

太赫兹行波管的研究进展

张 章

(西华师范大学物理与电子信息学院, 四川 南充 637002)

摘 要:太赫兹行波管具有输出功率高、频带宽、紧凑轻便等优点,是一种理想的太赫兹辐射源,可望在军事、民用领域得到广泛应用。本文对国内外太赫兹行波管的研究现状进行了较详细的介绍和归纳总结,并对其发展趋势做了论述分析。

关键词:行波管;太赫兹源;高功率;微加工

中图分类号:TN129 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2012.03.003

Research progress of THz traveling wave tubes

ZHANG Zhang

(College of Physics and Electronic Information, China West Normal University, Nanchong 637002, China)

Abstract: THz traveling wave tubes have the virtue of high power radiation, broad band and portability. They have broad potential applications in military, civil areas as ideal THz radiation sources. This paper introduces in detail the recent development and status of THz traveling wave tubes, and gives remarks on the developing trend of THz traveling wave tubes.

Key words: traveling wave tubes; THz sources; high power; microfabrication

1 引 言

太赫兹辐射源的研究是太赫兹技术发展的重要环节。产生太赫兹波(频率0.1~10 THz)的主要器件可分为基于半导体、基于光子学和基于真空电子学的三类太赫兹辐射源,它们的性能各具特色,在不同应用领域各有所长^[1-4]。基于真空电子学的太赫兹辐射源最大优势在于功率高,行波管作为其中的一个经典门类,兼具宽频带,不需强磁场,器件体积较小、质量较轻,成本相对较低等特色^[5-8],必然成为研究太赫兹真空辐射源的重要分支。

由于目前雷达、精确制导、电子对抗、空间通信以及探测、医学成像、宇宙射线研究等领域对大功率、紧凑型、低成本、宽带太赫兹源的迫切需求^[9-11],针对太赫兹行波管的研究引起了国内外广泛关注。美国军方、国家航天局、能源部,我国的自然科学基金等都对此进行了投入,美国的 DAPRA 计划^[10,12-13]、欧洲的 OPTHER 计划等也都含有对其的重要研究项目^[9]。目前,国外开展此类器件设计

及其关键技术研究的单位主要有美国的 NGC 公司、CCR 公司、海军实验研究所(NRL)、戴维斯加州大学、威斯康星大学、Los Alamos 国家实验室等,以及印度、韩国、意大利、法国等的一些研究团队;国内则主要有中国科学院电子学研究所、中国电子科技集团公司第十二研究所和电子科技大学等单位。

由于太赫兹行波管是从微波波段发展起来的,所以目前的研究还主要集中在太赫兹频段的低端,而 W 波段作为过渡区也是研究的重点。面对传统行波管向高频率、高功率发展时将面临尺寸共渡效应所带来的器件尺寸过小、难于加工以及脉冲缩短^[14]、功率密度难以进一步提高等问题^[15],国内外学者进行了诸多探索以期改善、克服,归纳起来主要从以下方面着手:

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 60901021)资助。

作者简介:张 章(1976-),女,讲师,硕士,主要研究方向为行波管 CAD 仿真与设计,新型毫米波,太赫兹源器件的研究。E-mail: yujiazz@163.com

收稿日期:2011-07-05; **修订日期:**2011-07-20

(1)采用先进的微加工技术,确保结构尺寸的精确度和表面光洁度,这是传统行波管工作频率上升到太赫兹后需要解决的首要问题。要实现行波管工作频率在太赫兹频段从低到高的逐步拓展,现有微加工技术必须实现同步发展^[8,16-17]。目前针对MEMS技术、深刻电铸成型LIGA技术、深X射线光刻DXRL技术、深反应离子刻蚀DRIE技术、SU8远紫外曝光技术、微电火花加工Micro-EDM技术等用于太赫兹行波管的研发正在进行中。

(2)采用横向电子连续分布的带状电子束或不连续分布的多电子注来缓解尺寸共渡效应的负面影响,提高输出功率。这包括对平板型太赫兹行波管和多电子注太赫兹行波管的研发。

(3)将新的工作概念引入传统行波管,从另一角度实现从毫米波行波管到太赫兹行波管的顺利过渡。如利用全介质光子晶体作为慢波结构改善色散特性、方便加工;通过调节传统慢波结构尺寸或在传统慢波结构上添加光子晶体、损耗媒质等方法利用高次模工作来增大器件尺寸、增加功率容量等。

下面,我们就从这一角度出发,结合行波管核心部件——慢波结构的不同,对现有太赫兹行波管的研究进行分类介绍。

2 太赫兹折叠波导行波管

相对其他种类行波管工作频率上升到太赫兹后慢波结构难于精加工的缺点,它的突出优势在于结构简单,能与现代微加工技术相结合。微加工技术的发展,是其在太赫兹频段实现从低频端到高频端扩展的关键。

