

文章编号: 1672-8785(2012)09-0001-05

利用真空电子器件产生 THz 技术的发展

傅杨颖

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘 要: THz 波技术在生物医学、材料科学、天文学和军事通信等方面都具有广泛的应用前景。介绍了几种能够产生 THz 波的真空电子器件的工作机理及其在发展过程中遇到的瓶颈问题, 并得出了利用真空电子器件产生 THz 波的各种优势。介绍了国内外各种太赫兹真空电子器件研究的技术水平及应用现状, 并对用真空电子器件产生 THz 波的技术进行了展望。

关键词: THz ; 真空电子器件; 综述

中图分类号: TN129 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2012.09.001

Progress of THz Wave Generation Technology Using Vacuum Electronic Devices

FU Yang-ying

(College of Opto-electronic Science and Engineering, National University of
Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: THz wave technology has a broad application prospect in the fields of biomedical, material science, astronomy and military communication. The operation principles of several vacuum electronic devices which can generate THz wave are presented. The bottleneck problems met with in their development are described. The superiorities for using vacuum electronic devices to generate THz wave are derived. The current research and application status of the THz vacuum electronic devices at home and abroad is presented and the prospects of THz wave generation technologies of vacuum electronic devices are given.

Key words: THz; vacuum electronic device; review

0 引言

太赫兹 (THz) 波段是指频率约在 $0.1 \sim 10$ THz 范围内的电磁波段, 其位于红外波段与微波波段之间, 如图 1 所示。THz 波段是电磁波谱中有待于人们进行全面研究的最后一个频段, 而且由于具有瞬态性、宽带性、穿透性和低能性等独特优势而受到国内外的高度重视。目前, 国内外已经对产生 THz 波的功率源, 如固态振荡器、量子级联激光器和激光激发 THz 辐射源等进行了相应的研究, 并取得了一定的成果。但上述功

率源均存在各自的不足之处。本文将分析几种能够产生 THz 波的真空电子器件, 主要包括自由电子激光器、回旋管以及行波管与扩展相互作用谐振器。与上述功率源相比, 这些真空电子器件具有独特的优势。然而由于受到现阶段加工工艺水平等方面的限制, 目前要获得高功率的长脉冲输出仍旧是一大难题。

1 太赫兹自由电子激光器

自由电子激光器 (Free Electron Laser, FEL)

收稿日期: 2012-07-19

作者简介: 傅杨颖 (1991-), 女, 重庆人, 本科生, 主要从事军用光电方面的研究。E-mail: fuyangying1991@126.com

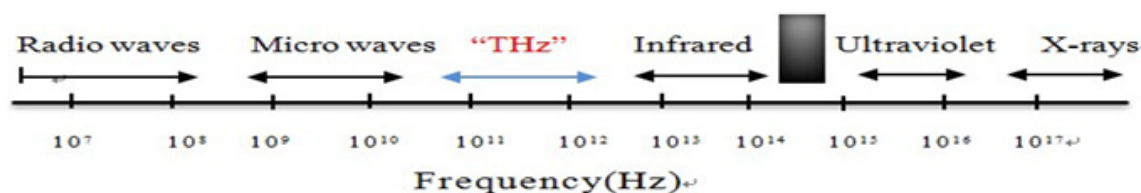


图 1 电磁波频谱图

是一种诞生于 20 世纪 70 年代后期的新型相干光源。它是在微波管和同步辐射光源等自由电子辐射源的基础上发展起来的。FEL 是一种利用自由电子的受激辐射,把相对论电子束的能量转换成相干辐射的激光器件。基于自由电子激光的太赫兹 (FEL-THz) 源不仅可以获得大功率输出,而且其波长在大范围内连续可调,可覆盖整个 THz 波段甚至更大的范围,因而是实现大功率 THz 源的最佳途径之一。

自由电子激光器可以分为振荡器型 FEL 和放大器型 FEL 等类型。与放大型 FEL 相比,振荡型 FEL 具有体积小和选模能力强等优点,因而更容易得到品质好的高功率。事实上,目前世界上可工作于 THz 波段的 FEL 装置大多采用振荡器结构。

