

# 太赫兹技术的研究进展

程兆华 祝大军 刘盛纲

在波长范围跨越高达 10 个数量级的电磁波段中, 波长介于  $30\ \mu\text{m}\sim 1\text{mm}$  的太赫兹(Terahertz, THz) 辐射, 这一曾被称为“THz 空白”的电磁波段领域, 引起科学家越来越多的兴趣。

太, 是兆兆的英译音, 所以太赫兹辐射又称为 T 射线, 属于远红外、亚毫米波范畴。早在上个世纪初, 科学家就对该波段产生了浓厚的兴趣, “Terahertz”一词首次由弗莱明(Fleming)于 1974 年提出, 以用来描述迈克尔逊干涉仪的光谱线频率范围。但在过去相当长的时间里, 由于缺乏有效的产生和检测方法, 相对成熟的微波和光学技术, 对该波段的研究进展相当缓慢。太赫兹波段作为“电磁波段上最后一块未开垦的处女地”, 甚至被人们称为电磁波谱中的太赫兹空(如图 1 所示)。近年来, 由于固态振荡器、量子级联激光器、自由电子激光器和超快激光技术的迅速发展, 为太赫兹脉冲的产生提供了稳定、可靠的激发光源, 使太赫兹辐射机制、检测技术和应用技术研究得到全面发展, 随着新的材料技术提供了更高功率的发射源, 太赫兹技术已经被证明在更加深

入的物理研究及实际应用中有着广阔的应用前景。

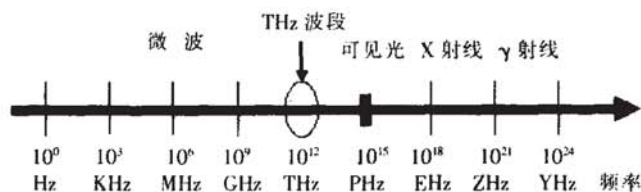


图 1 太赫兹波段在电磁波谱中位置示意图

## 太赫兹波的特点

太赫兹技术之所以引起广泛的研究, 是由于太赫兹波独特的特点, 随着太赫兹技术的不断进展, 可望广泛地应用于基础科学以及军事国防领域。以下简列一下太赫兹波的特点:

大多数分子均有相应的太赫兹波段的“指纹”特征谱, 研究材料在这一波段的光谱对于物质结构的性质以及揭示新的物质有着重要意义; 介于微波和红外光之间的太赫兹波在应用方面相对与其他的波段的微波、可见光以及 X 射线等, 具有很强的互补性(作为一种电磁波, 金属对它完全透明可作为强力

而, 当这些组分中的一个受到足够强的干扰时, 邻近的部分就会失去维持它们在这一序列中位置的一组作用力, 从而导致相互作用的改变, 而进一步引起整个结构的转变。这种仅仅两个配体结合亚基的动作传递给对称性通道很有可能是解释这种严密而稳定的门控运动机制的一种最佳方案, 并且将激活的亚基分子数降到最低。

## 四、展望

对离子通道的结构与功能的研究是当今生命科学研究的热点之一, 也是生物物理的一个重要研究方向。这是一个需要用生物、化学和物理的理论及实验手段进行综合研究的重要领域。这一领域不断有令人惊奇的和意想不到的研究成果出现。这些研究成果向以往理论和实验提出了严峻的挑战。我们期望在实验上和技术上能尽快有所突破, 以便获得关于烟碱型乙酰胆碱受体通道的结构及与其通透性有关的更为详尽和直接的实验数据, 来推动研究工作的进一步深入。在理论上, 从实验出发, 结合烟碱

型乙酰胆碱受体通道的三维结构分析它的实际功能机制。随着对这一问题的研究不断取得突破性的进展, 将有助于人们搞清生命中的运动现象的机制。以神经和心肌细胞为例, 目前有关神经和心脏的药物中, 有一半以上都是作用于这些细胞上的特种离子通道而起作用的。因而研究离子通道是认识细胞功能和发明治疗许多严重疾病的特效药物所必不可少的。目前, 对离子通道的研究已成为分子生物学、分子药理学、生物物理学、神经生物学等多种学科的热点。怎样在分子水平上解释它的结构与功能的关系一直是对离子通道研究的热点。离子通道以其独特的魅力吸引着人们参与到对它的研究中来。对这一问题的研究, 有助于人们在分子水平上理解通道蛋白的一些机制, 帮助人们搞清膜的物质、信息输运机制, 深入认识生命活动的本质。