此类行波管在运行机理上没有引入新的概念,整管结构如图1所示^[18]。其慢波电路可由两块经微加工技术得到的平面全金属结构键合而成,以形成沿轴线方向按一定周期排列的弯曲波导(结构如图2所示^[19])。由于兼具功率容量较大、宽带性能良好、与外电路的耦合结构简单、体积小、质量轻、机械强度高、高频损耗较小、散热效果好等优点,目前已成为最具发展潜力的低成本、小型化、宽带大功率太赫兹辐射源,也是行波管作为太赫兹辐射源迄今研究最多、最深入的理想器件。

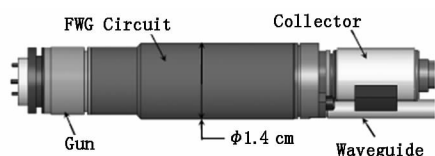


图1 太赫兹折叠波导行波管的整管结构示意图

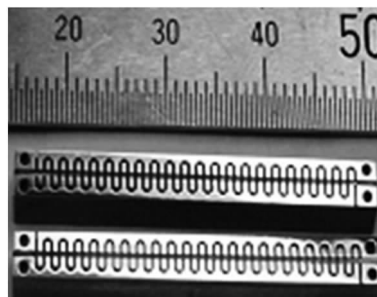


图2 太赫兹折叠波导行波管的慢波结构示意图

近几年来,美国的NGC公司对0.1~1 THz的折叠波导行波管进行了大量研究^[13]。在2007年成功加工了一支工作频率在0.6~0.675 THz的折叠波导行波管,当工作比为1%时输出功率达到16 mW,这一结果高于该频段所有源当时能够达到的功率^[20];2008年优化、加工后的样管又提高到在工作比3%、频率0.656 THz时可输出52 mW的功率^[18];最新的模拟优化研究则表明,电子注9.34 kV,2.5 mA,电路长度2.2 cm时,其可望进一步提高到输出92 mW、增益22 dB、带宽52 GHz的效果,目前加工、测试正在进行之中^[13]。2010年,NGC为实现在0.22 THz输出50 W连续波、增益大于30 dB的目标,又提出一种基于功率合成的5注折叠波导行波管(其结构如图3所示)^[21]。这种多注排列方式,降低了单注的电流密度和热负载,同时却维持了整体所需要的大电流,保证了所需的高输出功率。目前器件的加工正在阿贡实验室等单位进行。

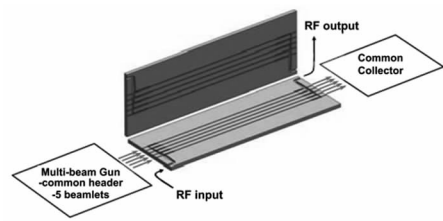


图3 NGC公司的5注折叠波导行波管

同样是为了在0.22 THz得到高的输出功率,2010年美国的NRL提出另一种全新概念的三注0.22 THz紧凑、高增益折叠波导行波管(结构如图4所示)^[22]。此法很好解决了要达到所需增益带宽目标,单注注通道所需长度较长、难于加工,电子注自身也难于长距离顺利通过截面微小的注通道等问题。Magic粒子模拟表明,采用这种新型结构,利用三个100 mA,20 kV、直径约100 μm的电子注,慢波电路仅需1.5 cm长,就可在0.22 THz得到73 W的峰值输出、42 dB的饱和增益、50 GHz的-3 dB带

宽;同种情况下,如只用一个电子注,慢波电路则需约5 cm长。

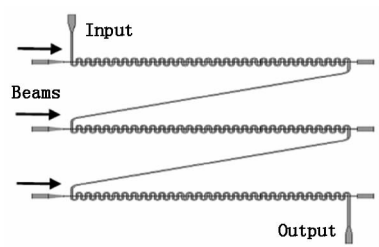


图4 NRL的3注折叠波导行波管

美国的CCR公司对工作频率为0.18 THz, 0.4 THz的折叠波导行波管也在进行研究,其中包括对器件加工工艺的研发^[23]。

此外,美国National Aeronautics and Space Administration的研究者为提高0.4 THz的折叠波导行波管的耦合阻抗还提出在其慢波电路上开孔或槽的一系列办法,具体研究正在进行中^[24]。

2010年,白俄罗斯的研究者简要报道了对0.6~3 THz折叠波导行波管频率特性的研究,他们给出了描述其慢波电路的数学模型,研究了结构参数改变对频率特性的影响^[25]。预期能在0.6~3 THz得到30~40 dB增益、5~18 W的输出。

