

毫米波/太赫兹扩展相互作用速调管 放大器的应用及研究进展

胡林林, 曾造金, 陈洪斌, 马国武, 雷文强, 孟凡宝

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川绵阳 621900)

摘 要: 作者对毫米波与太赫兹频段的扩展相互作用速调管放大器的应用需求和发展现状进行了详细的调研, 介绍了该器件在空间探测、主动拒止、生物医学等研究领域的应用, 说明了该器件在毫米波及太赫兹技术研究中的科学价值和良好的应用前景; 同时, 作者对该器件的发展趋势、主要技术难点和遇到的挑战进行了分析。

关键词: 扩展相互作用速调管; 分布作用速调管; 太赫兹

中图分类号: TN24

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2019)01-0211-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.01.028

Application and Development of Extended Interaction Klystrons in Millimeter-Wave and Terahertz Band

HU Lin-lin, ZENG Zao-jin, CHEN Hong-bin, MA Guo-wu, LEI Wen-qiang, MENG Fan-bao

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

Abstract: We have investigated the application demands and status of extended interaction klystrons (EIKs) at millimeter-wave and terahertz band in detail. The applications of EIKs in the fields such as space detection, active denial system and biomedicine are presented in this paper, indicating the scientific value and good application value of EIKs in millimeter-wave and terahertz technical domain. The latest development and trend, technical difficulties and challenges of EIKs are technically analyzed and summarized.

Key words: extended interaction klystron; distributed interaction klystron; terahertz

1 引言

扩展相互作用速调管 (Extended Interaction Klystron, EIK) 结合了速调管和耦合腔行波管 (Traveling-Wave Tube, TWT) 的各自特点, 通过电子束与多间隙的谐振慢波结构中的驻波相互作用实现微波功率放大^[1], 其构造如图1所示。这种多间隙梯形谐振腔, 提高了束波相互作用阻抗, 能够对电子束形成较强的调制, 相比于传统的多腔速调管单位长度增益高, 具备一定宽带, 因而能够实现较高的功率和效率。此外, 多间隙腔体有利于减小每个间隙的电压, 避免打火。EIK 特别适合在毫米波及太赫兹波段工作, 相比行波管具有明显的功率优势和较高的稳定性能。

广义上讲, 太赫兹 (Terahertz, THz) 波是指频率从 0.1 THz 到 10 THz, 介于毫米波与红外光之间的电磁波,

涵盖了亚毫米波及远红外光区域, 太赫兹技术在光谱分析、探测成像、雷达、通信等领域具有巨大的潜在应用价值。EIK 作为一种结构紧凑、坚实耐用的大功率毫米波/太赫兹源器件, 已经在空间探测、主动拒止系统、生物医学仪器、高分辨成像等毫米波/太赫兹技术领域得到了应用, 引起了国际上相关领域的重视。

鉴于 EIK 源的科学价值, 本文对 EIK 的应用需求、发展水平现状进行介绍, 分析毫米波及太赫兹 EIK 的发展趋势、技术难点和面临的挑战, 希望为 EIK 的研究提供有益的参考。

2 EIK 的应用需求

2.1 空间应用

毫米波/太赫兹测云雷达相对于现有的微波测云雷达具有更高的精度和灵敏度, 波束集中, 能更好的匹

配星载激光雷达,目标信息的相关性高,反演冰水含量精度更高.2006 年,美国 NASA 成功发射了 CloudSat 测云卫星.Cloudat 卫星第一个采用毫米波雷达进行全球云垂直廓线测量的卫星,搭载的 94GHz 云廓线雷达的灵敏度是现有气象雷达的 1000 倍,该雷达的信号源即

采用了 CPI 公司的 94GHz-EIK(如图 2 所示),其输出功率达到 2kW,重量仅 6.2kg.从发射至今,CloudSat 运行达到了 10 年以上^[2,3].

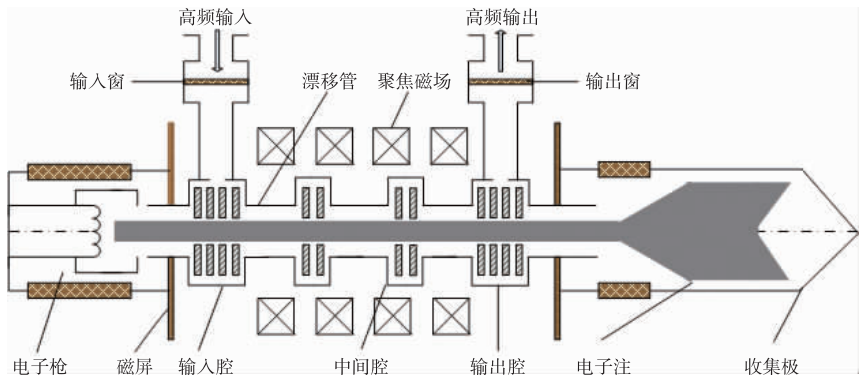


图1 EIK组成示意图

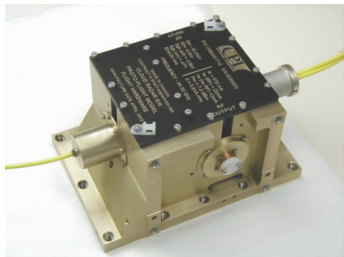


图2 Cloudsat测云卫星搭载的EIK源

欧洲空间局研制的 EarthCARE(Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer)测云卫星,将于 2018 年发射^[4,5].该卫星的云廓线雷达信号源采用的也是 CPI 公司 94GHz-EIK,为 CloudSat 卫星 EIK 源的改进型,其电子枪聚焦系数更大,阴极电流发射密度降低了 25%^[2,6].