FEL 一般由电子束源、泵浦场和光谐振腔三部分组成(如图 2 所示)。其工作原理可简述为:首先由加速器产生高能电子并将其输出,然后输出的高能电子经过磁摇摆器后产生横向摆动,进而产生电磁辐射(光脉冲)。产生的电磁辐射经两面反射镜(见图 2)反射后与电子束团发生作用,使原来纵向均匀分布的电子群聚成团,产生相干辐射的增长。该过程会多次重复进行,直至光强达到饱和。另外,作用后的电子会经偏转磁铁偏转到系统之外^[1]。

自由电子受激辐射的设想是 Motz 于 1951 年提出的。1977 年 4 月,美国斯坦福大学 Deacon 等人成功研制出第一台自由电子激光振荡器。自由电子激光器由于具有无可比拟的优点而得到了各界的高度重视,并且在短波长、大功率、高效率以及波长可调节这四个主攻方向上为激光学科的研究开辟了一条新的道路。20 世纪 80 年代中期,受美国“战略防御倡议计划”的影响

和推动,世界各国均出现了针对 FEL 的研究热潮。目前,人们已经建立起了超过五十台的 FEL 研究设备,其光谱范围覆盖了微波、红外、紫外以及近 X 射线波段。在众多研究机构中,约有十个研究机构对外开放,可供人们进行应用研究^[2]。

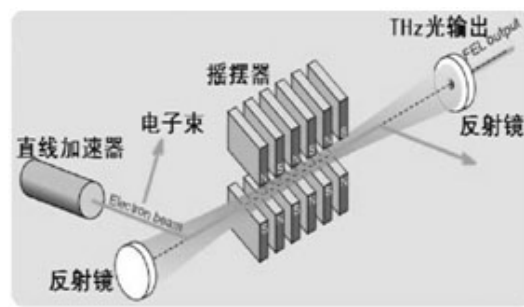


图 2 FEL 振荡器的结构图

美国加利福尼亚大学利用 1 MeV 静电加速器产生了自由电子激光,这是太赫兹波段自由电子激光的最重要成果之一。该装置可以在准连续波模式下运行,并可提供在太赫兹波段可调谐的相干辐射,其工作频率为 120 GHz ~ 4.8 THz (波长为 2.5 ~ 60 mm),输出功率为 500 W ~ 5 kW,脉冲宽度为 1 ~ 20 μm,重复频率为 1 Hz^[3]。

荷兰 FOM 研究所研制的红外实验用自由电子激光 (Free Electron Laser for Infrared eXperiments, FELIX) 装置产生了工作频率在 1.2 ~ 75 THz (波长在 4 ~ 250 μm) 内连续可调的 THz 辐射波,其亚皮秒脉冲峰值功率达到 100 MW。目前,该装置已被广泛用于生物医学、生物化学和物理学方面的研究。

目前,我国已有数台不同类型的自由电子激光器相继出光。其中,北京自由电子激光器已经成为亚洲第一台出光的中红外 FEL 装置,同

时它也是迄今我国唯一一台运行稳定并开展了 FEL 应用的装置。2005 年 4 月 7 日, 中国工程物理研究院宣布我国成功研制出首台基于自由电子激光的 THz 辐射源, 其波长为 $115\ \mu\text{m}$ (2.6 THz), 谱宽为 1%。该成果标志着我国第一台可调谐相干 THz 光源建成出光, 填补了国内空白^[4]。

如今, 自由电子激光太赫兹辐射源的研究方向主要集中在效率和输出功率的提高、新机理的探索、新现象的研究 (如边带效应和光导效应等) 以及装置的小型化和实用化等方面。