印度、韩国等针对0.1 THz, 0.3 THz等频段折叠波导行波管的加工、设计、研制也一直在进行中^[26-27]。

2009年,厦门大学和挪威大学的研究者联合报道了对0.22 THz和0.4 THz两只折叠波导行波管的一系列研究。他们利用软件对器件进行了详细的粒子模拟分析、参数优化^[28-29],针对加工精度对器件运行性能的影响也进行了讨论,并采用两种相速渐变的方法得到0.22 THz输出73.4 W、带宽达20 GHz的较好效果^[30]。针对0.4 THz时因圆柱型注通道长、细小,加工难、注通过难的特点,对采用方形注通道的情况进行了对比研究^[31]。结果表明,方形注通道虽目前加工更为可行,但所得输出性能并不理想,故仍需在采用圆柱型通道上下功夫。

国内,中国电子科技集团公司第十二研究所、电子科技大学以及山东大学、北京大学、应用物理与计算数学研究所等众多研究团队也对折叠波导行波管进行了一系列理论与实验研究。大功率微波电真空器件技术国防科技重点实验室作为研究这一方向的主力军,做了大量工作。他们利用精密电火花切割工艺得到了国内首支W波段折叠波导连续波行波管样管^[16],2010年的报道表明其在0.092~

0.096 THz可以测得10 W的连续波输出^[6];对0.14 THz, 0.56 THz两种折叠波导行波管的慢波电路尺寸进行了初步模拟设计^[6,23,32],2010年报道的0.14 THz折叠波导行波管模拟预测能得到7.5 GHz的3 dB带宽、34.5 W的最大输出功率、25.4 dB饱和增益^[33];由于趋肤效应,金属的损耗会随频率的增大而增加,在太赫兹频段此现象日益凸显,因此他们还专门针对0.22 THz行波管的衰减特性进行了理论分析与模拟^[34];为满足不同领域的应用需求,他们还提出介质加载、脊加载、槽加载等多种变形结构来改善折叠波导行波管输出功率和带宽,为日后进一步提高太赫兹折叠波导行波管的性能打下了基础。由于太赫兹折叠波导行波管宽带运行时易产生返波振荡,应用物理与计算数学研究所的研究者对此专门进行了计算研究^[35]。

3 太赫兹平板型行波管

这里我们把使用带状注的太赫兹行波管称为平板型太赫兹行波管。之所以在太赫兹频段提出此类行波管,其原因主要在于^[12,19,36]:①平板结构的慢波结构,便于利用数控平面或现代微加工技术制造,能降低成本、简化生产;②采用带状注可以克服常规圆柱形电子注行波管已基本达到功率极限的问题。带状注只在一个方向上要求具有小尺度以与其中的高频波长相匹配,而在另一方向上则可以选择较大的尺寸来满足器件的输出功率要求。这突破了空间电荷力对强流束的限制,降低了对几何特征尺寸的依赖,相同功率下,可以大大减小电场的强度,从而降低器件被击穿的危险。因此,提高了注波相互作用效率和功率容量;③由于带状注空间电荷力相对较小,降低了高功率所需强流电子注的电流密度,从而降低了对聚焦磁场、工作电压的要求,为减轻器件的体积、质量,降低成本以及工程实用化提供了可能。

虽然带状注器件的发展最早可追溯到1938年,但此后数十年却没有得到进一步发展,直到本世纪才又重新得以关注和深入研究。目前,对此类器件的几个关键性研究包括:如何获得长距离稳定传输且高质量的带状电子注?由于带状注器件为非轴对称过模结构,如何抑制不需要的模式?如何建立带状注电子光学系统以及注波相互作用系统的三维仿真技术?如何提高加工工艺?这些问题如能得以很好解决,平板型行波管在太赫兹频段将有很大发展空间。

根据平板型行波管慢波结构的不同,我们做以下分类介绍。

3.1 太赫兹矩形栅行波管

其慢波结构为全金属构造,具体结构如图5所示^[37],在金属平板上通过刻槽即可得到,可以是单面的、也可以是双面的。它的性能优势是单位长度下的增益高、热传导性能好、功率高、制备相对容易,不足是带宽相对较窄。

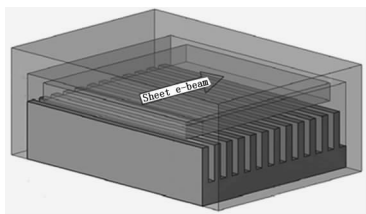


图5 太赫兹矩形栅行波管的慢波结构示意图

美国的 Los Alamos 国家实验室开展了对 95 ~ 300 GHz 带状电子注的实验研究和矩形栅慢波电路设计工作^[36]。配合 120 kV, 20 A 的带状电子注, 模拟得到可在 W 波段产生 500 kW 的峰值输出功率, 整管效率超过 50%^[38]。2010 年 NRL 报道了其团队对 0.22 THz 矩形单栅带状注行波管进行的研究^[37]。预期能输出 50 W 连续波功率, 峰值饱和功率达到 33 dB/cm, -3 dB 带宽为 0.5 GHz。对加工工艺的研究, 包括对 UVLIGA 和 DRIE 这两种微加工技术的使用。

