

文章编号: 2095-4980(2013)05-0678-06

## 太赫兹行波管级联倍频器

蔡 军, 邬显平, 冯进军

(中国电子科技集团公司 第 12 研究所, 微波电真空器件国家级重点实验室, 北京 100015)

**摘 要:** 太赫兹行波管(TWT)级联倍频器基于行波管非线性相互作用后电子注中的谐波电流, 利用行波管和级联谐波系统组成的倍频器获得电磁波倍频放大。以 W 波段行波管二倍频器为例, 对器件的正确性和可行性进行验证。利用微波管模拟器套装(MTSS)软件对设计的倍频器进行三维非线性相互作用模拟, 结果显示, 级联了二次谐波系统的 W 波段行波管倍频器与其他工作在 140 GHz~220 GHz 波段的小型太赫兹辐射源相比较, 具有优越的性能: 谐波输出功率在 8 GHz 范围内大于 2 W, 转换增益大于 37 dB。利用 CST 公司的粒子工作室软件进行三维粒子注波相互作用模拟, 结果显示, 太赫兹行波管级联倍频器作为潜在的太赫兹源具有高功率、宽频带和高实用化的特点。

**关键词:** 太赫兹; 倍频器; 行波管; 谐波系统

**中图分类号:** TN385

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201305.0678

## Terahertz Traveling Wave Tube cascade multiplier

CAI Jun, WU Xian-ping, FENG Jin-jun

(National Key Laboratory of Science and Technology on Vacuum Electronics, No.12 Research Institute, China Electronics Group Corporation, Beijing 100015, China)

**Abstract:** Terahertz Traveling Wave Tube(TWT) cascade multiplier is proposed for a compact source of high-power, wide-band THz radiation as a novel vacuum electronics device. For THz applications, the design and feasibility studies of a multiplier concept are presented by using a TWT with cascade harmonic system to satisfy the requirements of harmonic information in spent beam of TWT. Using Microwave Tube Simulator Suite(MTSS), the information of W-band TWT multiplier with cascade 2nd harmonic system indicates that this reasonable and practical device has good performance compared with other compact source operated in the frequency region from 140 GHz to 220 GHz. The harmonic power reaches above 2 W in 8 GHz with 37 dB conversion gain. 3-D PIC beam-wave interaction is simulated using CST Particle Studio which shows that THz TWT cascade multiplier bears good power and bandwidth performance and practicability as potential THz radiation source.

**Key words:** Terahertz; multiplier; Traveling Wave Tube; harmonic system

太赫兹是指  $10^{12}$ Hz 的频率单位, 一般称谓的太赫兹波的频率范围是  $10^{11}$  Hz~ $10^{13}$  Hz。因其在透视、安全和频谱分析等方面具有独特性质, 其在基础科研和应用研究方面受到各国广泛重视和深入研究, 如安检、化学生物制剂探测、质量控制和医疗诊断等<sup>[1]</sup>。

实用化太赫兹源的缺乏是限制太赫兹应用的重要原因, 在各种太赫兹源中, 真空电子器件的高频率、高功率和耐辐射的特性使其具有成为高性能和实用化太赫兹源的潜力。在微波和毫米波的低频段, 基于真空电子学的真空电子器件在很长一段时间被广泛用作大功率源及放大器。近年来, 太赫兹波段的真空电子器件获得了长足发展, 主要器件有微型真空电子器件、回旋管、返波振荡器及扩展相互作用振荡器<sup>[2]</sup>。但受工艺难度等限制, 实用化的高性能太赫兹真空辐射源仍然是技术尚未成熟的领域, 需要开发新型的器件概念及其相应的精密制造技术。

行波管是一种重要的真空电子器件, 在频率进入太赫兹频段时, 直接研制行波管的难度很大, 如需要太赫兹功率驱动、高精确度和低高频损耗加工能力、装配工艺水平等。传统的行波管设计被认为高频率谐波的功率降低了行波管工作频率的输出功率和可用频宽<sup>[3]</sup>。因此, 在过去的工作中如何提高基波输出功率, 同时设法抑制以二

收稿日期: 2013-05-06; 修回日期: 2013-06-17

基金项目: 中国电子科技集团公司创新基金资助项目(2012JJ120215)

