

## 太赫兹真空电子器件的研究现状及其发展评述

王明红<sup>①②</sup> 薛谦忠<sup>①</sup> 刘濮鲲<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

<sup>②</sup>(聊城大学物理科学与信息工程学院 聊城 252059)

**摘要:** 太赫兹真空电子器件具有输出功率高、可在常温下工作等优点,它在军用、民用领域有着广泛的应用前景。本文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,并对其今后发展趋势作了相应的评述。

**关键词:** 真空电子器件; 高功率微波; 太赫兹源; 太赫兹波应用

中图分类号: TN129

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)07-1766-07

## Review of THz Vacuum Electronic Devices and Development

Wang Ming-hong<sup>①②</sup> Xue Qian-zhong<sup>①</sup> Liu Pu-kun<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>②</sup>(School of Physics Science and Information Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)

**Abstract:** THz Electronic devices have the virtue of high power radiation, operating at normal temperature. They have potential applications in military, civil areas. This paper introduces in detail the recent development techniques and applications of THz electronic devices, and gives some remarks on the developing trend of THz electronics devices.

**Key words:** Vacuum electronic devices; High power microwave; THz Sources; Application of THz wave

### 1 引言

太赫兹(Terahertz, THz)波是指频率在 0.1THz-10THz (波长为 3mm-30 $\mu$ m)范围内的电磁波(简称太赫兹)。由图 1 可见,在长波段它与毫米波、亚毫米波相重合,而在短波段与红外线相重合,在电磁波谱中占有一个很特殊的位置。在理论技术方面,太赫兹的长波方向主要属于电子学范畴,而在短波方向则主要属于光子学,太赫兹这一位置正好处于科学技术发展相对较好的微波毫米波与红外线光学之间,形成一个相对落后的“空白”,这一“空白”蕴含着深刻的物理意义<sup>[1-3]</sup>。



图 1 太赫兹波段在电磁波谱中的位置

太赫兹波(也称 T 射线),它具有毫米波的特点,可以穿透许多物质。太赫兹波也具有红外光的特点,很容易在空间传播、反射、聚焦、衍射。同时,太赫兹波的光子能量很小,其光子能量约为 X 射线的 1/106(频率为 1THz 的波),不会对生物组织产生破坏作用,所以与 X 射线相比更具有优势。

经过近十几年的研究,国际上对太赫兹辐射已经达成如下的共识,即太赫兹是一种新的、有很多独特特点的辐射源;太赫兹技术是一个非常重要的交叉前沿领域,其独特的性质将在物理、化学、信息和生物学等基础研究领域以及材料、通讯、国家安全等技术领域具有重大的科学价值和广阔的应用前景,THz 技术被认为是改变未来世界的十大技术之一。本文介绍了国内外各种太赫兹真空电子器件的技术水平及应用现状,并对其今后发展趋势作了相应的评述。

### 2 太赫兹电子器件的国内外研究技术水平

在太赫兹技术及应用中,太赫兹辐射源研究是太赫兹技术发展的重要环节,有多种方法都可产生 THz 辐射,主要包括以下几类<sup>[4,5]</sup>:(1)半导体 THz 源,如采用量子级联半导体激光器可直接产生 THz 源。半导体 THz 源具有小巧、价格低廉和频率可调的特点,是人们希望的一种 THz 源,但这类技术的 THz 源中,大部分需要器件的制冷且输出的功率较小,并且要把频率延伸到 T 赫兹也是件难事;(2)基于光子学的 THz 发生器,如利用超短激光脉冲去激发太赫兹辐射源也是产生脉冲太赫兹辐射的主要方法,常用的激光激发技术有光导和光整流技术。但目前来说,这些方法的转换效率都很低,太赫兹光束的平均功率只有微瓦的数量级;(3)基于真空电子学的 THz 辐射源,如自由电子激光器,电子回旋管、返波管 BWO 等,这类技术产生的太赫兹源具有输出功率高,可在常温下工作等优点。随着 THz 科学技术的

迅速发展,对于 THz 辐射源在大功率方面的要求日益增强。对于远距离成像和非破坏高穿透波谱研究等,需要可调或宽带瓦级以上功率输出的 THz 辐射源。太赫兹与物质的非线性作用,探测物质内部由高功率太赫兹激起的非线性现象等需要大功率 THz 辐射源。到目前为止,仅真空电子学和等离子体电子学的方法可以产生高功率太赫兹辐射。因此,真空电子器件在 THz 辐射源方面可能做出很重要的贡献<sup>[6]</sup>。近年来太赫兹科学技术的发展推动了太赫兹波段的真空电子器件迅速发展并取得了重要的成果。