2 太赫兹回旋管

20 世纪 50 年代末, 作为微波电子学中的一个重大突破, 电子回旋脉塞的研究和发展推动了一大类新型高功率毫米波、亚毫米波器件——

回旋管的诞生^[5]。回旋管亦称电子回旋脉塞, 是指具有较大横向能量的回旋电子注在轴向磁场中由于能级分裂而在一定条件下产生的受激相干辐射。

通过利用电子回旋脉塞机理, 并结合不同高频互作用电路, 人们发展了多种各具性能特点的回旋管, 如回旋行波管、回旋速调管、回旋单腔管振荡器以及回旋返波管等。图 3 为太赫兹回旋管的结构示意图。它由电子光学系统、谐振腔和输出波导三部分组成。采用磁控注入电子枪形成回旋电子注, 然后在谐振腔中通过注波互作用产生太赫兹振荡, 并由输出波导和输出窗输出。其中, 输出波导兼作电子注收集系统使用。谐振腔采用缓变截面开放式圆柱谐振腔, 其结构简单, 功率容量大, 因而已被回旋管振荡器所广泛使用^[6]。

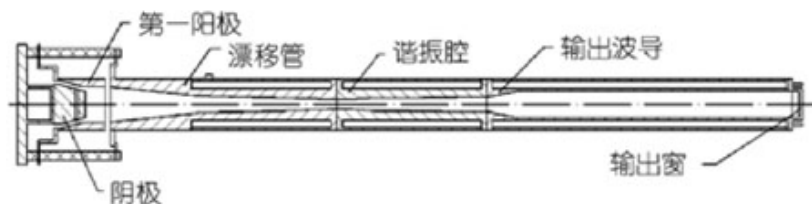


图 3 单腔回旋振荡管的结构示意图

回旋管是一种基于电子在磁场中的回旋谐振受激辐射机理的快波器件。它不需要传统微波、毫米波等真空电子学器件所必需的慢波系统, 可实现高频和大功率输出^[6]。

在磁约束核聚变研究的推动下, 关于回旋管的研究在毫米波及太赫兹低频段取得了重大进展。人们已经研制出 170 GHz/1 MW 连续波输出的回旋管。德国卡尔斯鲁厄技术物理研究中心 (FZK) 研制出了用于 W7-X 仿星受控热核聚变装置中的兆瓦级连续波回旋管, 其工作频率为 140 GHz。日本国际原子能机构 (JAEA) 研究出了用于 ITER 计划中的 ECRH 和 ECCD 的回旋振荡管, 其频率为 170 GHz, 总效率为 55%。俄国国家科学院应用物理研究所正在研制 1 THz 的回旋管, 其输出功率为 10 kW^[5]。

现阶段太赫兹回旋管的研究主要集中在两个方向: 第一个方向主要是用于 ITER 计划中辅助加热的回旋管, 其主要研究目的就是提高回旋管的输出功率; 另一个方向则是使其能够工作在更高的频率。回旋管是目前工作在毫米波及太赫兹频段功率最高的真空电子学器件, 其功率可达千瓦以上。根据当前发展情况来看, 回旋管是太赫兹低频段 (0.1 ~ 1 THz) 最有希望的大功率辐射源, 而且它在远程探测、高分辨雷达以及太赫兹辐射与物质非线性相互作用等研究方面具有重要的应用前景。

3 行波管

行波管 (Travelling Wave Tube, TWT) 是一种通过在接近真空环境中运动的电子注与行波高频场持续作用实现能量转换的电子器件, 属于

真空器件。行波管是一种极具发展潜力的太赫兹器件,因此有不少国家目前都已开展了行波管放大器的研究工作。行波管具有频带宽、增益高、动态范围大和噪声低等特点,其频带宽度可达 100 % 以上,增益在 25 ~ 70 dB 范围内,而且噪声系数最低可达 1 ~ 2 dB。现代行波管已经成为雷达、电子对抗、中继通信、卫星通信、电视直播卫星、导航、遥感、遥控以及遥测等电子设备中的重要微波电子器件。

图 4 为行波管的结构示意图。行波管的部件全部装在接近真空的壳体内,各电极通过导线引出。灯丝、阴极、控制极和阳极构成电子枪,用于产生电子流。电子流是能量的载体,它在运