次谐波为主的谐波功率，一直都是宽频带行波管特别是倍频程以上行波管的关键研究内容。很少有人对行波管谐波进行专门研究。文献[4]开展了利用行波管作为倍频器的研究，文中的理论和实验验证均基于当时条件，最高频率为4 GHz，为了方便实验，任意选择了设计参数，受限于测试条件，更注重频率的测量，谐波功率量级设置在10 mW左右，与当时的S波段行波管功率差距很大；从器件的结构上，仅由行波管的输入螺旋线作为群聚段，电子注中的谐波电流受到很大限制，行波管的输出段采用了强色散螺旋线，通过与行波管电压差异很大的额外电压，实现谐波信号的选择性放大。由于这些限制和实际意义的不足，在后续的几十年中没有得到足够重视。近期电子科技大学开展了大功率七次谐波行波管的研究，除仍采用单段慢波结构实现调制外，器件在总体上按700 GHz行波管进行设计，电子注通道只有30 μm，同其他微型真空电子器件在实际研发中类似，受到大电流密度电流产生和维持、高精度微加工工艺和高对中要求等一系列技术问题的限制<sup>[5]</sup>。

本文主要开展再利用行波管相互作用后电子注中的谐波电流的研究，实现从行波管工作频率上边界向更高的太赫兹频域的跨越，拓展这一未被开发的领域。根据太赫兹应用需求，实际研发一种新型真空辐射源，具有低频小功率驱动、工艺实现难度小、流通率高、输出功率大、频带宽、转换增益高、相位噪声低和体积重量适中等特点。

## 1 太赫兹行波管级联倍频器的概念

本文研究对象是行波管的“相互作用后电子注”，在传统行波管理论中这部分电子仅仅被认为是一种能量被收集极回收，以提高整管效率。其实，由于行波管的非线性工作，此时电子注中除了占主体的基波分量外，还含有大量的谐波电流，数学形式表示为：

$$\vec{i} = I_0 + a_1 \cos \omega t + a_2 \cos 2\omega t + \dots + a_n \cos n\omega t \quad (1)$$

式中： $n$ 表示谐波次数；系数 $a_n$ 表示谐波电流所占权重； $I_0$ 为直流分量<sup>[6]</sup>。

过去这部分电流分量没有得到应有的重视，被视为破坏行波管功率和带宽等性能有害因素。为了再利用“相互作用后电子注”中的谐波电流，多种创新性思路及方案被提出，太赫兹行波管级联倍频器(THz TWT Cascade Multiplier, TTCM)的概念便是其中一种。

在硬件上，器件在结构上保留了行波管的总体结构，在行波管高频系统和收集极之间，级联了1或 $m$ 个 $n$ 次( $m, n=2, 3, \dots$ )谐波系统，如图1所示，器件处于真空状态下的密封金属陶瓷封接的管壳中，一端设有包含阴极、聚焦极和阳极的电子枪组件，电子枪的出口处设有行波管高频系统，其慢波结构的一端是基波高频输入耦合结构，另一端为基波高频输出耦合结构，中部设有切断和集中衰减器。第 $m$ 个级联的 $n$ 次谐波系统包括谐波慢波结构、谐波衰减器和谐波输出耦合结构，实现电子注中的第 $n$ 次谐波电流的提取、放大和输出。级联的谐波系统直接使用行波管的电子枪、输入耦合结构，电子注通道、聚焦系统和收集极，因此最大限度地利用现有的技术和基础，这使得该新型器件具有高可行性，是在目前条件下研发实用化太赫兹真空源最有效的方式之一。