### 2.1 太赫兹自由电子激光

自由电子激光(FEL)的工作波长可以从 mm 波到 X 射线,覆盖了整个太赫兹波段,而且通过调节电子束的能量实现输出波长连续可调,可以产生高脉冲功率或高平均功率的激光。图 2 是自由电子激光工作原理的示意图,它由电子束注入器(电子加速器)、具有横向空间周期结构的磁摇摆器和谐振腔 3 部分组成。从加速器输出的高能电子通过磁摇摆器时,受到静磁场作用而产生横向摆动。横向速度的变化又通过与电磁波的横向磁场分量作用而产生纵向力(称为有质动力势),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。

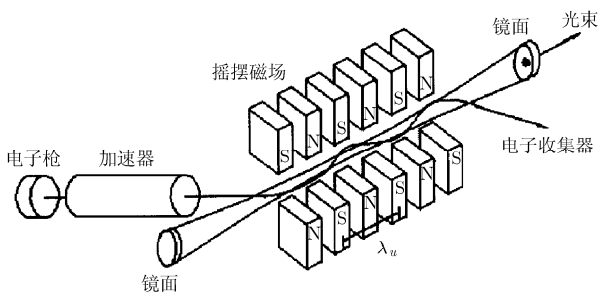


图 2 FEL 工作原理示意图

自由电子激光产生 THz 辐射成为 FEL 的一个重要发展方向,目前世界上已建成多台太赫兹波段的自由电子激光器,并且有的已经处于使用阶段<sup>[7-9]</sup>。美国加利福尼亚大学研制利用 1MeV 静电加速器产生的自由电子激光(UCSB-FEL),它是太赫兹波段自由电子激光最重要成果之一,该装置在准连续波模式下运行,提供在太赫兹波段可调谐的相干辐射,工作频率 120GHz-4.8THz(波长 2.5mm-60μm),输出功率从 500W 到 5kW,脉冲宽度 1-20μs,重复频率 1Hz<sup>[10,11]</sup>。

俄罗斯在新西伯利亚建造了 THz-FEL,该装置采用连续波能量回收直线加速器系统(ERL),自由电子激光的工作电压 2MV,电流 20mA,产生功率 400W、频率 120-230μm 输出<sup>[12]</sup>。韩国也研制出了紧凑型(compact)太赫兹波段自由电子激光<sup>[13]</sup>,输出波长 100μm-1.2mm,对应频率 0.3-3THz,脉冲功率 1kW。

2005 年 4 月,中国工程物理研究院在原有曙光一号毫米

波段自由电子激光放大器基础上,研制出了我国首台自由电子激光太赫兹辐射源。该太赫兹源辐射波长为 115μm (2.6THz),谱宽 1%,它是中国工程物理研究院基于射频直线加速器技术的远红外自由电子激光实验所取得的突破性进展,该成果标志着我国第一个可调谐相干太赫兹(THz)光源建成出光,填补了国内空白。

常规 FEL 需要用加速器驱动,设备庞大,造价昂贵,只适用 THz 研究平台。发展简易、使用型、台式的 Smith-Purcell 型 THz 自由电子激光成为开发太赫兹电子器件的一个重要途径。美国佛蒙特州光子学研究所早在 80 年代初就开始太赫兹辐射源的研究,他们研制出了基于 Smith-Purcell 效应的可调谐辐射源,提供连续波功率 10μW,波长 200μm-900μm (0.3-3.0THz),可应用到高分辨率太赫兹谱仪,进行生物体或纳米技术探测实验<sup>[14]</sup>。在国内,电子科技大学也一直致力于 Smith-Purcell 自由电子激光研究,在 90 年代初已研制出 0.14THz 输出功率达 140mW 以上,脉冲输出功率达数百兆瓦的 Smith-Purcell 相干辐射器件,目前正在开展向更短波长的太赫兹 Smith-Purcell 相干辐射源的研究。

### 2.2 太赫兹回旋管

回旋管是一种快波器件,它可以工作在过模状态,其谐振腔的物理尺寸可远远超过工作波长,因此,回旋管可以在很高的工作频率下输出高脉冲功率或平均功率。图 3 是回旋振荡管的结构示意图,基本工作原理:从电子枪发射具有一定纵向和横向速度比率的电子注,在正交磁场的作用下,电子将作回旋运动,当电子注(或其谐波)的回旋频率与腔中 TE 模电磁波谐振频率满足同步条件时,即  $\omega - k_z v_{z0} - s\omega_c / \gamma \approx 0$ ,电子注与电磁波产生强烈相互作用,电子在回旋轨道上产生角向的相位群聚,电子的横向能量有效地转化为谐振模式的电磁能量。