动的过程中与高频场持续相互作用而实现能量交换。螺线则是一个慢波系统,用于降低高频场沿管轴传播的速度,以便与电子注的运动速度保持同步。行波管中的能量交换是在慢波系统中进行的。磁聚焦系统用于控制电子注聚束。夹持杆用于固定螺线。收集极用于收集由电子枪射出后穿过慢波系统的电子注。输入装置用于引入激励功率。输出装置用于导出高频功率。其物理本质是,管内的电子注从为行波管供电的直流电源中得到能量,然后在慢波系统的运动过程中与行波高频场做能量交换,并将部分动能转换为高频能量。行波管在这过程中扮演能量转换器的角色。

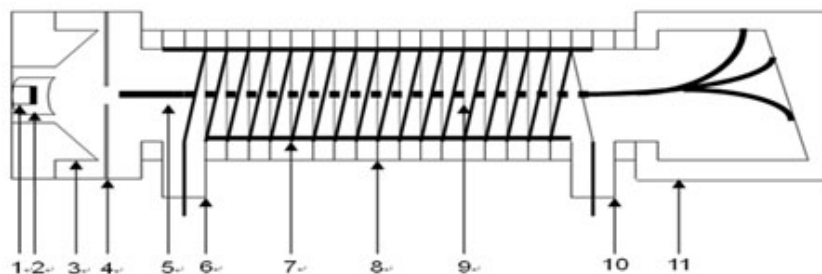


图 4 行波管的结构示意图。其中, (1) 灯丝; (2) 阴极; (3) 控制极; (4) 阳极; (5) 电子注; (6) 输入装置; (7) 夹持杆; (8) 磁聚焦系统; (9) 螺线; (10) 输出装置; (11) 收集极

太赫兹行波管主要是应远程探测雷达和目标特性成像雷达的需求而发展研制的。太赫兹行波管一般具有上百千瓦的峰值功率和五千瓦至数十千瓦的平均功率,其工作带宽约为 10 %,脉冲宽度为百微秒级甚至到毫秒级准连续波状态,因而可很好地满足雷达的要求。目前国外关于太赫兹行波管的技术研究已经几近成熟和完善,而以美国 CPI 公司为代表的西方发达国家主要的微波电真空器件研制生产企业也有了比较成熟的产品。相比之下,我国在这方面的研究还存在很大的不足,国内只有中电科技集团第十二研究所(12 所)和三乐电器两家单位从事太赫兹行波管的研制工作,起步较晚。2005 年,12 所启动了 X 波段太赫兹行波管的研制工作,突破了双阳极电子枪、损耗纽扣、整体式线包和大功率输出窗等关键技术^[7]。以后该项目取得了很大进展。2007 年的制管结果显示,功率、增

益、效率以及带宽等指标均已达到设计要求,而且系统工作稳定,无需打火。另外,整管的电性能也已达到设计指标。但我们也要清楚地认识到,在 L、S、C 和 Ku 波段,国内还没有真正意义上的太赫兹行波管。太赫兹行波管的发展势在必行,我国也更应该加紧相关的研究工作,以缩小我国与国际先进水平的差距甚至是达到国际先进水平。

4 扩展相互作用谐振器

扩展相互作用振荡器(Extended Interaction Oscillator, EIO)是一种工作在返波段的器件,由自激产生微波,而且其产生微波的频率与振荡器的尺寸密切相关。当结构尺寸逐渐缩小时,其频率会随之增大。目前,微机电系统和光刻等加工水平已经达到了 μm 量级。在此基础上,利用 EIO 作为 THz 源,输出电磁波的频率可以达到 0.5 THz。另外, EIO 还具有以下特点:既有慢波

线又有谐振腔, 电场较强; 电子与高频场同步前进, 周期性地相互作用, 电子将能量转化为高频场能量。EIO 的频率可以覆盖 $0.1 \sim 0.5$ THz。与同类的真空器件相比, 它拥有组装紧凑、结构轻巧以及可组装成提供频率捷便和短脉冲波长的高功率发射机等优势。