在软件上，太赫兹行波管级联倍频器的目标是实现太赫兹的谐波电磁波放大，为达到这一目的，第一，要实现相互作用后电子注中谐波电流的最优化，如果谐波电流过小，由于太赫兹高频损耗大以及电子注通道尺寸大造成的耦合阻抗下降，后面的谐波系统有效增益降低，不足以获得大功率的谐波输出功率，只有利用行波管输入和输出段共同保障必要的谐波电流量作为谐波系统的初始条件；如果谐波电流过大，不能在后面的谐波系统中进行长距离的分布式相互作用，此时的谐波电流虽大，但相互作用过于集中，使部分能量被谐波慢波结构吸收，部分能量又交回给电子注造成输出功率反而减少，该情况类似于行波管输入功率过大时输出段的状况，因此必须找到谐波电流的最优值，该值的选取与后面级联谐波系统有关；第二，谐波系统要通过研究谐波注波相互作用同步关系和耦合强度的规律，实现谐波的功率最大化和频响最优化。需要说明的是“谐波系统”的“谐波”是指行波管的谐波信号，不一定是“谐波慢波结构”的工作模式。

太赫兹行波管级联倍频器工作时，基波高频输入耦合结构作为器件的输入端口，可以利用工作在较低频率的基波信号源作为驱动；基波高频输出耦合结构输出的基波功率作为观察和控制器件工作状态的一路信号，完成上述功能后被匹配吸收或另作他用；第 $m$ 路的 $n$ 次谐波系统的谐波输出耦合结构提供了作为大功率和宽频带太赫兹电磁波的输出端口，通过太赫兹频域的标准接口与实际应用系统互联。

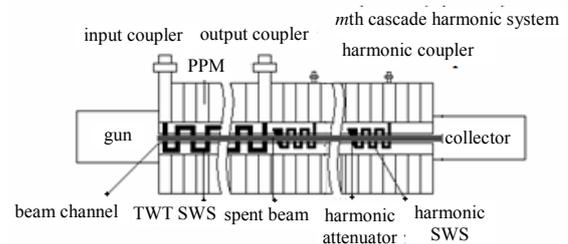


Fig.1 Layout of THz TWT cascade multiplier  
图1 太赫兹行波管级联倍频器结构示意图

### 2 太赫兹行波管级联倍频器的设计

为了验证太赫兹行波管级联倍频器的合理性和可行性，以 W 波段脉冲行波管二倍频器作为实例进行设计，目标是实现工作在 140 GHz~220 GHz 波段内、瞬时带宽达到几个 GHz、脉冲谐波功率达到瓦级、工作比达到 20% 的太赫兹辐射源，其电压小于 22 kV，电流小于 200 mA，倍频器样管尺寸小于 450 mm × 90 mm × 90 mm。

设计过程为：

1) 冷特性模拟：利用 Matlab 软件编写了折叠波导慢波结构冷特性计算程序，利用等效电路法模拟折叠波导慢波结构的色散和轴线耦合阻抗，利用理论公式法模拟高频损耗的理论值，计算结果作为后续互作用计算的输入。

为最大限度利用现有资源，简化设计过程，使器件尽快得到验证，采用 12 所微波电真空器件国家重点实验室短毫米波及太赫兹器件研究中心研制的 W 波段折叠波导脉冲行波管<sup>[7]</sup>，图 2 为 W 波段脉冲行波管，该器件是目前国内频率最高的行波管。



Fig.2 Photo of W band pulsed TWT for THz TWT cascade multiplier  
图 2 用于验证太赫兹行波管级联倍频器的 W 波段脉冲行波管照片

其次，对每个谐波系统进行设计，充分利用行波管高频系统互作用后电子注中的谐波电流，通过能量交换，实现大功率和宽频带的太赫兹电磁场。

以级联的二次谐波系统为例，对行波管互作用后电子注的二次谐波电流进行提取、放大和输出。

选择全金属的折叠波导慢波结构作为级联的二次谐波系统的慢波结构，初步考虑 2 种方案。方案 1 中行波管二次谐波所在频率被设计在谐波系统慢波结构上，以谐波模式工作，以简化加工难度；方案 2 中行波管二次谐波所在频率也被设计在谐波系统的慢波结构上，以基模的方式工作，以提高耦合阻抗。通过综合考虑工艺实现难度和性能，选择了方案 2 作为首选方案。考虑到行波管工作电压，利用 Matlab 程序计算了二次谐波系统慢波结构在基波工作模式下与行波管的谐波频率的同步关系、耦合强度和 高频损耗，表 1 给出了利用 Matlab 程序计算的冷特性结果，W 波段脉冲行波管工作频率标识为  $f_1 \sim f_5$ 。其中，谐波系统慢波结构的电子注通道尺寸与行波管高频系统中慢波结构的电子注通道尺寸一致，以保证整个器件的高电子流通率，其他尺寸选取应充分考虑到现有加工方法的能力。