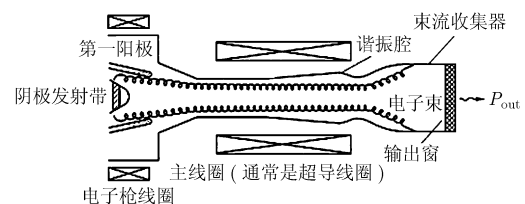


图 3 回旋振荡管结构示意图

日本福冈大学报道他们近年来研究回旋管的系列成果<sup>[15,16]</sup>,该系列回旋管有以下主要特点:具有很高的工作频率,其中最高工作频率达 1.013THz,该工作频率下采用了超导磁铁,提供磁场脉冲强度 21T,工作模式  $TE_{4,12}$ ;通过调节工作磁场实现宽频率范围内调节,系列回旋管覆盖频率范围 38-1.013GH。日本福冈大学这一系列研究成果是目前太赫兹波段回旋管的重要成果之一。

美国海军实验室也研究了具有超高磁场(16.6T)的太赫兹波段回旋管振荡器<sup>[17]</sup>,工作频率 500-1000GHz,输出功率

数百瓦。运行在一次或二次谐波下,工作模式为  $TE_{0,6,1}$  或  $TE_{0,12,1}$ 。俄罗斯科学院应用物理研究所(IAP)正在研制频率 1THz, 脉冲输出功率 10kW 的回旋管。

我国真空电子器件已有相当好的基础,电子科技大学在真空电子器件方面的研究工作也已有近30年的历史,回旋管的研究工作已在电子科技大学和中国科学院电子学研究所进行,电子科技大学已研制出频率0.1THz, 脉冲功率118kW, 平均功率2kW的回旋管。

进一步提高频率要遇到强磁场的限制,甚至采用超导磁铁,这样的磁场系统过于庞大、造价昂贵,不利于实际应用。因此,降低磁场是太赫兹回旋管研究重点之一。理论上,让回旋管工作在高次谐波可有效的降低工作磁场,当回旋管工作在  $N$  次回旋谐振时,需要的磁场为工作在基波时的  $1/N$ 。然而,回旋管工作在高次谐波时,获得高效率 and 抑制模式竞争是很困难的。

### 2.3 太赫兹返波振荡器(BWO)

返波振荡器(BWO)是一种经典电真空微波源慢波器件,在反向波器件中,电磁波的相速度与群速(能速)传输方向相反,在电子注的输入端将电磁波的能量引出。BWO 器件一般外加轴向起准直电子束的磁场(强度约 1T)。俄罗斯研制 BWO 可以产生频率 180~1110GHz, 输出功率 3~50mW 的电磁辐射,已在欧洲及美国成为商业产品投入应用。BWO 装置需要水冷系统和高偏置电压外设,其重量超过 27kg, 消耗功率 270W。为满足特殊场合对太赫兹源的要求,美国航天局(NASA)支助 Calabazas Creek Research(CCR)开发工作频率 300GHz~1.5THz 的 BWO 研究项目<sup>[18]</sup>, 该振荡器将做为低噪声外差接收机的本振源,用于低背景的射电天文观测,彗星、地球和其它行星大气层的遥感。下一步研究工作主要目标是减轻器件重量,提高工作效率,展宽频率调谐范围(超过 1THz)。采用的主要技术路线:改进降压收集极,以提高工作效率、减小水冷系统;提高电子枪性能及优化慢波电路系统,提高注-波相互作用效率;改善耦合输出结构,提高模式纯度;以及减小磁场系统的体积和重量。图 4 给出了 BWO 太赫兹源的重要组件,包括电子枪、慢波电路、降压收集极和射频输出结构。除水冷系统、磁场及电源部分外,其核心部件长度不超过 20cm。BWO 的工作频率取决于电子注能量及慢波系统周期,通过调节电子束电压 3 kV~6 kV, 实现频率的调谐。

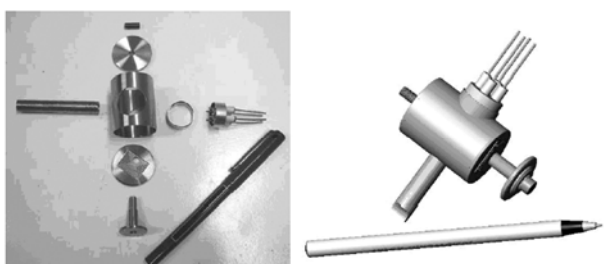


图 4 太赫兹 BWO 关键组件

### 2.4 太赫兹折叠波导行波管

应用于军用设备或航空系统上的 THz 源,对源器件的功率、重量及体积尺度等参数的要求是严格的。微加工技术,包括 MEMS 和 LIGA 技术和真空电子技术的结合,可以制造微型真空电子器件。这种器件具有更高的工作频率、更小的体积、更低的重量和更低的成本,它将带来微波管制造技术的重大变革。目前研究表明微型折叠波导行波管是一种极具发展潜力的太赫兹器件,不少国家开展了对太赫兹折叠波导行波管放大器和振荡器的研究工作<sup>[19,20]</sup>。这种太赫兹折叠波导行波管放大器发生的物理过程是:由折叠波导形成慢波结构,如图 5 所示,使电磁波的纵向传输相速度小于光速,电子注沿折叠波导上的纵向开孔穿过,当电子注的平均速度稍大于行波相速度时,电子在纵向产生群聚,大部分处于减速场,被减速电子交出部分能量给行波场。