除测云卫星外,EIK 在其他航天器雷达上也有应用计划.例如,美国国家航空航天局的木星冰月轨道器(Jupiter Icy Moons Orbiter,JIMO)计划和欧洲空间局的全球降水测量项目(European Global Precipitation Measurement,EGPM)等^[2].JIMO 主要任务是研制环绕木卫二、木卫三和木卫四飞行的飞行器,深入研究这些卫星冰冷的表面下,可能隐藏着巨大海洋的组成、历史和可能存在的生命情况;EGPM 项目的目的在于通过全球范围地表覆盖的高质量采样测量降水,提高对天气、地球气候变化和全球水循环的预测能力.JIMO 和 EGPM 计划采用 CPI 公司 35GHz-EIK 做为地形测绘雷达的信号源.

表 1 列出了 EIK 在空间探测中的应用项目,以及所采用的 EIK 参数和进展情况^[4].

表 1 与 EIK 应用相关的空间计划

任务名称	系统	EIK 参数	研究现状	单位	任务阶段
CloudSAT	云廓线雷达	94GHz/脉冲功率 17kW	飞行模型已处于运行之中	NASA/JPL/CSA	运行
EarthCARE	多普勒测云雷达	94GHz/脉冲功率 1.7kW	飞行模型已移交	ESA/JAXA	设备组装,预备 2018 年发射
EGPM	测雨雷达	35.5GHz/脉冲功率 1.0kW	工程模型已完成制造和测试	ESA	完成可行性研究
JIMO	地形测绘雷达	35.5GHz/3kW/高占空比	完成高占空比束流研制	NASA/JPL	预研
ATOMS	主动大气探测器	183GHz/连续波 5W(振荡器)	工程管已移交给 JPL	NASA/JPL	预研
MetOp-SG	表面风矢量散射仪	5.3GHz/脉冲功率 2.5kW	提交建议书	ESA/Airbus	预研
SWOT	Ka 波段雷达干涉仪	35.75GHz/脉冲功率 1.5kW	完成演示模型制造	CNES/NASAJPL/CSA	设计论证
CoReH2O	双频/双极化合成孔径雷达	X 波段/Ku 波段/脉冲功率 2.5kW	完成工程模型的制造和测试	ESA	可行性研究

2.2 主动拒止系统与反暴

毫米波主动拒止系统(Active Denial System,ADS)是上世纪 80 年代美军提出的一种新型非致命的定向能武器,主要用于维稳、反恐行动、制暴、监狱控制及反劫持行动等安保警卫.EIK 源不需要回旋管的庞大超导磁场,极大降低了系统的体积和重量,可提高系统的机

动性能.美国军方研究的一种近距离作用轻型毫米波 ADS,即采用 W 波段 EIK.图 3 为 2010 年美国洛杉矶 Pitchess 拘留中心演示的一种小型 ADS,以及它所采用的信号源^[7-9].该系统高 7.5 英尺,由 Raytheon 公司和 Sandia 国家实验室联合研制,用于制止监狱的骚乱,又被称作突击干扰设备.

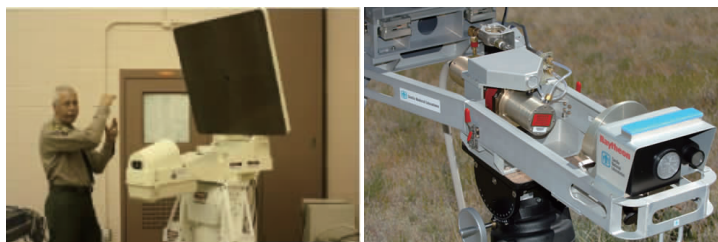


图3 美国洛杉矶Pitchess拘留中心演示的小型拒止系统和采用的信号源

2.3 DNP-NMR 动态核偏振-核磁共振谱仪

动态核极化 (Dynamic Nuclear Polarization, DNP) 是电子与核的双共振技术,它能极大增强核磁共振的灵敏度,同时还能提供分子结构和动力学的信息.为提高灵敏度和充分激发固体样品,DNP 谱仪需要毫米波及太赫兹频率,适量功率的信号源. EIK 能在几百 GHz 频率产生较大功率,结构紧凑,易于集成到现有的核磁共振谱仪中. EIK 源具有一定的带宽,因而 DNP 谱仪无需扫描磁场,适用于所有通常的自由基. 2016 年,英国 Warwick 大学和 Oxford 大学报道了其研制的采用 187GHz-EIK 源的 DNP-NRM 系统,该 EIK 最大增益 23.7dB,输出功率 9W,4dB 带宽 0.41GHz^[10];CPI 公司为美国国家卫生研究所研制了用于检查肾脏的 DNP-NMR 的信号源,该源采用了 G 波段 EIK,工作频率 264GHz,脉冲功率 20W^[11,12].

2.4 EIK 在其他方面的应用

EIK 在卫星通信、深空探测、成像等方面同样具有应用需求.例如,1996 年,CPI 公司研制出用于卫星通信的 Ka 波段 EIK,该放大器已用于美国全球广播系统的固定和移动发射装置^[13]. CPI 还研制了用于机场跑道碎片探测雷达的 W 波段 EIK,该管工作频率 94GHz,脉冲峰值输出功率 1kW,工作占空比 10%^[4];应用于太赫兹成像系统的 G 波段 EIK,该管频率为 218GHz,连续波输出功率为 5W^[14].

3 毫米波/太赫兹 EIK 研究现状

鉴于 EIK 放大器具有大功率、高效可靠、寿命长的特点,EIK 成为一种在功率和带宽方面都是极具潜质的电真空器件.自上世纪提出之日起,引起了国内外多家的研究机构的关注.主要包括美国 CPI 公司,美国海军实验室 (Naval Research Laboratory, NRL), Beam Wave Research 公司等单位.

