压为 16kV, 工作电流 110mA. 在工作频带内,连续波输出功率 $\geq$

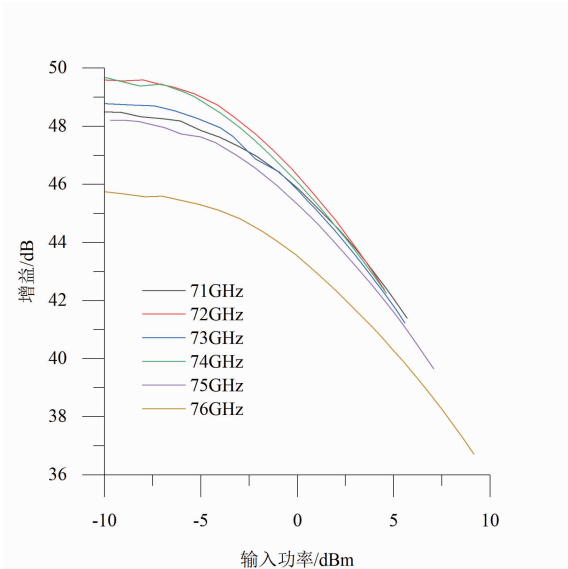


图4 E波段 (71~76GHz) 行波管的输入-增益曲线

80W,饱和增益 ≥ 35 dB,非线性相移 $\leq 45^\circ$ (饱和回退 20dB)、三阶互调 ≤ -11 dBc (饱和回退 6dB),效率 $\geq 16\%$ [7]. 正在研制的新样管中采用了多级降压收集极技术,预计效率将超过 25%.

3.3 W 波段行波管

W 波段行波管的工作电压为 16kV,工作电流为 76mA,瞬时带宽 ≥ 4 GHz,连续波输出功率 ≥ 55 W,最大输出功率达到 67W,饱和增益 ≥ 30 dB,效率 $\geq 15\%$ [9].

3.4 G 波段行波管

图 5 为 G 波段行波管. 该行波管的尺寸为 320mm

$\times 70\text{mm} \times 70\text{mm}$,重量为 2.5kg,工作电压为 20.5kV,工作电流为 50mA.图 6 是该行波管的输出功率和增益曲线,在 212~222GHz 的频率范围内连续波输出功率 $\geq 10\text{W}$,最大功率达到 19W,增益 $\geq 30\text{dB}$,效率 $\geq 4\%$.正在研制的新样管中采用了多级降压收集极技术,预计效率将超过 8%.



图5 G波段行波管

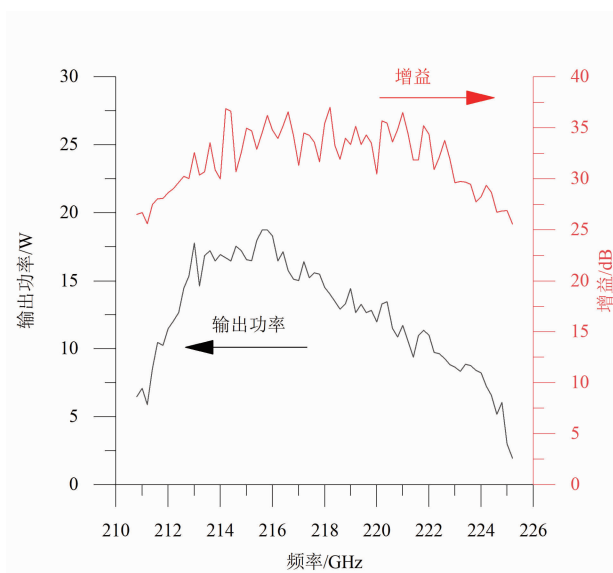


图6 G波段行波管的输出功率和增益

4 毫米波行波管的主要关键技术

行波管通过两个系统协同工作,即电子光学系统和电磁慢波系统.电子光学系统是指电子枪产生一束电子注,由聚焦磁场维持电子注穿过慢波结构并与电磁波进行互作用,随后电子注由收集极回收.电磁慢波系统是指电磁波通过输入系统进入慢波结构,通过注波互作用从电子注中获取能量,被放大的电磁波再通过输出系统离开行波管.在这两个系统中,决定行波管工作频率的是电磁慢波系统.因此,毫米波行波管与传统微波行波管的最主要区别体现在电磁慢波系统上,即慢波结构、输入系统和输出系统.