表 1 谐波系统的慢波结构冷特性结果

Table1 Cold characteristics parameters of harmonic system

$f/\text{GHz}$	$V_p/C$	$K_c/\Omega$	loss/(dB/m)
$2f_1$	0.277 5	0.220	96.1
$2f_2$	0.276 5	0.191	94.1
$2f_3$	0.275 6	0.166	92.2
$2f_4$	0.274 9	0.146	90.6
$2f_5$	0.274 2	0.128	89.0

2) 器件分析：基于电磁波对电子注的非线性调制，通过器件分析优化行波管互作用后电子注的谐波电流，利用级联的谐波系统进行充分的能量交换，实现倍频放大和输出。利用微波管模拟套装软件(MTSS2010)进行电子注-基波-谐波的互作用计算，行波管基波和谐波以及谐波系统工作模式的色散、轴线耦合阻抗均按照冷特性程序计算结果输入，高频损耗数值则根据 W 波段脉冲行波管研制中的实测值调整以获得最接近实际的设计结果，保障实测数据与设计结果相符。在器件分析中电压和电流分别为 21.5 kV 和 150 mA，在基波频率为  $f_1$  时，图 3 给出了行波管互作用后电子注的高频电流随基波输入功率变化的曲线。

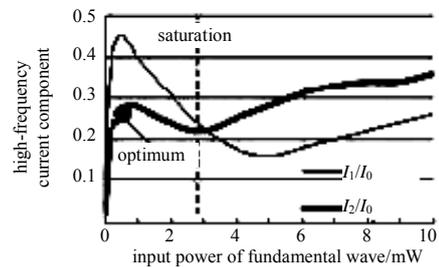


Fig.3 High-frequency current component in spent beam vs. input power of fundamental wave  
图 3 互作用后电子注谐波电流随基波输入功率的变化曲线

计算结果表示，二次谐波电流在基波功率饱和前的变化趋势一致，当行波管处在基波过饱和状态时，电子注谐波的非线性得到加强，谐波电流也进一步增大。根据设计的谐波系统确定了二次谐波电流最优化值为  $0.25I_0$ ，如果只有行波管的输入段作为群聚段，达不到优化的二次谐波电流量，这种情况正好对应了文献[4]存在的一项技术问题；相反地，由于所选用 W 波段脉冲行波管在设计及研制中仅作为一个工作在基波的传统器件，对于太赫兹行波管级联倍频器并不是最优化的配置，谐波电流量有冗余，因此要在今后工作中进一步开展理论分析，支撑完全面向新器件的设计优化工作。

经过计算，在没有级联谐波系统时，互作用后电子总能量为 3 176.4 W，级联谐波系统后电子总能量为 3 165.6 W，减少的能量为谐波功率及谐波系统损耗的能量。

通过分析电子注谐波电流到电磁场的能量交换,实现谐波功率最大化和频率响应最优化,如没有达到指标要求,则同时调整谐波系统中慢波结构以及行波管高频系统相互作用后电子注的谐波电流量,优化谐波功率。

图4给出了在等激励工作时初步设计的W波段脉冲行波管二倍频器性能,输入功率为0.5 mW时,谐波输出功率在8 GHz范围内大于2 W,转换增益大于37 dB,与工作在该波段的返波振荡器比较,功率大100倍,频率稳定度更高。计算结果显示,W波段脉冲行波管二倍频器能够在10 GHz的频率范围内,实现大于1 W的功率输出。谐波系统的冷特性对谐波输出功率影响很大,这说明冷特性的精确模拟是正确分析谐波功率的前提,如果能够在保持同步条件下增加谐波系统的耦合阻抗,减小高频损耗,则可以大幅提高谐波功率。