3.1 CPI 公司

自上世纪七十年代至今,CPI 公司已经研制出一系列 EIK 以及扩展相互作用速调管振荡器 (Extended Interaction Oscillator, EIO) 产品,其 EIK 产品频率覆盖了 18GHz ~ 280GHz^[15,16]. 根据 CPI 公司的报告及网站产品

介绍,毫米波/太赫兹 EIK 的功率水平如表 2 所示. 在 W 波段,脉冲功率达到 3kW,平均功率达到 400W;在 220GHz,脉冲功率达到 100W,平均功率 5W. 目前,CPI 正在进行更高太赫兹频段 EIK 的研制工作,管型的工作频率分别为 0.35THz、0.45THz 以及 0.70THz^[4]. 同时,在 DPAPA 的太赫兹电子学计划支持下^[17],CPI 公司也在参与 0.67THz、0.85THz 以及 1.03THz EIK 的研究.

表 2 CPI 公司 EIK 产品的功率和频率水平

频率	脉冲功率	平均功率	束能
35GHz	3500W	400W	< 20keV
95GHz	3000W	400W	
140GHz	400W	50W	
183GHz	50W	10W	
220GHz	100W *	5W	
263GHz	25W	2.5W	

注: * 为 VKY2462 脉冲 EIK 产品参数^[16]

3.2 美国 NRL 及其合作单位

美国 NRL 在毫米波/太赫兹 EIK 研究方面主要是进行带状束 EIK 的研究^[18~23],他们希望采用带状电子束能将功率水平比圆形束提高一个量级.然而,带状电子束的传输存在极大的困难,主要体现在带状束存在 $E \times B$ 速度剪切,电子注会出现扭结、撕裂的 Diocotron 不稳定现象.

自本世纪初,美国 NRL 联合 Beam Wave Research 公司以及 CPI 等单位进行了 94GHz 和 220GHz 带状电子注 EIK 的研究.早在 2007 年 IVEC 上,Beam Wave Research 公司 Khanh Nguyen 报道了 94GHz 和 220GHz EIK 的计算结果^[19],但直到 2014 年 NRL 研制的 94GHz 带状注 EIK 才实现出波^[23].

图 4 为该器件的测试场景与结构图,它采用了均匀永磁聚焦方式,磁场强度达到 8.6kGs,在工作点电子注电压 19.5kV,电流 3.3A,流通率可达到 98%;电路采用了 3 腔设计,每个腔有 5 个间隙;电子束通道尺寸 5.5mm × 0.4mm,电子束截面 4.0mm × 0.32mm,电路长度 20mm;产生最大功率达到 7.7kW,饱和增益为 35dB,带宽 150MHz. 这是国际上在带状注器件及 EIK 研究方面取得的里程碑.

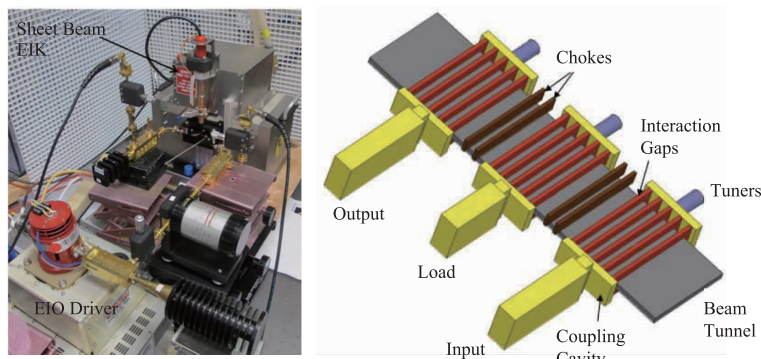


图4 NRL的94GHz-EIK的测试现场与结构示意图

2009 年 IVEC 会议上, Khanh Nguyen 报道了 220GHz-EIK 的计算结果^[20]: 高频电路采用 4 腔设计, 输入腔和输出腔采用了 8 间隙, 中间腔为 7 间隙, 槽宽仅 $75\mu\text{m}$, 如图 5 所示; 在 $16.5\text{kV}/520\text{mA}$ 带状电子束下, 产生功率 780W , 转换效率 9.1% , 但是至今未有实验结果的报道.

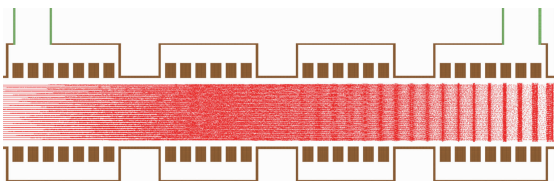


图5 4腔0.22THz-EIK模拟得到的电子束分布图

自 2009 年起, DAPAR 开展太赫兹电子学计划的研究, 该计划要求的高功率放大器的目标如表 3 所示, 器件瞬时带宽要求达到 15GHz , 选定的一条技术路线为 EIK; 拟采用多个频率偏置的相互作用腔结构, 利用多个谐振腔的束波相互作用获得高增益, 同时通过参差调频获得目标带宽. 在该计划下, 美国 NRL 与 Beam-Wave

Research 公司、CPI 等单位联合进行 0.67THz 、 0.85THz 以及 1.03THz 这 3 个频段 EIK 的研制^[17].

表 3 太赫兹电子学计划高功率放大器的研究目标

参数	阶段 1	阶段 2	阶段 3
频率/THz	0.670	0.850	1.030
功率/dBm	27	25	21
增益/dB	23	23	21
效率/%	0.75	0.50	0.20
带宽/GHz	15	15	15

2010 年, Khanh Nguyen 报道了其中 0.67THz -EIK 的设计结果^[24~27]: 电子束电压 25kV 、电流 96mA , 直径 $116\mu\text{m}$, 面压缩比 100, 设计者希望该电子枪在 0.85THz 、 1.03THz 也能使用, 并且保证在频率 1.38THz 以下能够通过 100mA 的电流; 采用 9 腔模型 (长度 $0.7''$) 得到峰值功率 1.5W , 增益 25dB , 功率 500mW 以上带宽 7.1GHz ; 采用了 6 腔模型 (如图 6 所示) 峰值功率计算结果达到 8W ^[26]. 然而, 遗憾的是至今尚无这 3 个频段 EIK 的研究进展报道.