2009 年, 意大利学者针对矩形单栅带状注行波管进行了解析模型分析和灵敏度分析, 并以工作于 0.99 THz 的具体器件为例进行了讨论^[39]。

近年来, 国内对矩形栅行波管的研究则主要集中在基础理论上, 包括慢波电路、注波相互作用、电子光学系统等, 并非专门针对太赫兹作为工作频段。研究团队主要在电子科技大学、山东大学等。其中, 电子科技大学对矩形栅行波管的理论研究已较为全面、深入, 实验研究正在跟进之中。

3.2 太赫兹交错双栅行波管

具体结构如图6所示^[40], 显然, 它与矩形双栅慢波电路的不同主要在于由上下两面的栅与栅对齐变成了栅与槽对齐。这种结构的优势在于功率大、宽带、低耗。

美国戴维斯加州大学正在研发微加工的 0.22 THz 交错双栅带状注行波管, 研究内容主要包括长寿命、大电流密度阴极, 大纵横比带状电子注, 高效慢波结构等。2009 年他们报道的模拟结果预期有 12 dB/cm 的增益, 3% ~ 5.5 % 的饱和转化率,

150 ~ 275 W 的峰值输出功率^[40]。2010 年, 又报道了对阴极、电子枪以及样品加工的研究, 冷测和优化正在进行中^[41-42]。预期其连续波输出可达 50 W, 热带宽大于 20 GHz。

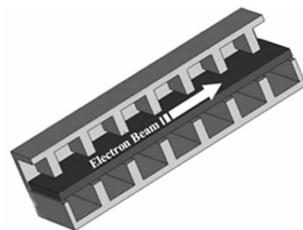


图6 太赫兹交错双栅行波管的慢波结构示意图

3.3 太赫兹微带型行波管

微带型行波管慢波电路包含多种结构形式: 如梯形线慢波结构、曲折线慢波结构、平面螺旋线慢波结构、矩形螺旋线慢波结构^[43]等。这些结构在介质基片上用薄膜沉积工艺或微电子加工工艺就可制成平面型, 它适合大规模生产, 具有广阔发展前景。但由于该类慢波电路的加工常需采用高宽比很大的微加工技术, 因此现有工艺还需同步发展。

2008 年, 美国的 CCR 公司和威斯康星大学的研究人员模拟研究了一支中心频率为 0.65 THz 的太赫兹行波管, 并对整管设计和加工进行了概述^[44]。其采用微带型梯形电路, 结构如图7所示^[45], 阶梯型的介质脊上印制有金属, 拟采用 DRIE 来加工慢波电路。此器件的优势在于高效、紧凑, 可用于便携系统。模拟表明, 电子注电压 18 kV、电流 8 mA、工作比 2% ~ 10% 时可达 360 mW 的峰值输出功率。由于此电路的结构非常薄, 如何支撑它、连接它以维持其机械牢固性还颇具挑战。测试尚待开展。

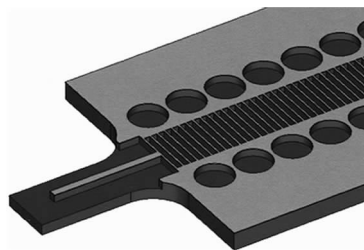


图7 太赫兹微带型梯形线行波管的慢波结构示意图

2009 年, 美国威斯康辛大学和 CCR 公司联合报道了对一支 W 波段微带型曲折线行波管所进行的设计、加工和冷测实验研究^[46], 其慢波电路如图8所示。他们通过先进的微加工技术, 实现了在介质脊上印制金属带的工艺, 相对传统的在介质片上印制金属带而言耦合阻抗得以提高, 增加了输出功

率。预期注电压 9 kV、电流 28 mA 下,在 W 波段可得到增益 15 ~ 20 dB,10 W 的连续波。



图 8 太赫兹微带型曲折线行波管的慢波结构示意图

像平面螺旋线行波管、矩形螺旋线行波管等微带型器件,由于也有望与先代微加工技术相结合,因此同样具有工作于太赫兹频段的潜力。但鉴于目前对于它们的基础理论研究尚在进行之中,国内外暂无针对其工作于太赫兹频段的相关报道。

国内,电子科技大学、山东大学等近年来也积极开展了对这类器件的基础研究,重点主要集中在对此类慢波结构及其变形结构的理论研究方面。这些都是日后将其合理用于太赫兹频段工作的基础。