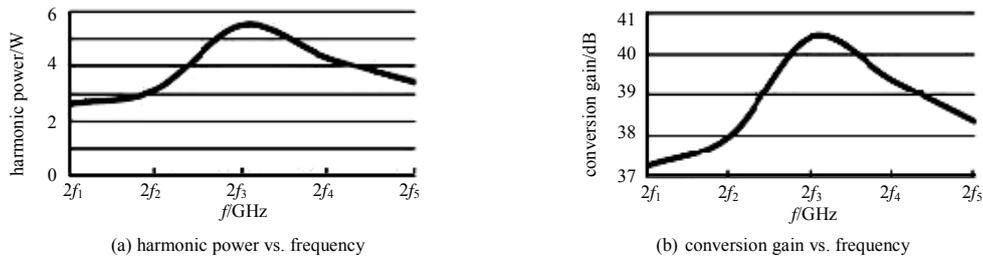


Fig.4 Simulation results of W band pulsed TWT 2nd harmonic multiplier

图 4 W 波段脉冲行波管二倍频器模拟结果

### 3 太赫兹行波管级联倍频器的三维PIC注波相互作用模拟

太赫兹真空电子器件的研制依赖于精确而强大的建模和模拟计算技术。为缩短研发周期,节省资金以及在实验环节前实现最优化,采取了基于设计的模拟技术。

利用 CST 公司的粒子工作室软件进行太赫兹行波管级联倍频器的三维 PIC(Particle In Cell)注波相互作用模拟。为促进软件在设计中的应用和开发,采用了中国电子科技集团公司第 12 研究所的仿真云计算平台,应用 12 线程模拟单个三维相互作用模型,以缩短模拟时间,处理大量数据,且在三维环境下完成复杂注波相互作用的精确模拟。

利用粒子工作室软件建立了三维折叠波导模型,考虑金属高频损耗,进行了三维注波相互作用的模拟,验证设计的合理性,如图 5 所示,为了方便观察器件的内部结构,图示中隐藏了折叠波导外的铜结构。

图 5 中的实体模型包括行波管高频输入段、行波管高频输出段和二次谐波慢波结构,计算结果显示在 10 ns 放大信号维持稳定,电子注状态正常,没有监测到自激振荡信号。

图 6 给出了基波频率为  $f_1$  时 W 波段脉冲行波管二倍频器的三维注波相互作用 PIC 模拟结果,经过模拟,得到了谐波输出功率随基波输入功率变化曲线,确定最佳工作状态为:基波频率为  $f_1$ ,输入功率为 0.16 mW,基波输出功率为 5.35 W,谐波输出频率为  $2f_1$ ,输出功率为 1.17 W,转换增益约为 38 dB。三维 PIC 注波相互作用模拟证明设计的器件能够正常工作,功率能够满足设计要求。

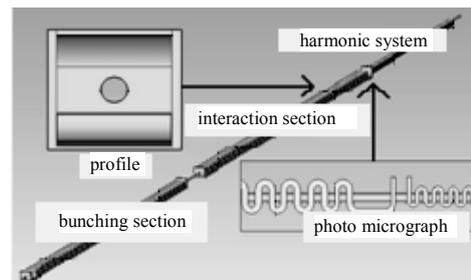


Fig.5 Model of W band pulsed TWT 2nd harmonic multiplier for 3-D beam-wave interaction

图 5 W 波段脉冲行波管二倍频器的三维注波相互作用实体模型

### 4 关键技术及实验准备

W 波段脉冲行波管二倍频器所采用的 W 波段脉冲行波管功率量级达到 100 W,带宽大于 5 GHz,工作比达到 20%<sup>[7]</sup>。倍频器的研制将以 W 波段脉冲行波管的设计、工艺和测试技术为基础。虽然器件在最大程度上利用了现有资源,在实际研制中仍需要解决 3 项关键技术。

二次谐波系统中慢波结构的精密加工是 W 波段脉冲行波管二倍频器最关键的技术,采用 2 条技术路线实现,一是微加工工艺,微波电真空器件国家级重点实验室开展了多个频段折叠波导慢波结构的微加工研究工作并加工了合格样品<sup>[8]</sup>,具有利用深紫外光刻电铸成型(UV-LIGA)技术加工谐波系统折叠波导慢波结构的能力;二是 12 所加工中心基于机械加工的方法实现太赫兹折叠波导慢波结构,图 7 为利用该方法加工的沟道宽度为 0.14 mm 的折叠波导慢波结构照片,初步显示了利用该方法加工亚毫米级折叠波导慢波结构的能力,目前正在开展提高表面光洁度的工艺改进及二次谐波慢波结构的加工工作。