图6 6腔0.67THz-EIK计算模型图

3.3 国内研究现状

国内研究 EIK 的主要单位有中科院电子所、中国工程物理研究院、中电 12 所、电子科技大学、北京航空航天大学等机构. 中科院电子所近年来一直在从事 X 波段和 W 波段高电压、大功率弱相对论带状注 EIK 的研究. 2014 年, 中科院电子所研制出了国内第一支带状束速调管样管, 工作于 X 波段, 其实验结果为: 在电压 123kV 、电流 70A 时, 输出功率 2.8MW , 频率 11.69GHz , 3dB 带宽 30MHz , 增益 35.96dB , 效率 32.52% ^[28]. 在 W 波段带状注 EIK 方面, 电子所已经研制出了高频工艺样管, 获得了大于 92% 的直流通过率^[29,30].

中国工程物理研究院应用电子学研究所近年来对

W 波段 EIK 开展了理论设计与实验研究工作^[31], 2015 年, 在测试中获得了脉冲功率 175W , 平均功率 5.6W , 增益 37.5dB , 3dB 带宽约 100MHz , 效率 2% 的实验结果. 图 7 为样管照片和实验测试结果.

国内其他研究单位, 如电子科技大学、北京航空航天大学近年来也有不少关于 EIK 的理论研究和计算的成果报道^[32~34]. 除此之外, 国内一些研究机构对毫米波以及太赫兹 EIO 进行了长期的研究, 取得了许多优秀的实验成果^[35~37]. 然而, 整体而言国内 EIK 以及 EIO 方面的研究相比国际水平还存在很大的差距, 目前尚未有能实用的毫米波/太赫兹 EIK 和 EIO 产品. 表 4 列出了近年来在 IVEC 国际会议上, 发表的关于 EIK 的主要研究结果.

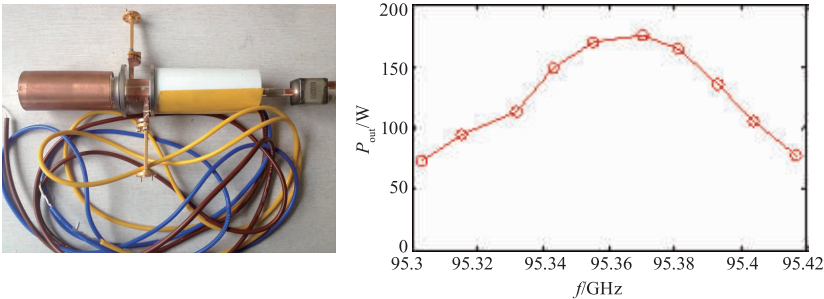


图7 中物院W波段EIK照片及测试结果

表 4 近年来 IVEC 会议上报道的主要研究机构 EIK 研究结果

No.	单位	频段	电子束	功率/增益/带宽	效率	计算/实验	文献
1	CPI,美国	W 波段	圆形束:16.2kV/580mA	2kW/56dB 250MHz(-1dB)	32%	实验	[2]
2	NRL,美国	W 波段	带状束:19.5 kV/3.76A	7.7kW @21.3kV/4.2A	18%	实验	[18]
3	微波管研发中心,印度	140GHz	圆形束:19.5kV/0.6A	1.6kW/48dB	13.67%	计算	[38,39]
4	NRL,美国	G 波段	带状束:16.5kV/520mA	453W/42.6dB	5.28%	计算	[20]
5	Beam-Wave Research, Inc.,CPI 等,美国	0.67THz	圆形束:25kV/96mA	9 腔模型:500mW/25dB7.1GHz(-3dB) 6 腔模型:8W	-	计算	[26]

4 EIK 发展的趋势

EIK 的发展趋势受太赫兹技术应用需求的牵引,与其他电真空器件如行波管、回旋管、磁控管相比,EIK 的优势主要体现为兼具功率大和结构紧凑的优点,适合作为雷达、通信、成像等系统的信号源.下面分析 EIK 未来发展的几点趋势.

4.1 大功率的需求与带状电子注的应用

受空间目标探测雷达信号源应用的牵引,要实现天地通信,特别是星载雷达目标探测,经论证需要上百瓦至上千瓦的功率水平.因此,提高 EIK 的功率是满足需求应用的必要条件.采用带状电子注能够增大电流,从而增大输出功率,同时可以适当降低阴极发射电流的密度.如前所述,美国 NRL 的研制的 W 波段带状注 EIK 功率达到 7.7kW^[19],远超过了用在 Claudsat 和 Earthcare 卫星上圆形注 EIK 2kW 的功率水平^[2],说明带状电子注在提高功率水平方面具有极大的潜力.

4.2 高频率的需求及高精密微加工工艺的应用

由于毫米波及太赫兹信号在探测成像方面具有较高的成像分辨率,因而在空间探测、雷达成像、生物检测等应用方面都希望有更高频率的毫米波/太赫兹频率信号源.例如,美国和欧洲已经在考虑下一代测云雷达采用 G 波段的信号^[4];美国在 DARPA 太赫兹电子学计划正开展 0.67THz、0.85THz、1.030THz EIK 的研制^[17].然而,计算表明:更高频率 EIK 的缝隙宽度范围达到 0.001"~0.002".这种极窄缝隙的加工已经超出了现有电火花放电(Sink EDM)工艺的能力,因而需要探索新的高精密微加工工艺.目前,UV-LIGA 工艺、高精

度慢走丝电火花放电(Wire EDM)工艺、Nano-CNC 等工艺已经在进行这方面的应用研究.