慢波结构是一种特殊的导波系统.导波系统中可以传输不同模式的电磁波,它们具有不同的截止频率.在实际行波管的设计中,慢波结构中传输基模电磁波,因为基模电磁波的传输最稳定.随着行波管工作频率的提高,基模电磁波的截止频率也同步提高,而慢波结

构的截止频率与慢波结构的横向尺寸成反比.因此通常来讲,慢波结构的尺寸与行波管的工作频率成反比.以折叠波导慢波结构为例,表2列出了不同频率行波管中折叠波导慢波结构的典型尺寸^[19].随着行波管频率的提高,慢波结构的尺寸缩小,加工制造难度提高,因此研制毫米波行波管首先需要解决的就是慢波结构的微加工技术.

在毫米波段,折叠波导慢波结构比螺旋线、耦合腔等传统慢波结构更容易加工,但是其缺点是存在带边不稳定性及耦合阻抗较低^[19].为了抑制行波管的带边振荡,并提高行波管的增益和效率,需要采用新的慢波结构设计技术.

随着行波管频率的提高,能量转换效率降低.在这种情况下,为了提高行波管的输出功率和增益,要求行波管的输入系统和输出系统(统称为输能系统)的损耗尽可能小.另一方面,折叠波导慢波结构的相对带宽通常在10%以上,为了抑制行波管的反射振荡,要求行波管的输能系统的带宽大于慢波结构的带宽.出于以上两方面考虑,研制毫米波行波管需要解决宽带低损耗输能技术.

表2 不同频率行波管中折叠波导慢波结构的典型尺寸

频率 f (GHz)	波导宽边 (mm)	波导窄边 (mm)	电子注通道半径 (mm)
35	4.77	0.8	0.25
94	1.9	0.3	0.185
140	1.35	0.24	0.1
220	0.76	0.16	0.08
340	0.5	0.1	0.08

4.1 慢波结构的微加工技术

毫米波行波管的慢波结构加工主要有以下几个难点:

一是尺寸小.从表2中可以看出折叠波导慢波结构的尺寸在亚毫米量级至微米量级.

二是尺寸精度要求高.由于慢波结构是一种周期结构,每个周期的尺寸偏差都会降低能量转换效率,因此要求慢波结构的尺寸尽可能一致.

三是对加工表面的质量要求高. Hammerstad^[20]给出了考虑金属表面粗糙度的等效电导率公式,如式(1)所示

$$\sigma_e = \frac{\sigma}{\left\{ 1 + \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left[1.4 \left(\frac{h}{s} \right)^2 \right] \right\}^2} \quad (1)$$

其中,集肤深度 $s = \sqrt{2/(\omega\mu\sigma)}$, h 为表面粗糙度, σ 为直流电导率.表面粗糙度增大会造成等效电导率降低,从而增大慢波结构的损耗.在微波频段,由于频率低,集肤深

度较大,机械加工的表面粗糙度远小于集肤深度,等效电导率接近于直流电导率.在毫米波段,机械加工的表面粗糙度已经与集肤深度在同一数量级,表面粗糙度对等效电导率的影响十分明显.因此,为了提高等效电导率,要求慢波结构具有尽可能小的表面粗糙度.

慢波结构的微加工与微机电系统(Micro Electro Mechanic System, MEMS)加工工艺有一定兼容性,但有两点不同:一是慢波结构的宽高比并不是非常大,但是绝对高度很大(表2中的波导宽边即绝对高度);二是慢波结构需要采用高电导率材料,通常为无氧铜.目前主要有三种手段可以实现慢波结构微加工:高速微铣削^[21]、紫外光刻电铸(Ultra Violet-Lithographie, Galanofomung, Abformung, UV-LIGA)^[22]和深反应离子刻蚀(Deep Reactive Ion Etching, DRIE)^[23].我们利用UV-LIGA技术加工出了多个频段毫米波行波管的折叠波导慢波结构^[24~26].由于UV-LIGA加工的折叠波导慢波结构具有尺寸一致性高、损耗小的优点,我们研制的W波段脉冲行波管实现了16GHz的超宽带输出^[27].

4.2 新型慢波结构设计技术

为了克服折叠波导慢波结构的带边不稳定性和耦合阻抗较低等缺点,我们提出了改进圆弧弯曲半径的新型折叠波导慢波结构.与传统折叠波导慢波结构相比,新型结构轴线上的电场强度更大,耦合阻抗更高,因此具有更高的能量转换效率.新型结构可以通过调整圆弧弯曲的圆心和半径来控制色散曲线中的第一止带范围,从而实现抑制带边振荡的效果^[28].

为了提高毫米波行波管的增益和效率,我们提出了利用基波电流与基波电场的相位差设计高效率行波管的方法.通过对电子注电流与电磁波的相位关系进行定量分析,以及对电子注轴向电流分量与电磁波的轴向电场分量进行离散傅里叶变换,得到基波电流、基波电场的幅值与相位信息,再根据两者的相位差精确设计慢波结构的相速跳变方案^[29].