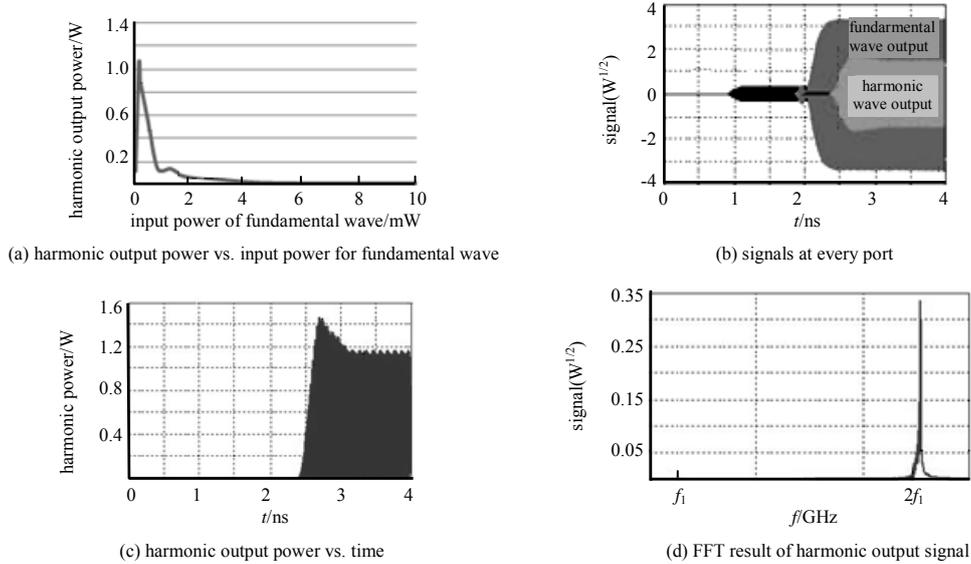
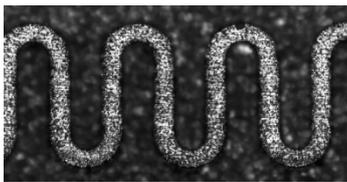
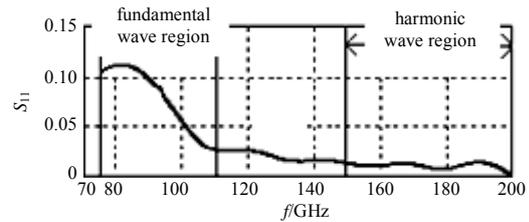


Fig.6 3-D interaction results of W band pulsed TWT 2nd harmonic multiplier

图 6 W 波段脉冲行波管二倍频器的三维 PIC 模拟结果

Fig.7 Photo of 2nd harmonic folded waveguide SWS  
图 7 二次谐波系统的折叠波导慢波结构照片Fig.8 Reflection coefficient of harmonic attenuator  
图 8 谐波衰减器的反射系数

二次谐波系统中宽带、低损耗输能系统的研制是 W 波段脉冲行波管二倍频器另一项关键技术。设计了二次谐波高频输出结构，利用金刚石盒型窗实现二次谐波功率的良好匹配和低损耗输出，通过微波等离子体化学气相沉积设备自行研制了金刚石窗片，已经开展了窗片金属化、窗架零件加工及装配焊接的研究工作。

为了简化二次谐波系统的研制，基于 W 波段脉冲行波管的集中衰减器的制造技术，对精密集中衰减器进行了设计，实现级联的二次谐波系统中反向电磁波的匹配吸收，保证谐波系统不存在自激振荡，能够正常工作。图 8 为利用 CST 公司的微波工作室软件模拟的精密衰减器的  $S_{11}$  参数，结果显示在谐波区域衰减器具有相对基波区域更好的匹配性能。