4.3 高效率的需求与降压收集极的应用

由于以天基雷达为代表的系统对整体功耗要求极高,因此要求 EIK 源必须具备较高的效率以及良好的散热可靠性.以 Claudsat 和 Earthcare 卫星用的 W 波段 EIK 为例,其电子效率为 21.3%,采用降压收集极之后整管的效率达到 32%^[2].可见,降压收集极对于提高整管的效率、满足系统应用具有重要的作用.在更高频段,EIK 的电子效率仅在 10% 以下,收集极及管体上的功率耗散量远大于输出功率.因此,为降低功耗水平,满足系统的整体要求,必然需要降压收集极.

除此之外,在阴极材料上,采用新型的阴极材料和新工艺,如钨酸盐阴极、纳米粒子薄膜阴极等,研制稳定的、长寿命大发射电流密度的阴极也是 EIK 乃至整个电真空器件领域研究的热点.EIK 的高频结构一直采用梯形结构,但从 2017IVEC 会议上获悉,美国麻省理工大学的研究人员将光子晶体带隙(PBG)结构引入到 EIK 高频结构中,PBG 结构可以保证正常的工作模式,同时可以增大束流通道,降低束流密度和磁场强度^[40];此外,为进一步提高 EIK 的功率,也有研究机构在研究采用过模高频结构^[41].

5 EIK 发展的技术难点

本部分作者从 EIK 研制的角度,根据系统对毫米波及太赫兹 EIK 的技术要求,分析目前 EIK 研制中遇到的主要具体的难点问题,并介绍相应的一些研究进展.

5.1 阴极技术

为产生较高的功率(如 W 波段千瓦量级, G 波段百瓦量级), 毫米波及太赫兹 EIK 需要上百毫安的电流, 而电子束通道尺寸在亚毫米量级, 因此在高频结构内部电流密度达到几百 A/cm^2 . 考虑到电子枪有限的压缩比, EIK 需要的阴极发射电流密度是常规微波电真空器件电流发射密度的几倍. 因而, 对阴极的发射能力、可靠性和寿命提出了较高的要求.

目前在电真空中, 使用的主流阴极是覆膜阴极, 金属薄膜可降低阴极的逸出功, 提高阴极的发射性能. 但是, 覆膜阴极却存在工作温度高、发射材料蒸发大、加热用的热子承受寿命短等问题. 目前国际上研究比较热门的浸渍钨酸盐阴极能够解决这些问题, 并能极大提高发射电流密度. 中电 12 所采用溶胶-凝胶法制备出平均粒径 450nm 的含钨扩散阴极, 在 1050oC, 重复频率 200Hz, 脉宽 10 μs 下得到了超过 100A/ cm^2 的脉冲发射电流密度, 该阴极已经应用于美国 DARPA HiFive 项目第一支 220GHz 带状注折叠波导行波管 (Folded Wave Guide Travelling-Wave Tube, FWG-TWT). 经过用带状电子枪分析仪测试, 20kV 脉冲电压下, 最大电流 420mA, 截面 0.00747 cm^2 (614 $\mu\text{m} \times 1550\mu\text{m}$ 椭圆阴极), 电流密度达到了 56.2A/ cm^2 [42].

5.2 带状电子注的产生与传输

由于 Diocotron 不稳定性和极窄的传输通道, 带状电子束的成形和传输更加困难. 虽然带状电子束的概念早在 1938 年就提出来了, 但直到 2009 年才在实验上有所突破. 在低频段, 2009 年, CPI 研制成功了首支 X 波段具有高频输出功率的带状注速调管, 其设计输出功率为 5MW, 但由于束流通过率仅为 63% 左右, 最后只获得了 2.67MW 的功率输出[43]; 2010 年, UC-Davis 研制出了首支 W 波段具有高频输出的带状注速调管, 其设计输出功率为 50kW, 采用 PCM 聚焦, 直流通过率达到了 92% 左右, 最终得到的功率约为 30kW[44]. 而在毫米波/太赫兹 EIK 方面, 美国 NRL 是经过多年的带状注光学系统研制突破的基础上, 才研制出 7.7kW 的 W 波段 EIK[18].

5.3 加工工艺

毫米波/太赫兹 EIK 的特征尺寸, 如谐振腔缝隙间隙、电子束通道、耦合孔等尺寸达到亚毫米量级甚至微米量级. 在太赫兹频段, 谐振腔的尺寸 1 个微米的偏差, 会造成谐振频率上百 MHz 的偏移. 谐振腔狭窄间隙的角边需要保证极好的直角特征. 因此, 尺寸公差必须控制在微米量级甚至亚微米量级, 通常的精密加工手段已达不到这样的精度. 近年来, 伴随着太赫兹电真空器件的研究, 各种微加工工艺得以试验. 目前, LIGA、Wire DEM、Nano-CNC、DRIE 等先进微加工技术已经应

用到了太赫兹器件的加工中, 精度也达到了微米/亚微米量级, 尤其是 UV-LIGA 技术已成为太赫兹电真空器件加工有效的方法之一[45-47], 目前已经加工出了 0.67THz-EIK 梯形谐振腔结构以及 233GHz FWG-TWT 和 1.03THz FWG-TWT.

5.4 微型多腔高精度调谐结构

毫米波及太赫兹 EIK 的调频结构的难点主要体现在: 首先, 如果按照通常的机械调谐结构(如调频活塞、调频螺钉等)同比缩小设计, 同时考虑到强磁场系统内部空间的限制, 各谐振腔调谐机构的结构尺寸非常微小, 导致其机械强度大大降低, 自身的受力形变使调频功能失效; 其次, 在高频下谐振腔微米量级的尺寸变化会导致上百 MHz 量级的频偏, 因而谐振腔调频结构又必须保证能具有较高精度的尺寸调节功能; 第三, 调谐结构必须保证焊接工艺的可实现性和可靠性. 因此, EIK 调频机构在设计和空间排布上必须进行精密的结构设计、试验新的金属弹性材料和焊接工艺, 以实现在紧凑空间内多个腔体的高精度调谐功能.