(谢宁、展永、安海龙 天津河北工业大学理学院 300130; 卓益忠 北京中国原子能科学院 102413)



武器且更优于 X 射线); 太赫兹波极低的光子能量极低(1THz~4MeV), 约为 X 射线光子能量的 1/106, 对大部分生物细胞无害(据悉, 目前国际上用太赫兹技术制成的医疗诊断设备降能可将这种照射对人体的伤害降低 100 万倍); 太赫兹脉冲源通常只包含若干个周期的电磁振荡, 单个脉冲的频带可覆盖从 GHz 到几十 THz 的范围(由于太赫兹波的频带宽, 是微波的 1000 倍, 有望利用太赫兹波进行无线电通信, 使无线移动高速信息网络成为现实); 皮秒量级脉宽的太赫兹脉冲不仅便于时间分辨的研究, 而且最突出的是通过取样测量技术, 能够有效地抑制背景辐射噪音的干扰(目前, 辐射强度测量的信噪比可大于  $10^{10}$ ); 由相干电流驱动的偶极子振荡产生或由相干的光脉冲通过非线性光学差频产生的太赫兹波, 具有很高的时间、空间相干性(现有的太赫兹检测技术可以直接测量振荡电磁场的振幅和相位, 这一特点将极大地推动材料的瞬态动力学问题的研究)。

以上太赫兹种种独特的特点, 注定吸引诸多广泛的研究。相对微波和光学, 关于太赫兹的研究才刚刚起步, 目前国际上的研究仅仅只有 20 多年的历史, 我国则不到 10 年, 市场上利用太赫兹开发的产品仍非常有限, 但现在世界各国纷纷投入庞大的资源来开发太赫兹技术。

#### 太赫兹波的应用前景

目前太赫兹主要应用研究方向大概是物体成像、医疗诊断、材料分析测试、环境检测以及通讯和雷达方面:

介于微波和红外光之间的太赫兹波成像, 相对可见光和 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,



图 2 太赫兹波可透过衣服和报纸成像, 隐藏匕首在太赫兹波的辐射下显示出来

而且太赫兹还可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, 金属对他完全是透明的, 可以穿透大部分干燥的非金属和非极性物质, 如衣服、塑料、包装物和非极性有机物。如今年 12 月 16~17 日在澳大利亚阿得雷德大学召开的一年一度的太赫兹国际研讨会上, 著名的 T 射线研究工作者张希成(Xi-cheng Zhang)教授以及其他几位科学家提出讨论甚至已拟用三维太赫兹成像检测系统来检查机场海关等通关的旅客、行礼、包裹、物品等, 可以即刻准确地查出隐藏的爆炸品、枪支和生化武器, 以排遣潜藏的危险(如图 2), 这是目前太赫兹应用重要方面之一; 另外利用太赫兹脉冲成像的非破坏性和非接触性, 可以有效地来研究珍贵的艺术品以及稀有的古生物化石等等; 还有目前研究较多的 T 射线计算机层析成像技术(简称 CT), 在医学检查、安全检查、环境检测和食品生产质量监控等许多方面有着巨大的应用潜力。

随着飞秒超快激光技术发展的远红外波段光谱测量新技术的到来, 采用太赫兹时域谱(THz-TDS)技术来研究生物大分子日益成为太赫兹应用研究的热点。如图 3, 将激光脉冲分成两股, 一束用于激发超短太赫兹脉冲, 另一束用于探测太赫兹脉冲的瞬时电场振幅, 通过扫描探测激光和太赫兹脉冲的相对时间延迟, 可获得透过样品的太赫兹脉冲的包含了强度、相位、时间等完整信息的时域电场波形, 进而通过傅立叶变换可同时得到样品在太赫兹波段吸收光谱和色散光谱, 通过测试得到不同分子构象和分子间非共价键的相互作用信息, 并且其特有的高信噪比和单脉冲所包含的宽频带能够迅速地对材料组成的细微变化做出分析和鉴定, 所以太赫兹时域