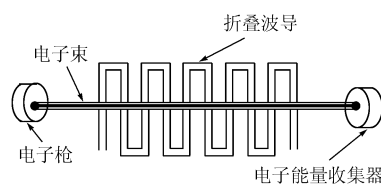


图 5 折叠波导 THz 系统

威斯康星(Wisconsin)大学研制出 560GHz, 56mW 输出的折叠波导行波管振荡器示实验装置。前期的理论分析和数值模拟表明,这种小型化的太赫兹源可以实现 20% 的带宽和 0.01~1W 的功率输出。这种波导电路是一种平面结构的金属慢波电路,它具有一系列特点,如:易于加工和散热,功率容量比较大,带宽介于螺旋线行波管和耦合腔行波管之间,高频损耗较小,和外电路的耦合结构简单等<sup>[21]</sup>。越来越先进的微加工技术,解决了折叠波导行波管小尺寸高精度线路的制造的困难。可望以折叠波导行波管为突破口,得到先进的高功率、高效率 and 轻重量的太赫兹器件,使太赫兹技术得到更为广泛的实际应用。

### 2.5 太赫兹纳米速调管

纳米速调管将纳米技术、微电子加工技术以及真空电子器件技术融合在一起,是一种有望在太赫兹波段有较大贡献的新型器件。它不仅产生毫瓦级的功率输出,而且工作电压低(通常只有几十至几百伏),不需要磁场,还具有低色散、长工作寿命等特点。目前它已成为 THz 领域的一个很热门的研究课题,以美国为代表的技术先进国家,正在投入大量的人力物力对其进行研究。THz 速调管的研究已经取得了很大的进展<sup>[22-24]</sup>, 美国加州理工学院(CIT)的 JPL 实验室等研制的纳米速调管可望在 1~3THz 频率上工作,该器件主要用于空间对地面和行星的遥感。图 6 是纳米速调管的示意图,它由冷阴极电子枪、群聚漂移管、RF 谐振腔、反射阴极和功率输出端口组成。所有的加工都在两个硅片上进行,最终

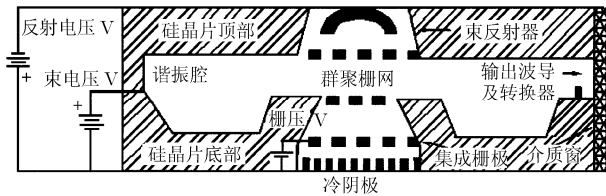


图6 纳米速调管结构示意图

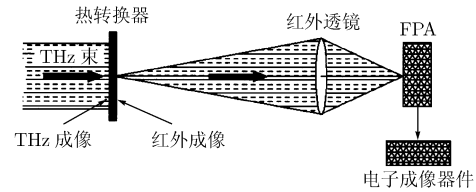


图7 FEL 太赫兹源成像实验原理图

焊接在一起。在工作电压 500V, 电流 3mA 条件下, 可产生 50mW 功率、频率 1200GHz 的辐射。纳米速调管太赫兹源是一种很有创新意义的新器件, 由于它使用了微加工技术, 可以保证每个纳米速调管的频率和相位一致, 因此可以组成纳米速调管阵列, 大大提高输出功率, 预期应用频率范围在 0.3-3.0THz, 输出功率大于 50mW。

其它类型电真空器件, 如扩展相互作用振荡器(EIA)、绕射辐射振荡器(Ortron)、切伦科夫辐射器件等, 其工作频率也已经接近或达到 1THz, 连续波功率在 0.1W 到数十瓦。

### 3 太赫兹真空电子器件的国内外应用现状

太赫兹成像技术及太赫兹波谱技术由此构成太赫兹应用的两个主要关键技术。介于微波和红外之间的太赫兹波成像, 相对于可见光和 X 射线有很强的互补特征, 特别用于可见光不能透过而 X 射线成像的对比度又不够的场合, 而且太赫兹还通过相位测量得到折射率的空间分布, 获得更多的信息。太赫兹作为一种电磁波, 金属对它是透明的, 可以穿透大部分干燥的非金属和非极性物质, 如衣服、塑料、包装物和非有机物。近年来, 国际上发展多种基于窄带或宽带低功率太赫兹源成像方法, 由于热背景干扰, 利用这些低功率太赫兹源成像需要相当复杂的检测系统, 而且多数情况成像需要较长时间, 采用高功率太赫兹真空电子器件可以克服上述某些不利因素。