5.5 增加带宽

近年来, 毫米波及太赫兹技术应用方面, 如雷达探测、宽带通信、主动式成像等, 要求带宽达到几个 GHz 至十几个 GHz[17]. EIK 很难达到这种程度的带宽, 在一定程度上限制了 EIK 的应用. 采用重叠模、多腔参差调谐、长短槽双周期梯形结构是增加 EIK 带宽的主要技术手段. 例如, CPI 公司研制的宽带 W 波段 EIK, 即采用了长短槽双周期结构和重叠模谐振腔技术, 3dB 带宽达到了 2.25GHz[13], 峰值功率 930kW (占空比 10%). 但是, 从现有 W 波段及以上频率 EIK 的实验结果或设计仿真结果分析[13, 26], EIK 的相对带宽也仅能达到 1% ~ 2% 范围, 仍然比较有限. 同时, 如果在增加带宽时又有功率要求, 则增加了 EIK 的设计难度. 因此, 增加 EIK 带宽需要研究新的技术途径.

除了上述的几个主要难点外, 毫米波及太赫兹 EIK 的技术难点还包括小尺寸大容量输能窗组件的制备, 高强度磁场的设计和装配, 整管的焊接工艺等方面.

6 EIK 面临的挑战

EIK 最大的优势在于相比同等参数下的行波管(包括传统速调管)器件具有明显的功率优势, 如在 Ka 波段及 W 波段, EIK 的功率水平都远高于行波管. 但是, 目前, 在 G 波段以上频段, EIK 的功率优势并不明显. 折叠波导行波管或交错双栅行波管的功率已经接近同频率下 EIK 的功率水平. 例如, 2015 年, UC-Davis 报道的 220GHz 带状注交错双栅结构行波管, 功率水平达到了 80W ~ 100W, 带宽 2.5GHz[48]; 2016 年, 美国 Northrop Grumman 公司报道的 233GHz FWG-TWT, 在 232.6GHz

~234.6GHz 频率范围内,功率水平超过了 79W^[49]。

在太赫兹更高的频段方面,如前所述的美国 DA-PAR 太赫兹电子学计划,它的另一条技术路线是采用 FWG-TWT,由 Northrop Grumman 公司承担 0.67THz、0.85THz、1.03THz 这 3 个频段 FWG-TWT 的研究。目前,采用 EIK 技术路线的研究从 2010 年后尚无相关进展报道,而 Northrop Grumman 公司已经研制出了这 3 个频段的 FWG-TWT 样管,功率分别为 79mW、39mW 和 29mW^[50]。

除面对太赫兹 FWG-TWT 的挑战外,目前太赫兹空间谐波磁控管的研究也有较大的进展。2016 年,英国伦敦大学 Mary Queen 学院陈晓东团队报道了空间谐波磁控管的进展情况,他们研制的 95GHz 磁控管样管,脉冲功率达到了大于 5kW,脉宽 50ns ~ 200ns,重频 2.5 ~ 10kHz,工作寿命做到了大于 5000 小时;210GHz 磁控管样管测试功率达到 1.1kW;300GHz 空间谐波磁控管也在建模设计中。预计未来磁控管在太赫兹雷达发射机、电子对抗等方面和 EIK 会存在一定的“竞争”。

尽管在高频段上 EIK 目前的研究进度比较缓慢,但是 EIK 作为谐振型器件,在功率输出和稳定性方面,尤其在 Ka 波段及 W 波段,仍然具有行波管等其他器件无法比拟的技术优势。因此,一旦在高频段 EIK 的技术难点实现突破,EIK 的应用前景也将非常广阔。

7 结束语

作者对 EIK 的应用需求和发展水平现状进行了较为详细的调研,说明了该类型器件在毫米波/太赫兹技术研究中的科学价值和良好的应用前景;同时,对毫米波/太赫兹 EIK 的发展趋势、技术难点和面临的挑战进行了技术分析。目前,EIK 在空间探测方面的应用需求尤为突出,而我国在 EIK 的研究上还相对落后,许多系统设备和科研的开展还只能依赖进口 EIK 产品。因此,早日研制出国产可实用的 EIK,将提高我国尖端科技装备的国产化水平,掌握核心技术,为推动我国毫米波及太赫兹技术的发展起到关键的促进作用。

参考文献

- [1] CHODOROW M, WESSEL-BERG T. A high-efficiency klystron with distributed interaction[J]. IRE Transactions on Electron Devices, 1961, 1(2): 44 – 55.
- [2] Albert ROITMAN, Dave BERRY, Brian STEER. State-of-the-art W-band extended interaction klystron for the cloudsat program[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2005, 52(5): 895 – 898.
- [3] Anne MANNING. Happy 10th Birthday, Cloudsat: Celebrating an Impressively Long Mission[OL]. <http://cloudsat.atmos.colostate.edu/home>, 2016-04-27/2017-06-10.
- [4] Ross MACHATTIE. mmW Products[R]. Productor Report of Communications & Power Industries LLC, 2015.
- [5] Alain LEFEBVRE, Arnaud HÉLIÈRE, Abelardo Pérez ALBIÑANA, et al. EarthCARE mission, overview, implementation approach development status[A]. Earth Observing Missions and Sensors: Development, Implementation, and Characterization III (Vol. 9881)[C]. New Delhi, India: SPIE, 2016. DOI: 10.1117/12.2223955.
- [6] Marcello GAMBARARA, Alberto BATTISTI, Marco CANTAMESSA, et al. High power 94GHz amplifier for EarthCARE mission Doppler radar[A]. IEEE International Vacuum Electronics Conference[C]. Rome, Italy: IEEE, 2009. 319 – 320.
- [7] Noah SHACHTMAN. Pain Ray, Rejected by the Military, Ready to Blast L. A. Prisoners[OL]. <https://www.wired.com/2010/08/pain-ray-rejected-by-the-military-ready-to-blast-l-a-prisoners/>, 2010-08-24/2017-06-10.
- [8] Wired STAFF. Slideshow: Say Hello to the Goodbye Weapon[OL]. <https://www.wired.com/2007/01/72134/>, 2007-05-01/2017-06-10.
- [9] John ADAMS. New “Laser” Weapon Debuts in LA County Jail[OL]. <https://www.nbclosangeles.com/news/local/New-Laser-Weapon-Debuts-in-LA-County-Jail-101230974.html>, 2010-08-23/2017-06-10.
- [10] Thomas FKEMP, Hugh R W DANNATT, Nathan S BARROW, et al. Dynamic nuclear polarization enhanced NMR at 187GHz/284MHz using an extended interaction klystron amplifier[J]. Journal of Magnetic Resonance, 2016, 265(1): 77 – 82.
- [11] STEER B, HOROYSKI P, ROITMAN A, et al. A 263GHz 10 watt pulsed extended interaction klystron amplifier[A]. The 38th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)[C]. Mainz, Germany: IEEE, 2013. DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2013.6665706.
- [12] Horoyski PETER, Roitman ALBERT, Dobbs RICHARD, et al. Compact sources of high RF power for DNP applications[A]. IEEE International Vacuum Electronics Conference[C]. Monterey, USA: IEEE, 2014. 221 – 222.
- [13] Brian STEER, Albert ROITMAN, Peter HOROYSKI, et al. Advantages of extended interaction klystron technology at millimeter and sub-millimeter frequencies[A]. The 16th IEEE International Pulsed Power Conference[C]. Albuquerque, USA: IEEE, 2007. 1049 – 1053.
- [14] PATRICK M A, HOLT J A, JOYE C D, DE-LUCIA F C. Range resolved mode mixing in a large volume for the mitigation of speckle and strategic target orientation requirements in active millimeter-wave imaging[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2015, 32(4): 637