基于这些关键技术的 W 波段脉冲行波管二倍频器样管正在研制中，以验证太赫兹行波管级联倍频器的概念，有望在 2013 年底完成样管研制并进行性能测试，今后将继续开展 W 波段脉冲行波管二倍频器样管优化、更复杂谐波系统研发和更高频率/更高次谐波的太赫兹行波管级联倍频器的研制工作。

## 5 结论

本文提出了一种新型真空电子器件——太赫兹行波管级联倍频器，基于电磁波对电子注的非线性调制，通过优化行波管相互作用后电子注的谐波电流，利用级联的谐波系统进行充分的能量交换，来实现倍频放大和输出。通过 W 波段脉冲行波管二倍频器的设计和模拟验证了器件的合理性，通过谐波系统的工艺研究证明该器件有望成为高性能的实用化太赫兹源。

### 参考文献：

- [1] 许景周,张希成. 太赫兹科学技术和应用[M]. 北京:北京大学出版社, 2007. (XU Jingzhou,ZHANG Xicheng. Terahertz Science Technology and Application[M]. Beijing: Peking University Press, 2007.)

- [ 2 ] 冯进军. 集成真空电子学[J]. 真空电子技术, 2012(2):1-7. (FENG Jinjun. Integrated Vacuum Electronics[J]. Vacuum Electronics, 2012(2):1-7.)
- [ 3 ] Gilmour A S. Principle of traveling wave tubes[M]. Michigan State:Artech House Inc, 1994.
- [ 4 ] Bates D J,Ginzton E L. A Traveling-Wave Frequency Multiplier[J]. Proceedings of the IRE, 1957,45(7):938-944.
- [ 5 ] Gong Huarong,Tracish G,Xu Jin,et al. High-Power Tunable Terahertz Radiation by High-Order Harmonic Generation[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2013,60(1):482-486.
- [ 6 ] 陆钟祚. 行波管[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1961. (LU Zhongzuo. Traveling wave tubes[M]. Shanghai:Shanghai Science and Technology Press, 1961.)
- [ 7 ] CAI Jun,Feng Jinjun,HU Yinfu,et al. Development of W-band Folded Waveguide Pulsed TWT[C]// Proceedings of IVEC 2013, Paris,France:[s.n.], 2013.
- [ 8 ] 冯进军,唐焯,李含雁,等. 短毫米波和太赫兹线性注真空电子器件研究[J]. 真空电子技术, 2013(1):1-9. (FENG Jinjun,TANG Ye,LI Hanyan,et al. Research of Terahertz Linear Beam Vacuum Devices[J]. Vacuum Electronics, 2013(1):1-9.)

#### 作者简介:



蔡 军(1978-),男,河北省唐山市人,高级工程师,主要研究方向为 W 波段行波管和太赫兹真空电子器件研制.email:caijun@sdu.edu.cn.

邬显平(1940-),男,浙江省奉化市人,研究员,博士生导师,主要研究方向为 W 波段行波管和太赫兹真空电子器件研制.

冯进军(1966-),男,山西省运城市人,研究员,博士生导师,主要从事真空电子学、微波电子学、等离子体电子学、MEMS 技术、太赫兹真空电子学、高频集成真空电子学等领域的研究工作,研究的器件包括毫米波空间行波管、W 波段行波管、高功率回旋器件、太赫兹真空器件、铍束管等.

(上接第 674 页))

#### 作者简介:



杨 琪(1989-),男,陕西省渭南市人,在读硕士研究生,主要研究方向为太赫兹雷达系统仿真技术、太赫兹雷达目标微动检测与成像技术.email:424206134@qq.com.

秦玉亮(1980-),男,山东省潍坊市人,博士,副研究员,主要研究方向为雷达信号处理、目标识别、量子雷达.

邓 彬(1981-),男,山东省邹城市人,博士,讲师,主要研究方向为合成孔径雷达、太赫兹雷达成像.

王宏强(1970-),男,陕西省凤翔市人,博士,研究员,863太赫兹专家,中国兵工学会太赫兹应用技术专业委员会委员,主要研究方向为太赫兹技术、目标识别、雷达信号处理.

丁文霞(1973-),女,湖南省湘潭市人,博士,副教授,主要研究领域为信息安全、电路与系统、数字视频处理等.