4 太赫兹螺旋线行波管

螺旋线行波管是传统行波管中最重要的一类,它倍频程的带宽优势和适中的功率极具特色。然而受传统加工手段和电子注流通率等因素的限制,螺旋慢波线只能用到八毫米波段^[43]。2009 年,CCR 公司的研究者对传统螺旋线行波管加以改进,提出一种有望用于太赫兹频段的新螺旋线行波管。

它与传统螺旋线行波管的主要不同在于电子注通道从螺旋线内部变到了外部(如图 9^[47]所示的腰子型区域中),这就避免了因工作频率提高,螺旋线尺寸减小、传统电子注通道过小带来的系列问题。该结构中的螺旋线由金线构成,金刚石片代替传统的夹持杆用来支撑螺旋线。粒子模拟表明,电压 6 kV、电流 32 mA,在 0.095 THz 可输出 24 W,总饱和效率达到 49 %,为避免振荡,样机电路长度限制为 11.7 mm^[48];模拟预测还得到注电流 9 kV,5.3 mA 时,它在 1 THz 能产生 33 dB 增益,200 mW 饱和输出功率,此时螺旋线直径为 26 μm ^[47]。目前,该研究团队对电路、电子枪、磁路、输入输出耦合、收集极的设计和加工正在进行中^[48]。借鉴已获成功的 0.65 THz 此类型螺旋线返波管的先进微加工技术,太赫兹频段此类器件的加工并非太难^[47]。

由于此类放大器具有多倍频程的大带宽、输出功率大、高效、轻便、可靠性高、有望批量生产,因此

在太赫兹频段具有一定研发潜力。

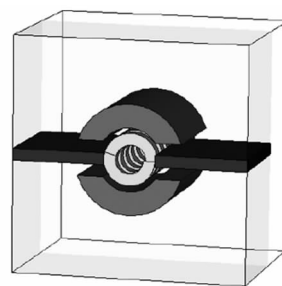


图 9 太赫兹螺旋线行波管的慢波结构示意图

5 太赫兹光子晶体行波管

与绝大多数传统行波管采用纵向周期性结构作为慢波电路不同,它采用全介质、纵向均匀的光子晶体作为慢波电路。因此,最独特的优势在于克服了一般行波管慢波电路采用周期结构在带宽上的固有限制,理论上可获得 100% 以上的超宽带宽。其次,利用光子晶体的滤波特性还可单模激励。另外,介质结构比金属结构在太赫兹高频段传输损耗更小、击穿阈值更大;介质结构的制造在太赫兹高频段相对便宜、便捷、成熟,易促进其商业化^[49-50]。

此概念最早由美国 Los Alamos 国家实验室在 2005 年提出^[49]。他们对三种工作在 0.1 THz 的慢波电路的场分布进行了模拟分析,并对制造方法进行了探讨。第一种结构为在介质基片上形成真空圆柱形周期性阵列和一个用以通过电子注的真空小圆柱缺陷,其横截面图如图 10(a)所示。选择纤维制作技术,通过硅熔合方法可望得到。第二种结构是在真空中周期性排列介质杆,并用一个较厚的空心介质波导作为电子注通道,如图 10(b)所示。选择高压激光化学蒸发沉积技术可望制造。为了确保研究的可靠性,还制造了一个 10 GHz 的利用氧化铝作为杆材料的冷测模型。第三种结构具有平面线性缺陷,可使用带状电子束工作,如图 10(c)所示。文献还指出了将来的工作,如发展功率耦合器,完善 10 GHz 冷测模型,加工这些模型等,但对该结构的理论分析却无详细报道。

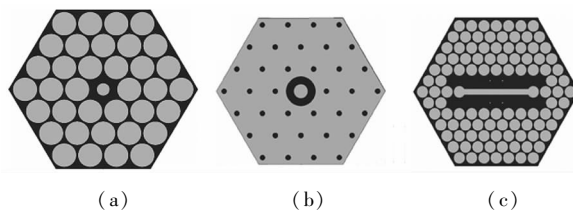


图 10 太赫兹光子晶体行波管的慢波结构示意图

2008 年,该研究团队又提出采用一维光子晶体 Omniduide 作为慢波电路的新结构,并对其进行了设

计、加工和缩尺冷测,冷测结果与设计吻合^[50]。这种结构的圆波导采用 SiO₂ 材料制作,它们在半径方向形成一维周期,结构如图 11(a)所示,组装好的器件如图 11(b)所示。预期可在 W 波段 20% 的带宽范围内产生 1 kW 的峰值功率。2010 年,他们又简要报道了对注波互作用的部分研究结果^[51]。理论上利用 2 A,110 kV 的电子注虽可得到 4 dB/cm 的净增益,但实际热测效果并不理想,电子注被过早截获,最终只得到 2 dB 的增益。目前,针对提高注校准质量的工作正在进行中。此外,要成功得到 W 波段以及更高频率的此类器件,还需解决介质材料 SiO₂ 所带来的电荷积累和散热等问题。