- 646.
- [15] BRIAN S, ALBERT R, PETER H, MARKH. Millimeter-wave extended interaction klystrons for high power ground, airborne and space radars [A]. The 41st European Microwave Conference [C]. Manchester, UK: IEEE, 2011. 984 - 987.
- [16] EIK-Pulsed Extended Interaction Klystron [OL]. <http://www.cpii.com/product.cfm/4/40/158>, 2017-06-10.
- [17] ALBRECHT J D, ROSKER M J, WALLACE H B, CHANG T. THz electronics projects at DARPA: Transistors, TMICs, and amplifiers [A]. IEEE MTT-S International Microwave Symposium [C]. Anaheim, USA: IEEE, 2010. 1118 - 1121.
- [18] John PASOUR, Edward WRIGHT, Khanh T NGUYEN, et al. Demonstration of a multikilowatt, solenoidally focused sheet beam amplifier at 94 GHz [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2014, 61 (6): 1630 - 1636.
- [19] NGUYEN Khanh T, PERSHING Dean, WRIGHT Edward L, et al. Sheet-beam 90 GHz and 220 GHz extend-interaction-klystron designs [A]. The 8th IEEE International Vacuum Electronics Conference [C]. Kitakyushu, Japan: IEEE, 2007. 193 - 194.
- [20] Khanh TNGUYEN, John PASOUR, Edward L WRIGHT, et al. Design of a G-band sheet-beam extended-interaction klystron [A]. IEEE International Vacuum Electronics Conference [C]. Rome, Italy: IEEE, 2009. 298 - 299.
- [21] John PASOUR, Khanh NGUYEN, Thomas ANTONSEN, et al. Solenoidal transport of low-voltage sheet beams for millimeter wave amplifiers [A]. IEEE International Vacuum Electronics Conference [C]. Rome, Italy: IEEE, 2009. 301 - 302.
- [22] John PASOUR, Edward WRIGHT, Khanh NGUYEN, et al. Sheet beam extended interaction klystron (EIK) in W band [A]. IEEE 14th International Vacuum Electronics Conference [C]. Paris, France: IEEE, 2013. DOI: 10. 1109/IVEC. 2011. 5746888.
- [23] John PASOUR, David ABE, Khanh NGUYEN, et al. Multi-kW sheet beam amplifiers at Ka and W bands [A]. IEEE International Vacuum Electronics Conference [C]. Monterey, USA: IEEE, 2014. 19 - 20.
- [24] Khanh NGUYEN, Edward WRIGHT, Vadim JABOTINSKI, et al. Design of terahertz extended interaction klystrons [A]. IEEE International Vacuum Electronics Conference [C]. Monterey, USA: IEEE, 2010. 327 - 328.
- [25] David CHERNIN, Alex BURKE, Igor CHERNYAVSKIY, et al. Extended interaction klystrons for terahertz power amplifiers [A]. IEEE International Vacuum Electronics Conference [C]. Monterey, USA: IEEE, 2010. 217 - 218.
- [26] Dobbs RICHARD, Roitman ALBERT, Horoyski PETER, et al. Design and fabrication of terahertz extended interaction klystrons [A]. The 35th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves [C]. Rome, Italy: IEEE, 2010. DOI: 10. 1109/PLASMA. 2010. 5533941.
- [27] RICHARD Dobbs, ALBERT Roitman, PETER Horoyski, et al. Fabrication techniques for a THz EIK [A]. IEEE International Vacuum Electronics Conference [C]. Monterey, USA: IEEE, 2010. 181 - 182.
- [28] DING Zhao, XI Lu, YUAN Liang, et al. Researches on an X-band sheet beam klystron [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2014, 61 (1): 151 - 158.
- [29] 陈姝媛, 等. W 波段带状注扩展互作用速调管注波相互作用系统 [J]. 红外与毫米波学报, 2015, 34 (2): 230 - 235.
- CHEN Shu-yuan et al. Interaction system of W-band sheet beam EIK [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2015, 34 (2): 230 - 235. (in Chinese)
- [30] 阮存军, 等. W 波段带状注速调管电子光学及注波相互作用系统 [J]. 红外与毫米波学报, 2012, 31 (6): 510 - 516.
- RUAN Cun-jun, et al. The electron optics system and beam-wave interaction for novel W-band sheet klystron [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2012, 31 (6): 510 - 516. (in Chinese)
- [31] ZENG Zaojin, ZHOU Lin, LI Wenjun, et al. Design and optimization of a W-band extended interaction klystron amplifier [A]. The 16th IEEE International Vacuum Electronics Conference [C]. Beijing, China: IEEE, 2015. DOI: 10. 1109/IVEC. 2015. 7224048.
- [32] ZHANG Changqing, RUAN Cunjun, WANG Shuzhong, et al. The circuit design and particle-in-cell simulation for W-band high-power extended interaction klystron [A]. IEEE 14th International Vacuum Electronics Conference [C]. Paris, France: IEEE, 2013. 19 - 20.