通过采用改进圆弧弯曲半径的新型折叠波导慢波结构,并利用基波电流与基波电场的相位差设计相速跳变方案,我们成功地将E波段(81~86GHz)行波管的输出功率从原先的80W提高至120W,将W波段行波管的输出功率从原先的35W提高至55W.

4.3 宽带低损耗输能技术

为了增大输能系统的带宽并降低其损耗,我们在毫米波行波管中采用了金刚石薄膜代替传统的蓝宝石片或氧化铍片作为输能系统的介质材料^[30],因为金刚石具有低介电常数、低损耗正切和高热导率等优点.采用微波等离子体化学气相沉积技术可以制备出高品质的金刚石薄膜,再利用磁控溅射将钛-银-铜焊料膜镀覆在金刚石表面,形成局部金属化的金刚石片,最后通过

真空钎焊与金属结构封接成输能系统.采用该方法加工出的W波段输能系统的传输损耗只有0.4dB,比采用蓝宝石片减小了约1dB,并且可以实现W波段全频带的驻波系数小于1.2^[31].这一技术也在220GHz行波管中得到了应用.

5 结论

大功率、宽带宽、高增益的毫米波行波管可以为高速无线通信提供高性能和实用化的功率放大器解决方案.因此,国际上已经有多个项目开始研究基于毫米波行波管的高速无线通信技术.国内目前已经研制出多种毫米波行波管,且部分性能还优于国外同类器件.

高速无线通信系统的发展对毫米波行波管带来新的发展机遇,同时也提出了新的要求,例如:行波管需要满足16QAM/64QAM/256QAM等高阶调制模式对功率放大器的线性度要求;工作方式需要从原来的饱和输出转变为高峰均比输出;器件效率需要进一步提高,并且要在功率回退的状态下达到最大效率;为了便于基站的部署,行波管需要进一步减小体积、降低成本.总之,为了满足未来的高速无线通信需求,毫米波行波管必须进一步小型化、集成化、线性化、高效化.同时,为了降低生产制造的成本,必须具备批量制造能力.为此,需要从器件设计、新型结构和制造等多方面进行努力,使器件实现高性能、高可靠、长寿命和低成本^[32].

参考文献

- [1] C M Armstrong, et al. The truth about terahertz [J]. IEEE Spectrum, 2012, 49(9): 36-41.
- [2] 廖复疆, 等. 真空电子技术——信息化武器装备的心脏(第2版) [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [3] T K Woodward. What to do when there's no fiber: the DARPA 100Gb/s RF backbone program [A]. Optical Fiber Communication Conference [C]. USA: Optical Society of America, 2017. 1-2.
- [4] C Paoloni, et al. TWEETHER project for W-band wireless networks [A]. 9th UK-Europe-China Workshop on Millimetre Waves and Terahertz Technologies (UCMMT) [C]. Qingdao, China: IEEE, 2016. 42-43.
- [5] C Paoloni, et al. Technology for D-band/G-band ultra capacity layer [A]. 2019 European Conference on Networks and Communications (EuCNC) [C]. Valencia, Spain: IEEE, 2019. 209-213.
- [6] R Kowalczyk, et al. High efficiency E-band MPM for communications applications [A]. 2016 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC) [C]. Monterey, CA: IEEE, 2016. 1-2.
- [7] Zi Z, et al. A 70W 81~86GHz E-band CW traveling wave