#### 3.1 太赫兹自由电子激光的应用

俄罗斯 Novosibirsk 国立大学开展了系列自由电子激光太赫兹波源成像的应用实验<sup>[25, 26]</sup>。激光工作参数为: 波长范围 120-180 $\mu\text{m}$ , 平均功率 200W, 峰值功率 0.6MW, 脉宽 50ps, 脉冲重复频率 5.6MHz。图 7 是利用太赫兹源透射成像的实验装置图, 用太赫兹光束照射到成像物体, 即用致密的复写纸(carbon paper)封袋包装金属钥匙, 这里的复写纸起到热敏转化作用, 将透射的太赫兹波段像转换为红外波段的像, 经红外汇聚透镜在电子红外显示器(FPA)中成像, 从图 8 中可以看到清晰的金属钥匙的像。第 2 个实验, 在薄的铝片上刻有“FEL BINP”字母, 太赫兹波照射下, 在热敏图像仪上成清晰的像。这种成像技术可进一步发展为生物医学成像, 进行非损伤性检查。

韩国与俄罗斯合作研究利用小型自由电子激光作为太赫兹源, 通过干涉图测量薄膜材料特性的实验<sup>[27]</sup>。利用这种表面电磁波干涉方法可高精度地测量金属氧化物、介质薄膜

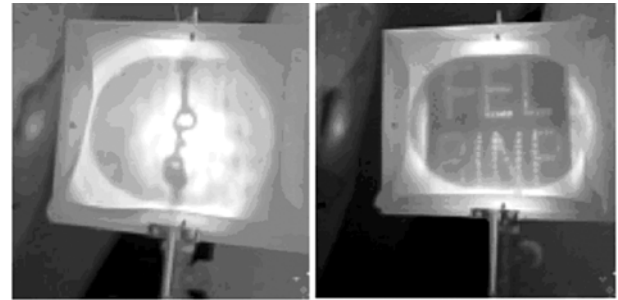


图8 太赫兹源透射成像结果

以及晶体的光学常数。此外, 韩国还开展了自由电子激光太赫兹源(波长 110 $\mu\text{m}$ )测量液体、水蒸汽吸收特性以及生物体太赫兹成像的研究。意大利开展了自由电子激光(ENEA-FEL)太赫兹源与生物组织相互作用特性研究<sup>[28]</sup>。

#### 3.2 太赫兹返波振荡器(BWO)的应用

返波振荡器(BWO)太赫兹辐射源是目前发展比较成熟的一种小型台式、造价低廉的基于真空电子学太赫兹源, 不少国家的科研机构正在研究拓展其应用领域。德国报道了他们研制的第一代紧凑型用于射电天文观测的太赫兹波段外差式接收机, 该接收机利用了 620-650GHz 的太赫兹 BWO 辐射源<sup>[29]</sup>, 再经过倍频后作接收机的本振源, 外差式接收机覆盖频率为 1.6-1.9GHz 及 2.4-2.7GHz 两个频段。工作频率为 1.9GHz 时, 输出功率为 2.5 $\mu\text{W}$ 。该接收机以飞机为测试平台, 初步的实验测试结果表明其性能指标满足德国联邦航空局的安全标准和航空认证要求。

日本设计了基于波振荡器(BWO)辐射源的太赫兹成像系统<sup>[30]</sup>, 通过调节 BWO 电极的工作电压可以实现工作频率在 520-710GHz 范围调谐。该系统特点是: 辐射源具有很高的信噪比(10,000:1)、较高输出功率、良好的波前特性和稳定的功率输出。样品上的太赫兹光斑尺寸只有 550 $\mu\text{m}$  (接近衍射极限), 可在单色、连续波模式下工作, 最高输出功率 15mW。他们还报道了几个初步的成像实验, 其一是验证太赫兹波透射实验的结果, 一个纸盒里面装有几件金属物, 如: 硬币、螺丝钉、金属纸夹, 将纸盒盖子合上, 用太赫兹波扫描可以清晰看到纸盒内部的金属物物件。另一个太赫兹成像应用是在生物学中的样品分析, 给出了树叶及动物蜥蜴水的总含量及分布情况, 可以对动植物进行连续的、无损伤的水含量检测。俄罗斯科学院研究了基于 BWO 太赫兹辐射源的光谱测量方法和实验系统<sup>[31]</sup>。

### 3.3 太赫兹回旋管的应用

回旋管振荡器的应用主要朝着两个方向发展。其一, 发展高功率、毫米波段回旋管作为等离子体加热源; 其二, 发展中等功率、亚毫米波、太赫兹波段回旋管作为等离子体测试、材料加工等。日本福冈大学研制了基于回旋管太赫兹辐射源的材料加工系统<sup>[32]</sup>, 系统中回旋管振荡器的工作频率为300GHz, 在基波  $TE_{22,8,1}$  模式下运行, 轴向磁场强度 10.9T, 电子束最大工作电压 16kV, 电流 1A。通过调节电子束电压, 连续波输出功率 0.5~3.5kW。