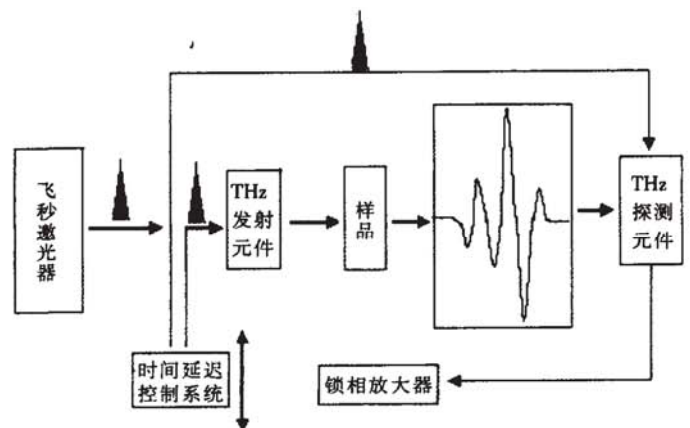


图 3 太赫兹 THz-TDS 测试系统示意图

谱技术在分析和研究大分子方面成了一个研究热点方向。试验表明,可以利用该技术来研究一些生化剂和酶的特性甚至通过太赫兹辐射来探索怎样的DNA形状的变化会影响其与以DNA靶分子的大多数抗癌药物分子的相互作用,从而减少这些抗癌药的毒副作用。

太赫兹波是很好的宽带信息载体,因此在网络通信方面有很大的应用前景。太赫兹波的频率是目前手机通信频率的1000倍左右,利用太赫兹波进行无线电通信,可以极大地增宽无线电通信网络的频带,使无线移动高速信息网络成为现实。最近报道说,Intel公司开发成功一种可以在数太赫兹运行的新型晶体管,这种太赫兹晶体管(被命名为Terahertz晶体管),预计可以使现有的处理器的集成度提高25倍,运行速度提高10倍(如图4);太赫兹波比微波能做到的宽带和迅道数多得多,尤其适合作为卫星间、星地间以及局域网的宽带移动通讯,太赫兹通讯时代可望到来;另外,用光子能量约为可见光光子能量的1/40的太赫兹波作信息载体,比可见光或近中红外光能量效率高得多。从技术上,太赫兹雷达技术可以探测比微波雷达更小的目标和更准确的定位,并且有更高的分辨率和更强的保密性,有望在军事装备和国家安全等方面发挥巨大的作用。

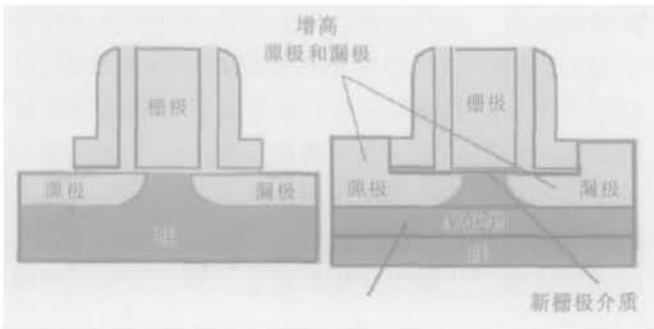


图4 Terahertz晶体管

### 太赫兹源

太赫兹技术应用的关键是要发展高效、便利、经济的太赫兹辐射源和高灵敏度的太赫兹探测器。太赫兹技术发展至今才有20多年的历史,过程中涌现了各种原理各异的太赫兹辐射源和新型器件,经典的如超短脉冲强激光产生太赫兹脉冲,半导体连续波太赫兹辐射源;其他新型的太赫兹辐射源如利用电子和波互作用作为基础的太赫兹辐射源,以及在法国的Fabrey-Perot光学谐振腔基础上提出的适用于太赫兹电子回旋脉塞的准光谐振系统。各有各的

特点,研究者们正在探索一种比较有效的太赫兹辐射源。

下面对目前主要的辐射源做一些简介。

传统的太赫兹辐射源是由激光直接或间接产生的,前者主要包括自由电子激光器、气体激光器和半导体激光器,而后者目前主要的发射技术是光导激发机制和光整流效应。在自由电子激光器中,高速的自由电子在有空间变化的强磁场作用下,通过周期性的结构,在洛伦兹力作用下发生电子振荡并发射光子,以反射镜将光子限制在作为激光增益介质的电子束内。这种系统产生的太赫兹波平均功率和效率较高,且连续可调。气体激光器主要是利用光栅调谐的泵浦激光器注入低压气体腔中产生太赫兹波,这种方法可以获得高达30MW的输出功率,但这种光源不是连续可调的,通常需要大的气体腔和上千瓦的能量输入。这两种激光器体积庞大、价格昂贵,实际应用受到一定的限制。半导体激光器是一类以电流运作的光子源器件,体积小、重量轻、转换功率高、省电,有逐步取代固体和气体激光器的趋势。1994年,贝尔实验室首先研制成功了世界上第一台量子级联激光器,这是一种利用单极子跃迁激射发光的半导体激光器,它不同于传统的电子空穴复合发光的双极子半导体激光器,其激光波长从中远红外到太赫兹波段,高速可调、窄线宽。但要将其波长扩展到太赫兹波段,在其结构设计以及一些性能优化上将面临很多困难。