- tube [A]. 2019 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC) [C]. Busan, South Korea; IEEE, 2019. 1-2.
- [8] Communications & Power Industries; company information; microwave power products division; coupled cavity TWTs-CW products W-band [EB/OL]. <http://www.cpii.com>, 2015.
- [9] Hu Y, et al. Experiment of a 50W W-band TWT with tapering FWG circuit [A]. 2016 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC) [C]. Monterey, CA; IEEE, 2016. 1-2.
- [10] A J Theiss, et al. High-average-power W-band TWT development [J]. IEEE Transactions on Plasma Science. 2010, 38(6):1239-1243.
- [11] R Kowalczyk, et al. A 100 Watt W-Band MPM TWT [A]. 2013 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC) [C]. Paris, France; IEEE, 2013. 1-2.
- [12] Zhang X, et al. Design and experimental study of 250W W-band pulsed TWT with 8GHz bandwidth [J]. IEEE Transactions on Electron Devices. 2017, 64(12):5151-5156.
- [13] 张瑞峰. 百瓦级 W 波段折叠波导脉冲行波管 [A]. 中国电子学会真空电子学会第二十一届中国学术年会论文集 [C]. 甘肃:中国电子学会真空电子学会, 2018.
- [14] 雷文强, 蒋艺, 等. D 波段 7W 连续波折叠波导行波管的研制 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016, 14(02):171-174, 185.
- [15] M Field, et al. Development of a 100W 200GHz high bandwidth mm-wave amplifier [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2018, 65(6):2122-2128.
- [16] C M Armstrong, et al. A compact extremely high frequency MPM power amplifier [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2018, 65(6):2183-2188.
- [17] M A Basten, et al. 233GHz high power amplifier development at Northrop Grumman [A]. 2016 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC) [C]. Monterey, CA; IEEE, 2016. 1-2.
- [18] Lei W, et al. A G-band wideband CW folded waveguide TWT [A]. 2019 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC) [C]. Busan, South Korea; IEEE, 2019. 1-3.
- [19] 冯进军, 蔡军, 等. 近太赫兹频段线性注真空器件的研究 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015, 13(05):684-690, 706.
- [20] E Hammerstad, et al. Accurate models for microstrip computer-aided design [A]. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest [C]. USA; IEEE, 1980. 407-409.
- [21] G Diana, et al. Nanoscale surface roughness effects on THz vacuum electron device performance [J]. IEEE Transactions on Nanotechnology, 2016, 15(1):85-93.
- [22] C D Joye, et al. Demonstration of a high power, wideband 220-GHz traveling wave amplifier fabricated by UV-LIGA [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2014, 61(6):1672-1678.
- [23] J C Tucek, et al. Operation of a compact 1.03THz power amplifier [A]. 2016 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC) [C]. Monterey, CA; IEEE, 2016. 1-2.
- [24] Li H, et al. Microfabrication of W-band folded waveguide slow wave structure using DRIE and UV-LIGA technology [A]. 2011 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC) [C]. Bangalore, India; IEEE, 2011. 379-380.
- [25] Li H, et al. UV-LIGA microfabrication for high frequency structures of a 220GHz TWT amplifier [A]. 2016 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC) [C]. Monterey, CA; IEEE, 2016. 1-3.
- [26] Li H, et al. Fabrication of 340GHz folded waveguides using KMPR photoresist [J]. IEEE Electron Device Letters, 2013, 34(3):462-464.
- [27] Du Y, et al. Experimental investigation of an ultrawide bandwidth W-band pulsed traveling-wave tube with microfabricated folded-waveguide circuits [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47(1):219-225.
- [28] Cai J, Feng J, et al. Folded waveguide slow wave structure with modified circular bends [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2014, 61(10):3534-3538.
- [29] 刘世硕, 蔡军, 等. 折叠波导行波管 PIC 模拟中的相位分析方法研究 [J]. 微波学报, 2016, 32(04):73-77.
- [30] 杜英华, 胡银富, 等. 金刚石在太赫兹电真空器件中的应用 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(03):350-354.
- [31] Ding M, et al. Development of an extremely thin-diamond window for terahertz traveling wave tubes [J]. Diamond and Related Materials, 2017, 79:173-178.
- [32] 廖复疆, 蔡军, 等. 发展新一代真空电子器件 [J]. 真空电子技术, 2016, 6:31-35.

作者简介



潘 攀 男, 1986 年 10 月出生于北京市。现为中国电子科技集团公司第十二研究所高级工程师。主要研究方向为短毫米波及太赫兹真空电子器件。
E-mail: p-pan@hotmail.com



字张雄 男,1976 年 1 月出生于云南省云龙县. 现为中国电子科技集团公司第十二研究所高级工程师. 主要研究方向为速调管及毫米波行波管.

E-mail: z_zx2005@sina.com



蔡军 男,1978 年 9 月出生于河北省唐山市. 现为中国电子科技集团公司第十二研究所研究员, 博士生导师, 微波电真空国家级实验室副主任.

E-mail: caijun@sdu.edu.cn



唐烨 女,1983 年 4 月出生于吉林省长春市. 现为中国电子科技集团公司第十二研究所高级工程师. 主要研究方向为短毫米波及太赫兹真空电子器件.

E-mail: tangye12research@163.com



刘世硕 男,1989 年 2 月出生于江苏省连云港市. 现为中国电子科技集团公司第十二研究所工程师. 主要研究方向为 E 波段行波管.

E-mail: ljyss678@163.com



谢青梅 女,1992 年 9 月出生于安徽省桐城市. 现为中国电子科技集团公司第十二研究所工程师, 主要研究方向为毫米波行波管.

E-mail: xqmbit@sina.cn



边兴旺 男,1990 年 2 月出生于河北省任丘市. 现为中国电子科技集团公司第十二研究所助理工程师, 主要研究方向为 G 波段行波管.

E-mail: sjzbxw2011@126.com



冯进军 男,1966 年 7 月出生于山西省运城市. 现为中国电子科技集团公司第十二研究所研究员, 博士生导师, 微波电真空国家级实验室副主任.

E-mail: fengjinjun@tsinghua.org.cn