THz 在等离子体检测方面也具有重要的应用, 利用 THz 辐射可以探测出高温、高密度等离子体中的密度及速度的空间分布。太赫兹波段回旋管具有高功率、长脉冲、窄线宽等特点, 被认为在太赫兹波段最适合作为热核聚变的等离子体诊断辐射源之一。

## 4 太赫兹真空电子器件的发展趋势

开发高功率、造价低、重量轻、体积小、实用型的真空电子学太赫兹器件是今后的发展趋势。真空电子学太赫兹源进一步发展在技术上需要解决一些关键问题: 进一步改善高频系统结构, 提高功率容量, 抑制模式竞争, 采用新的阴极材料提高电子枪发射能力, 增强注-波相互作用效率; 在理论上也有必要加强对新型太赫兹器件机理的理解, 探求更完善的分析方法和设计模拟软件。

### 4.1 利用光子晶体带隙(PBG)结构改善高频系统特性

随着频率提高(超过 1THz), 其零部件尺寸将要求加工得很小, 因而器件功率容量受到限制, 而且要提高电子束电流并能使其顺利通过尺寸非常小的高频系统也面临困难。此外, 随着频率升高, 趋肤深度减小, 损耗增加。为了解决这一问题, 美国 MIT 的实验室将光子晶体带隙结构用于工作频率 140GHz 的回旋管谐振腔<sup>[33]</sup>, 使谐振腔得到改进和优化, 利用 HFSS 高频仿真软件模拟光子晶体谐振腔的结果如图 9 所示。

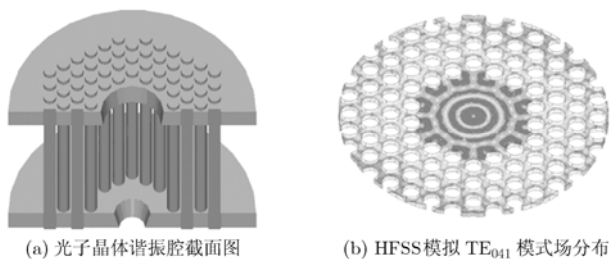


图 9

利用带隙结构可以对电磁波的传输进行控制, 电子辐射激励起来的电磁波的工作模式被限制在光子晶体带隙结构的中心缺陷区, 而使其它竞争模式通过 PBG 泄漏出去, 这样在增大波导尺寸以提高功率容量的同时, 又可以有效抑制模式竞争, 实现单一模式的输出。

韩国汉城大学也在研究利用场发射冷阴极和 MEMS 加工的光子晶体谐振腔的反射式速调管, 实验表明可以得到功率较大的亚毫米波辐射源<sup>[34]</sup>。利用光子晶体谐振腔可以选择地稳定激励  $TM_{mn0}$  的高阶模式, 由于模式间隔增大, 在谐振腔中几乎不存在模式竞争。具有光子晶体带隙结构的返波振荡器(PBG-BWO)的研究也有相关的报道。

### 4.2 采用准光学腔结构抑制模式竞争、提高功率容量

解决太赫兹波段谐振腔受尺寸定律限制的另一种途径利用准光学开放腔。采用开放式高频系统代替封闭的高频系统, 就将得到具有新的本征频谱或波数谱, 由于某些高阶模式可以从谐振腔开放式侧面辐射出去, 使本征频谱变得稀疏, 这样在适当增大谐振腔尺寸条件下仍然可以单模工作, 降低了抑制模式竞争难度, 提高了器件功率容量。这项技术已在毫米波、亚毫米波电真空器件, 如回旋管、自由电子激光器件中得到应用, 准光学技术也必将会对真空太赫兹电子器件的发展起到积极的作用。

### 4.3 采用新的阴极材料提高电子枪发射能力

在太赫兹真空电子器件发展中, 需要进一步提高阴极的发射能力, 以提高电流密度、电子束的质量。获得高的输出功率需要提高电子束电流, 目前大多数电真空器件采用的热阴极电子枪, 提高其束流的发射密度与延长工作寿命是相互制约的因素, 因此太赫兹波段电真空器件的发展要在电子光学系统方面需要探索更有效的阴极材料。利用微加工技术制造的场致发射阵列阴极也是提高电子束发射强度的途径之一, 该项技术已用于纳米速调管的研制。此外, 光阴极电子枪已在短波长、高增益的自由电子激光中应用, 光阴极的束流比热阴极高, 在同一束流情况下, 光阴极发射面可以比热阴极发射面小, 因而束流初始发射度小, 可以获得更高质量的电子束源。太赫兹真空电子器件可进一步探索采用光阴极电子枪可行性。显然, 光阴极引入将会增加器件的技术难度和制造成本。