利用超短激光脉冲去激发太赫兹辐射源也是目前产生脉冲太赫兹辐射的主要方法,常用激发技术有光电导和光整流技术。光导机制是利用超短激光脉冲泵浦光导材料(如GaAs),在其表面瞬时地激发产生大量的自由电子-空穴对(如图5),这些载流子在外加电场或内建电场的作用下加速运动,并且由于光生载流子的复合,在光电导半导体材料表面形成变化极快的光电流,从而产生向外辐射的太赫兹辐射脉冲。这种太赫兹辐射系统的性能主要由光导体、天线的几何结构、泵浦激光脉冲的宽度以及外加电场的强度决定,其中关键部件是光导体,性能良好的光导体一般应具有尽可能短的载流子寿命、高的载流子迁移率以及介质耐击穿强度,常用的光导体是Si和GaAs。而目前应用较多的天线是Grischkowsky型偶极子天线、螺旋型天线和大孔径光导天线。

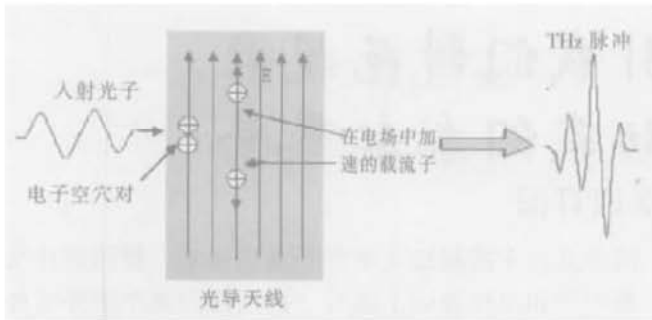


图5 光导天线受激示意图

光整流是一种非线性效应，基于光电效应的逆过程。是利用激光脉冲(脉宽在亚皮秒量级)和非线性介质(如LiTaO<sub>3</sub>、有机晶体DAST等)相互作用而产生的电极化场，从而辐射出太赫兹波。这种机制发出的太赫兹波的能量是直接来源于激光脉冲的能量，其转换效率主要依赖于材料的非线性系数和相位匹配条件。这种方法的同光导天线相比，优点是输出的辐射带较宽，通常可以达到50太赫兹，但是它是将入射光束功率从光频耦合到太赫兹频段，所以效率较低，以致辐射的太赫兹波的能量低于光电导天线辐射的能量。但就目前来说，这些方法的转换效率都很低，太赫兹光束的平均功率只有纳瓦到微瓦的数量级，而作为激发太赫兹辐射的飞秒光源的平均功率却是瓦的数量级。

还有一些基于电子学振荡的太赫兹辐射源，包括狄氏振荡器(Gunn Oscillator)、布洛赫(Bloch)振荡器、Schottky二极管以及冷等离子体等等，这一类发射器体积小、结构紧凑、造价较低，但受微细加工技术的限制。

随着真空微电子学和微加工技术的发展，微真空电子器件的研究范围日益扩展，前景令人振奋。在当代飞速发展的高速数字通信中，如用300GHz以上频率的载波，振荡器和放大管只需大约10%的带宽，就能以大于10Gbit/s的高速度和高安全保密的传输无线电通信信号。另外，研究表明折叠波导行波管(FWGTWT)已成为国际范围太赫兹器件的研究重点。折叠波导行波管是一种极具发展潜力的太赫兹器件，当前的研究水平是，已具有0.01~1W的高功率和20%左右宽的瞬时带宽。

由于折叠波导行波管为全金属结构，容易保证耦合，散热能力强，坚固性强可靠性高，且其线路适宜于精确的微加工技术制造，应而可进行批量加工，较其他太赫兹源相对便宜。近年来相关技术快速发展，推动了太赫兹折叠波导行波管放大器以及振荡