EIO 的工作原理与其他纵向电真空器件基本相同。如图 5 所示, 典型的 EIO 器件是由多个谐振腔连成的, 其整体构成了一个慢波系统。电子注在慢波结构中运动, 当电子注经过慢波线上的缝隙时, 会激发起电磁场。如果此时激发电磁场的频率恰好相当于谐振腔的固有频率, 而且电流的大小达到起振电流, 那么将会引起谐振腔反复发生谐振, 而其他频率的电磁场则会迅速衰减掉。电磁波在慢波线上传播, 当其纵向传播速度与电子注的运动速度大致相等时 (值得注意的是, 这里的“同步”并非完全同步。事实上, 电子注速度要大于电磁波的相速。当二者速度完全相等时, 群聚中心将会始终在零场中变化, 电子注与高频场之间没有净能量交换; 若电子注速度大于高频场的纵向传播速度, 最终将会导致群聚电子注不断将能量转换给高频场), 电子注在缝隙处受到电磁波的调制, 并开始出现群聚^[8-9]。与其他真空器件不同的是, 在 EIO 的工作

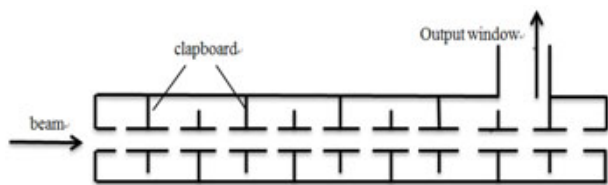


图 5 EIO 的典型结构示意图

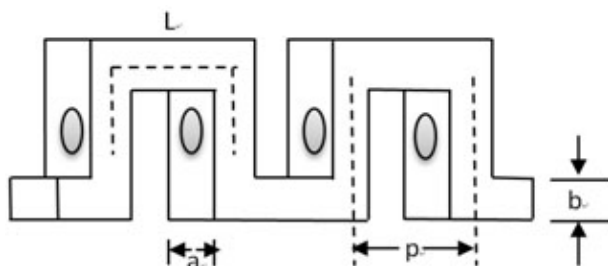


图 6 折叠波导 EIO

过程中, 电子注速度调制、电子群聚和能量交换三个环节融合为一体, 不能分开。

目前国内对 EIO 进行了各方面的尝试和研究, 并通过模拟实验等方法取得了一定的成果。吴振华等人^[10]研究了采用带状电子束的周期加载矩形扩展互作用振荡器, 并分析了该种结构的优点、色散特性和耦合阻抗。他们利用 CST 模拟软件进行了冷腔分析, 并最终验证了在该结构中带状注与高次模互作用的设计思路的正确性。另外, 在工程加工方面, 尽管 LIGA 技术、深度作用离子蚀刻 (Deep Reactive Ion Etching, DRIE) 技术和微模 (Micro-molding) 技术的发展和运用使得加工成为可能, 但是结构的简化仍然是必不可少的。鉴于此, 吴振华等人又提出了以折叠波导作为慢波结构的太赫兹扩展互作用谐振器 (见图 6)。与其他慢波结构相比, 该结构还具有散热效果好、高频损耗小、耦合匹配好以及制造成本低等优点。最近有学者提出了一种基于圆盘加载波导的 THz 分布作用振荡器。它由圆盘加载波导输入谐振腔、漂移管和输出腔构成。在注入电压为 24.85 kV、电流为 20 mA 的条件下, 通过仿真得出该振荡器可产生中心频率为 755.5 GHz、峰值功率为 1.3225 W 的 THz 波。该器件结构简单, 径向尺寸较大, 能够大大降低研制工作的工艺难度。另外, 其散热性能好, 能量输出采用孔耦合方式, 可以有效提高输出功率。

5 结论

本文重点介绍了能够产生 THz 波的几种真空电子器件及其工作原理和发展问题, 并分析了各种器件各自的优缺点, 同时进行了简单的比较, 得出了在上述真空电子器件中, 自由电子激光器最优, 然后依次是回旋管、返波管、行波管、扩展互作用腔的结论。针对不同的应用情境, 当侧重点不同时, 需要根据各器件的特点选择最合适的器件。我们大胆预测, 利用真空电子器件产生 THz 波将会在未来占据主导地位。同时, 随着科研水平的不断提高, 我们坚信我国有实力在 THz 源的研究工作中引领时代风骚, 进而弥补人类在 THz 波段研究与开发利用方面的空白。本文是笔者在收集和整理大量资料后得到

(下转第 22 页)