### 4.4 探索产生太赫兹源的新机理、新器件

随着太赫兹技术发展, 人们不断探索产生太赫兹电子器件的新机理、新器件。韩国原子能研究所近期报道了他们开展的多种产生太赫兹强辐射新机理探索, 如: 研究通过电子的康普顿背散射 (Compton back-scattering) 产生太赫兹以及 X 射线辐射; 利用相对论电子的非线性汤姆孙散射 (Thomson scattering) 产生太赫兹辐射可行性; 此外, 还研究了脉冲激光诱发等离子体太赫兹辐射, 其产生机理是: 当高功率激光脉冲能量聚焦到固体、液体或气体靶上, 过高激光功率足以使靶激发出具有相对性的电子(电子质量不再为常数), 称之为相对性等离子体。激光与相对性等离子体进一步相互作用产生太赫兹辐射。中国科学院物理研究所也报道了利用脉冲激光诱发等离子体太赫兹辐射源研究成果。

### 4.5 设计开发新的模拟软件, 减少开发设计成本

随着频率和功率不断提高需求, 太赫兹电真空电子器件

不仅在技术上借鉴半导体器件精加工技术,以得到尺寸很小的高精密的 THz 新型器件。在理论上,也需要考虑将真空电子器件的经典理论与考虑量子效应的纳米电子学理论相结合,进一步加强对新型器件机理理解,探求更好的适于太赫兹电子学源新的理论分析方法和设计开发模拟软件。太赫兹电子器件的设计依赖于计算机精确、快速、多种多样的建模和模拟技术,现有的粒子模拟软件都有一定的频率适用范围,需要完善或重新开发模拟软件以适应太赫兹波段真空电子器件的设计,减小开发设计成本。美国加州理工学院(CIT)的 JPL 实验室开发出了 THz 速调管的注-波互作用模拟软件,正在准备研制实验样管。

## 5 结束语

太赫兹科学技术发展至今不到 20 年,很多关键技术问题,如太赫兹辐射源和太赫兹检测技术等还尚不够成熟。要使太赫兹技术从实验室转向更广泛的满足不同场合需要的实际应用方面,还有许多工作要做。在太赫兹源的研究中既要重视基于真空电子学太赫兹源的发展,也要重视基于半导体太赫兹源和光子学太赫兹源的发展,兼顾适合不同应用需求的低、高段频率,大、中、小功率,各种体积、重量不同的太赫兹辐射源协调发展。随着研究的深入,可望迎来太赫兹技术革命性的应用。

## 参考文献

- [1] 刘盛纲. 太赫兹科学技术的新发展. 中国基础科学, 2006, 8(1): 7-12.  
Liu Sheng-gang. Recent development of terahertz science and technology. *China Basic Science*, 2006, 8(1): 7-12.
- [2] Siegel P H. Terahertz technology. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, 2002, 50(3): 910-928.
- [3] Adri D and Chiko O. Terahertz-wave sources and imaging applications. Institute of physics publishing. *Measurement Science & Technology*, 2006, 17(11): 161-174.
- [4] Michael S. Terahertz technology: devices and applications. Proceeding of ESSCIRC, Grenoble, France, 2005: 13-21.
- [5] Carr G L, Martin M C, and Mckinney W R. High power terahertz radiation from relativistic electrons. *Nature*, 2002, 420(14): 153-156.
- [6] Liu Shenggang, Yan Yang, and Zhu Dajun, *et al.* The possible contribution of vacuum electronics to THz radiation sources. IEEE International Conference on Vacuum Electronics. Korea, 2003, 4: 357-358.
- [7] Caplan M and Bongers W A, *et al.* Prediction of FOM FEM experimental results using multi-mode time-dependent simulations. *Nucl. Instr. And Meth. In Phy. Res.*, 2005, A407 (1): 45-49.
- [8] Gallerano G P. Overview of therahertz radiation sources. Proceedings of the 26th International Free Electron Laser Conference, Trieste Italy, 2004: 216-221.
- [9] Ramian G and Elias L. The new UCSB compact far-infrared FEL. *Nucl. Instr. And Meth.*, 1988, A318(2): 81-88.
- [10] Sung C, Tochitsky S Ya, and Ralph J E. High-gain seeded FEL amplifier tunable in the terahertz range. Proceedings of the 27th International free electron laser conference, California, USA, 2005: 87-90.
- [11] Sobajima Masaaki and Koike Hidehito. Numerical study of optical-cavity misalignment effects for a far-infrared FEL. *Nucl. Instr. And Meth.* 2002, A483(3): 240-244.
- [12] Bolotin V P, Vinokurov N, and Kayran D A, *et al.* Status of Novosibisk THz FEL, Proceedings of the 2004 FEL Conference, Korea, 2004: 226-228.
- [13] Stuart R A and Al-Shamma'a A I, *et al.* Compact tuneable terahertz source, Proceedings of APAC 2004, Korea, 2004: 759-761.
- [14] Shin Y M, Kim J I, and Han S T, *et al.* THz Smith-Purcell radiation enhanced by counter steaming electron beam with one-dimensional photonic. Proceeding of 6th International Vacuum electronics Conference, Noordwijk:The Netherlands, 2005: 389-390.
- [15] Toshitaka Idehara, Isamu Ogawa, and Seitaro Mitsudo. Development of frequency tunable, medium power gyrotrons (gyrotron FU Series) as submillimeter wave radiation sources. *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 1999, 27(2): 340-354.
- [16] Agusu La and Tsuchiya H, *et al.* The experiment results and theoretical analysis of a THz gyrotron using a 21T pulse magnet at FIR FU, Proceeding of 8th International Vacuum electronics Conference, Japan, 2007: 343-344.
- [17] Nusinovich Gregory S and Read Michael E. Theroy of step-tunable gyrotrons operating at two cyclotron harmonics. *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 1999, 27(2): 355-362.
- [18] Ives L and Kory C, *et al.* Development of backward wave oscillators for terahertz applications. Proceedings of SPIE. USA, 2003, Vol. 5070: 71-78.
- [19] Bhattacharjee S, Booske J H, and Kory C L. Folded waveguide traveling-wave tube sources for terahertz radiation. *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 2004, 32(3): 1002-1014.
- [20] 廖复疆. 微型真空电子器件和太赫兹辐射源技术进展. 电子学报, 2003, 31(9): 1361-1364.  
Liao Fu-jiang. Micro-Vacuum Electron Devices and Terahertz Vacuum Sources. *Acta Electronica Sinica*, 2003, 31(9): 1361-1364.
- [21] Lawrence Ives R. Microfabrication of high-frequency vacuum electron devices. *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 2004, 32(3): 1277-1291.
- [22] Joan Garcia-Garcia and Ferran Martin, *et al.* Optimization of micromachined reflex klystrons for operation at terahertz frequencies. *IEEE Trans. on Microwave Theory and*