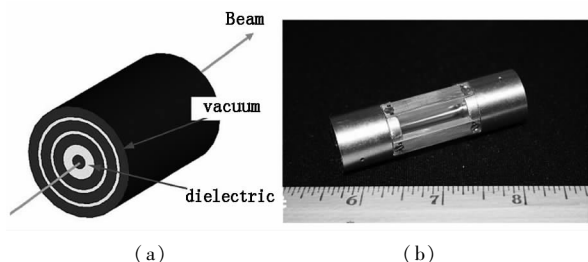


图 11 太赫兹 omniguide 行波管的慢波结构示意图和组装后整管照片

6 总结

由于太赫兹行波管的发展至今不过短短数年,一些关键技术尚不成熟,一些新机理也有待深入研究,因此要实现其向更高频率过渡,使其从理论走向实用、走向批量生产,还有许多工作要做。

总的来看,开发高功率、低造价、质量轻、体积小的实用型宽带太赫兹行波管是今后的发展趋势。发展中需要解决的一些关键问题包括:进一步改良慢波结构;加强对新型太赫兹器件机理的理论研究,研发可用于它们的设计模拟软件;进行与太赫兹行波管相匹配的新型阴极材料、电子枪、聚束系统、输入输出耦合、收集极等的理论和实验研究^[9,17];利用并发展现代微加工技术。

参考文献:

- [1] Zhang Huaiwu. Research on terahertz science and technology in China[J]. China Basic Science, 2008, (1): 15 - 20. (in Chinese)
张怀武. 我国太赫兹基础研究[J]. 中国基础科学, 2008, (1): 15 - 20.
- [2] Ma Chengju, Chen Yanwei, Xiang Jun, et al. Progress in generation of terahertz radiation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2007, 44(4): 56 - 61. (in Chinese)
- [3] Xie Chunyan, Yuan Minghui. THz generation technology[J]. Laser Journal, 2010, 31(1): 7 - 9. (in Chinese)
谢春燕, 袁明辉. 太赫兹波产生技术[J]. 激光杂志, 2010, 31(1): 7 - 9.
- [4] Yang Pengfei, Yao Jianquan, Bin Pibin, et al. Source and characteristics of THz wave[J]. Laser & Infrared, 2011, 41(2): 125 - 131. (in Chinese)
杨鹏飞, 姚建铨, 邴丕彬, 等. 太赫兹波及其常用源[J]. 激光与红外, 2011, 41(2): 125 - 131.
- [5] Wang Minghong, Xue Qianzhong, Liu Pukun. Review of THz vacuum electronic devices and development[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(7): 1766 - 1772. (in Chinese)
王明红, 薛谦忠, 刘濮鲲. 太赫兹真空电子器件的研究现状及其发展评述[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(7): 1766 - 1772.
- [6] J J Feng, J Cai, Y F Hu, et al. Investigation of high frequency vacuum devices using micro-fabrication[C]. IEEE Internationals Vacuum Electronics Conference, CA, USA, 2010: 33 - 34.
- [7] Wu Zhenhua, Zhang kaichun, Liu Shenggang. Research of THz folded waveguide oscillator radiation source[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(12): 2677 - 2680. (in Chinese)
吴振华, 张开春, 刘盛纲. 折叠波导结构的太赫兹振荡辐射源研究[J]. 电子学报, 2009, 37(12): 2677 - 2680.
- [8] Liao Fujiang. Micro-vacuum electron devices and terahertz vacuum sources[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(9): 1361 - 1364. (in Chinese)
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, 2003, 31(9): 1361 - 1364.
- [9] A D Carlo, C Paoloni, F Brunetti, et al. The european project opther for the development of a THz tube amplifier[C]. IEEE Internationals Vacuum Electronics Conference, Rome, Italy, 2009: 100 - 101.
- [10] G M Borsuk, B Levush. Vacuum electronics research perspective at the naval research laboratory[C]. IEEE Internationals Vacuum Electronics Conference, CA, USA: 2010, 3 - 4.
- [11] R A Stuart, A I Al-Shamma'a, C C Wright. Compact tuneable microwave terahertz source[C]. IET. Conference on High Power RF Technologies, London, UK, 2009: 1 - 4.
- [12] J X Qiu, B Levush, J Pasour, et al. Vacuum tube amplifier[J]. IEEE Microwave Magazine, 2009, (12): 38 - 51.