- [33] LI Shi-feng, DUAN Zhao-yun, WANG Fei, et al. Simulation study of a W-band broadband extended interaction klystron [A]. The 17th IEEE International Vacuum Electronics Conference [C]. Monterey, USA: IEEE, 2016. DOI: 10. 1109/IVEC. 2016. 7561950.
- [34] LI Ren-jie, RUAN Cun-jun. Study of a rectangular beam extended interaction klystron in G-band [A]. The 18th IEEE International Vacuum Electronics Conference [C]. London, UK: IEEE, 2017. DOI: 10. 1109/IVEC. 2017. 8289593.
- [35] 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)
- [36] 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. Reseach of THz folded waveguide oscillator in terahertz band radiation source[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(12): 2677–2688. (in Chinese)
- [37] LIU Wenxin, ZHAO Chao, LI Ke, et al. Two-section folded-waveguide slow-wave structure for terahertz extended interaction oscillation[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2014, 61(3): 902–908.
- [38] Vemula BhanuNAIDU, Subrata Kumar DATTA, Lalit KUMAR. Two cavity W-band sheet beam extended interaction klystron simulation[A]. IEEE 14th International Vacuum Electronics Conference[C]. Paris, France: IEEE, 2013. DOI: 10. 1109/IVEC. 2013. 6571133.
- [39] Vemula BhanuNAIDU, Subrata Kumar DATTA, Lalit KUMAR. Design study of multi-gap cavity and particle simulation of a sub-millimeter frequency EIK[A]. IEEE 16th International Vacuum Electronics Conference[C]. Beijing, China: IEEE, 2015. S6. 6.
- [40] Jacob CSTEPHENS, Guy ROSENZWEIG, Michael A SHAPIRO, et al. Design of a 94GHz photonic bandgap based extended interaction klystron amplifier[A]. The 18th IEEE International Vacuum Electronics Conference[C]. London, UK: IEEE, 2017. DOI: 10. 1109/IVEC. 2017. 8289729.
- [41] YIN Yong, WANG Bin, ZHANG Tianzhong, et al. Design and analysis of a multiple-beam extended interaction oscillator with coaxial structure[A]. The 18th IEEE International Vacuum Electronics Conference[C]. London, UK: IEEE, 2017. DOI: 10. 1109/IVEC. 2017. 8289735.
- [42] ZHAO Jinfeng, Diana GAMZINA, LI Na, 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.
- [43] CUSICK M, ATKINSON J, BALKCUM A, et al. X-band sheet beam klystron (XSBK) [A]. IEEE International Vacuum Electronics Conference[C]. Rome, Italy: IEEE, 2009. 296–297.
- [44] SHIN Young-Min, WANG Jian-Xun, Larry R BARNETT, et al. Particle-in-cell simulation analysis of a multicavity W-band sheet beam klystron[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2011, 58(1): 251–258.
- [45] Colin DOJYE, Alan M COOK, Jeffrey P CALAME, et al. Demonstration of a high power, wideband 220GHz traveling wave amplifier fabricated by UV-LIGA[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2014, 61(6): 1672–1678.
- [46] JOYE Colin D, COOK Alan M, CALAME Jeffrey P, et al. Microfabricated 233GHz traveling wave amplifier[A]. IEEE International Vacuum Electronics Conference[C]. Monterey, USA: IEEE, 2016. DOI: 10. 1109/IVEC. 2016. 7561804.
- [47] TUCEK Jack C, BASTEN Mark A, GALLAGHER David A, et al. Operation of a compact 1.03THz power amplifier[A]. IEEE International Vacuum Electronics Conference[C]. Monterey, USA: IEEE, 2016. DOI: 10. 1109/IVEC. 2016. 7561772.
- [48] LUHMANN N C. Advances in microfabricated millimeter wave and THz vacuum electronic devices and their applications[A]. IEEE International Vacuum Electronics Conference[C]. Beijing, China: IEEE, 2015. DOI: 10. 1109/ICIMW. 2010. 5612980.
- [49] BASTEN M A, TUCEK J C, GALLAGHER D A, et al. 233 GHz high power amplifier development at northrop grumman[A]. IEEE International Vacuum Electronics Conference[C]. Monterey, USA: IEEE, 2016. DOI: 10. 1109/IVEC. 2016. 7561775.
- [50] Jack C TUCEK, Mark A BASTEN, David A GALLAGHER, et al. Operation of a compact 1.03THz power amplifier[A]. IEEE International Vacuum Electronics Conference[C]. Monterey, USA: IEEE, 2016. DOI: 10. 1109/IVEC. 2016. 7561772.

作者简介



胡林林 男, 1979 年 7 月出生, 湖北荆州人. 副研究员. 2003 年毕业于西安电子科技大学电子工程学院, 2006 年在中国工程物理研究院获无线电物理硕士学位. 研究方向为太赫兹电真空器件.
E-mail: 9970244@qq.com



曾造金 男, 1988 年 3 月出生, 四川自贡人. 硕士. 2014 年毕业于电子科技大学物理电子学院, 现主要从事毫米波及太赫兹电真空器件方面的研究.
E-mail: zengzaojin@163.com