- Techniques*, 2004, 52(10): 2366-2370.
- [23] Manohara H M, Siegel P H, and Marrese C, *et al.* Fabrication and Emitter Measurements for Nanoklystron: A Novel THz Micro-Tube Source. Third IEEE International Vacuum Electronics Conference- IVEC, USA, 2002: 28-29.
- [24] George P A, Manolatu C, and Rana F, *et al.* Interated microcavity klystrons for generating high power coherent terahertz radiation. 2005 Conference on Lasers & Electro-Optics (CLEO). Maryland, USA, 2005, Vol.3: 1951-1953.
- [25] Cherkassky V S and Knyazev B A, *et al.* Imaging techniques for a high-power THz free electron laser. *Nucl. Instr. And Meth.* 2005, A543(1): 102-109.
- [26] Jeong Y U and Kazakevitch G M, *et al.* Application of a wide-band compact FEL on THz Imaging. *Nucl. Instr. And Meth.* 2005, A543(1): 90-95.
- [27] Bogomolov G D and Jeong Y U, *et al.* Generation of surface electromagnetic waves in terahertz spectral range by free-electron laser radiation and their refractive index determination. *Nucl. Instr. And Meth.*, 2005, A543(1): 96-101.
- [28] Doria A, Gallerano G P, and Giovenale E, *et al.* THz radiation studies on biological systems at the ENEA FEL facility. *Infrared Physics and Technology* 2004, 45(5): 339-347.
- [29] Philipp M, Graf U, and Wagner G A, *et al.* Compact 1.9THz BWO local-oscillator for the GREAT heterodyne receiver. *Infrared Physics & Technology*, 2007, 51(1): 54-59.
- [30] Dobroiu A, Yamashita M, and Ohshima Y N, *et al.* Terahertz imaging system based on a backward-wave oscillator. *Applied Optics*, 2004, 43(30): 5637-5646.
- [31] Spektor A, Anzin V, and Goncharov Y, *et al.* Methodology and hardware of terahertz BWO-Spectroscopy. The joint 30th Conference on infrared and millimeter waves & 13th International International Conference on terahertz electronics. Virginia, USA, 2005, Vol.1: 168-169.
- [32] Mitsudo S, Hoshizuki H, and Idehara T. Development of material processing system by using a 300 GHz CW gyrotron. *Journal of Physics*, 2006, 51(1): 549-552.
- [33] Sirigiri J R, Kreischer K E, and Machuzak J, *et al.* Photonic-band-gap resonator gyrotron. *Physical Review Letters*, 2001, 86(24): 5628-5631.
- [34] Vela G O, Miller M S, Grow R W, and Baird J M. Terahertz backward oscillators with photonic crystal waveguides. IEEE International Vacuum Electronics Conference, USA, 2006: 425-426.
- 王明红: 男, 1967年生, 博士后, 副教授, 主要从事高功率微波研究工作.
- 薛谦忠: 男, 1962年生, 博士, 副研究员, 主要从事高功率微波与毫米波领域的研究工作.
- 刘濮鲲: 男, 1965年生, 研究员, 博士生导师, 主要从事高功率微波与毫米波领域的研究工作.