- [13] J Tucek, M Basten, D Gallagher, et al. Sub-millimeter and THz power amplifier development at northrop grumman [C]. IEEE International Vacuum Electronics Conference, CA, USA, 2010: 19–20.
- [14] Gong Yubin, Zhang Zhang, Wei Yanyu, et al. Simulation of pulse shortening phenomena in high power microwave tube using PIC method [J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53 (11): 3990–3995. (in Chinese)
宫玉彬, 张章, 魏彦玉, 等. 高功率微波器件中脉冲缩短现象的粒子模拟[J]. 物理学报, 2004, 53 (11): 3990–3995.
- [15] Liao Fujiang. Technical advance of the vacuum microwave electronics [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34 (3): 513–516. (in Chinese)
廖复疆. 大功率微波真空电子学技术进展[J]. 电子学报, 2006, 34 (3): 513–516.
- [16] Chen Tongjiang, Feng Jinjun, Ca Jun. High precision machining technology of sub-millimeter wave folded waveguide slow wave structure [J]. Vacuum Electronics, 2009, (1): 64–66. (in Chinese)
陈同江, 冯进军, 蔡军. 短毫米波折叠波导慢波结构精密加工技术[J]. 真空电子技术, 2009, (1): 64–66.
- [17] Feng Jinjun, Hu Yinfu, Ca Jun, et al. The development appraisal of W-band TWT [J]. Vacuum Electronics, 2010, (2): 27–31. (in Chinese)
冯进军, 胡银富, 蔡军, 等. W波段行波管发展评述[J]. 真空电子技术, 2010, (2): 27–31.
- [18] J Tucek, D Gallagher, K Kreischer. A compact, high power, 0.65 THz source [C]. IVEC, Monterey, CA, 2008: 16–17.
- [19] V Srivastava. THz vacuum microelectronic devices [C]. International Symposium on Vacuum Science and Technology (IVS 2007), Journal of Physics: Conference Series, Colaba, Mumbai, 2008, 114 (1): 1–10.
- [20] J Tucek, K Kreischer, D Gallagher, et al. Development and operation of a 650 GHz folded waveguide source [C]. IEEE International Vacuum Electronics Conference, Kitakyushu, Japan, 2007: 1–2.
- [21] M Basten, J Tucek, D Gallagher, et al. A multiple electron beam array for a 220 GHz amplifier [C]. IEEE International Vacuum Electronics Conference, Rome, Italy, 2009: 110–111.
- [22] K Nguyen, L Ludeking, J Pasour, et al. Design of a high-gain wideband high-power 220 GHz multiple-beam serpentine TWT [C]. IEEE International Vacuum Electronics Conference, CA, USA, 2010: 23–24.
- [23] Feng Jinjun, Cai Jun, Hu Yinfu, et al. THz vacuum electronics devices using folded waveguide slow wave structure [J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2009, 14 (3): 249–254. (in Chinese)
冯进军, 蔡军, 胡银富, 等. 折叠波导慢波结构太赫兹真空器件研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2009, 14 (3): 249–254.
- [24] P David, Starinshak, D Jeffrey, et al. Chevalier. Investigating holey metamaterial effects in terahertz traveling-wave tube amplifier [C]. NASA/TP, 2007: 1–9.
- [25] A V Aksenchyk, A A Kurayev, I F Kirinovich. Folded waveguide TWT frequency characteristics in the range 600–3000 GHz [C]. IEEE International Vacuum Electronics Conference, CA, USA, 2010: 461–462.
- [26] R K Sharma, A K Sharma, B D Pant, et al. Design and development of 100 GHz folded waveguide TWT [C]. IEEE International Vacuum Electronics Conference, CA, USA, 2010: 505–506.
- [27] M Sumathy, K J Vinoy, S K Datta. Analysis of ridge-loaded folded-waveguide slow-wave structures for broadband traveling-wave tubes [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2010, 57 (6): 1440–1446.
- [28] R L Zheng, X Y Chen. Parametric simulation and optimization of cold-test properties for a 220 GHz broadband folded waveguide traveling-wave tube [J]. J. Infrared Milli Terahz Waves, 2009, (30): 945–958.
- [29] R L Zheng, X Y Chen. Optimization of millimeter wave microfabricated folded waveguide traveling-wave tubes [C]. Proceedings of the 39th European Microwave Conference, Rome, Italy, 2009: 1195–1198.
- [30] R L Zheng, X Y Chen. Design and 3-D simulation of microfabricated folded waveguide for a 220 GHz broadband traveling-wave tube application [C]. IEEE International Vacuum Electronics Conference, Rome, Italy, 2009: 135–136.
- [31] R L Zheng, H S San, X Y Chen. Simulation of microfabricated folded waveguide traveling-wave tube as broadband terahertz amplifier [C]. IEEE International Vacuum Electronics Conference, Rome, Italy, 2009: 1469–1472.
- [32] Zhu Zhengpeng, Miao Min, Qu Bo, et al. Research on cold characteristics of bulk micromachined folded waveguide slow-wave structure [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2006, 19 (5): 1757–1760. (in Chinese)
朱正鹏, 缪旻, 瞿波, 等. 微机械折叠波导慢波结构冷测特性的研究[J]. 传感技术学报, 2006, 19 (5): 1757–1760.
- [33] J He, Y Y Wei, Y B Gong, et al. Analysis of a 140 GHz

- two-section folded waveguide traveling-wave tube [C]. IEEE International Vacuum Electronics Conference, CA, USA, 2010; 1-4.
- [34] Zhang Changqing, Gong Yubin, Wei Yanyu, et al. Investigation on loss characteristics of the sub-millimeter wave folded waveguide slow-wave circuit [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2010, 36(6): 880-884. (in Chinese)
张长青, 宫玉彬, 魏彦玉, 等. 亚毫米波折叠波导慢波结构的损耗特性研究 [J]. 半导体光电, 2010, 36(6): 880-884.
- [35] W Y Yang, Z W Dong, Y Dong, et al. Linear analysis and oscillation study on folded waveguide traveling wave tube for subterahertz radiation [C]. IEEE International Vacuum Electronics Conference, CA, USA, 2010; 1-2.
- [36] Ruan Cunjun, Wang Shuzhong, Zhao Ding, et al. The development of millimeter wave sheet beam devices [J]. Vacuum Electronics, 2010, (2): 8-15. (in Chinese)
阮存军, 王树忠, 赵鼎, 等. 新型带状注毫米波器件的研究进展 [J]. 真空电子技术, 2010, (2): 8-15.
- [37] C D Joye, J P Calame, et al. Microfabrication of a 220 GHz grating for sheet beam amplifiers [C]. IEEE International Vacuum Electronics Conference, CA, USA, 2010; 187-188.
- [38] B E Carlsten, S J Russell, et al. MM-wave source development at los alamos [C]. The 7th Workshop on High Energy Density and High Power RF, Kalamata, Greece, 2006, 807: 326-334.
- [39] M Mineo, C Paoloni. Design study of corrugated waveguide slow wave structure for THz amplification [C]. IEEE International Vacuum Electronics Conference, Rome, Italy, 2009; 104-105.
- [40] Y M Shin, L R Barnett, N C Luhmann Jr. Experimental, numerical and analytical studies of the staggered double vane structure for THz application [C]. IEEE International Vacuum Electronics Conference, Rome, Italy, 2009; 106-107.
- [41] Y M Shin, A Baig, D Gamzina, et al. MEMS fabrication of 0.22 THz sheet beam TWT circuit [C]. IEEE International Vacuum Electronics Conference, CA, USA, 2010; 185-186.
- [42] M Field, R Borwick, V Mehrotra, et al. 220 GHz 50 W sheet beam travelling wave tube amplifier [C]. IEEE International Vacuum Electronics Conference, CA, USA, 2010; 21-22.
- [43] Fu Chenfang. Study on the rectangular helix traveling wave tube [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009. (in Chinese)
付成芳. 带状束矩形螺旋线行波管的研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
- [44] C Kory, M R, J Booske, et al. 650 GHz traveling wave tube amplifier [C]. The 33rd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, CA, USA, 2008; 1-2.
- [45] R L Ives, C Kory, M Read, et al. High frequency source development at calabazas creek research [C]. The 32nd International Conference on Infrared, Millimeter Waves and Terahertz Electronics, Cardiff, UK, 2007; 312-314.
- [46] S Sengele, H Jiang, J H Booske, et al. Microfabrication and characterization of a selectively metallized W-band meander-line TWT circuit [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2009, 56(5): 730-737.
- [47] J A Dayton, C L Kory, G T Mearini, et al. Applying microfabrication to helical vacuum electron devices for THz applications [C]. IEEE International Vacuum Electronics Conference, Rome, Italy, 2009; 41-44.
- [48] C L Kory, J A Dayton, G T Mearini, et al. 95 GHz helical TWT design [C]. IEEE International Vacuum Electronics Conference, Rome, Italy, 2009; 125-126.
- [49] A G Bailey, E I Smirnov, L M Earley, et al. Photonic band gap structures for millimeter-wave traveling wave tubes [C]. Proc. of SPIE on Terahertz and Gigahertz Electronics and Photonics, San Jose, USA, 2005; 6120: 1-8.
- [50] E I Smirnova, B E Carlsten, L M Earley. Design, Fabrication, and low-power tests of a W-band omniguide traveling-wave tube structure [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2008, 36(3): 763-767.
- [51] D Y Shchegolkov, L M Earley, W B Haynes, et al. Testing of the omniguide traveling-wave tube [C]. IEEE International Vacuum Electronics Conference, CA, USA, 2010; 497-498.