器的向前发展。威斯康星(Wisconsin)大学研制的折叠波导行波管放大器，电子注电压12kV、注电流3mA，在370~420GHz频带内增益G=10dB，其饱和输出功率174MW。这种太赫兹折叠波导行波管放大器中发生的物理过程是：平均速度稍大于行波相速的电子注，在管中产生群聚，由于电子注大部分处于减速场，所以电子被减速而交出部分能量给行波场，行波的振幅不断增大。这种放大作用随着行波的前进而不断积累起来，最终从慢波系统的输出端输出被放大的高频信号(如图6)。

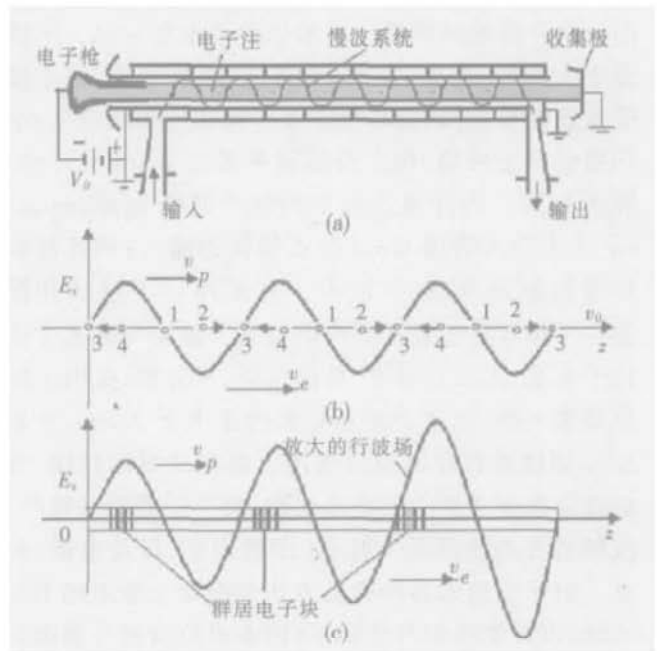


图6 太赫兹行波管中物理过程示意图  
(a)行波管结构示意图 (b)电子注中四类电子受力示意图  
(c) $v_p < v_e$ 行波场的放大示意图

在太赫兹折叠波导行波管中必须要考虑线路的色散特性、电子注空间电荷效应、注波相互作用以及欧姆损耗，以威斯康星大学设计的折叠波导行波管振荡器为例(见图7)，首先选择线路和注参数，用相关软件进行线路预测计算、确定线路增益、得到传输特性以及对注波相互作用过程进行模拟以检查起振和瞬时振荡并解决振荡产生的临界值、稳定性和频谱问

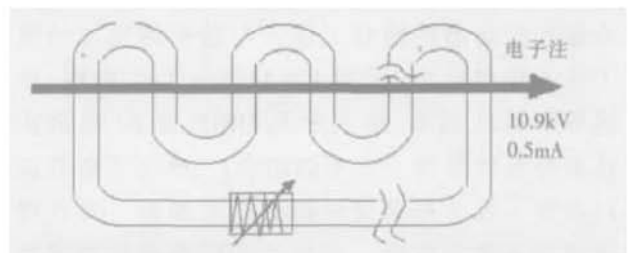


图7 560GHz 太赫兹折叠波导行波管线路示意图



# 她用物理的情趣,引我们科苑揽胜; 她用知识的力量,助我们奋起攀登!

欢迎投稿, 欢迎订阅

2005年的《现代物理知识》,继续设有物理知识、物理前沿、科技经纬、教学参考、中学园地、科学源流、科学随笔和科苑快讯共8个栏目,欢迎大家向这些栏目踊跃投稿。

恳请大家注意以下几点:本刊为科普杂志,旨在向公众介绍被科学界广泛承认的理论和知识,不接受个人创新、设想、发明、质疑、争鸣类稿件,也不接受专业性很强,以致非专业人士无法理解的论文;本刊提倡网上投稿,网上投稿请务必以Word文件(扩展名DOC)附件发送至本刊电子信箱mp@ihep.ac.cn,文中公式请用Word公式编辑器输入;请将篇幅尽量控制在8000字以内,并采用以下格式和设置——作者姓名置于开头醒目处,地址与联系方式注于文末,正文五号字,单倍行距,不分栏,文内小标题最多一级,纸张类型A4,页边距上下2.5cm、左右3cm;用微机打印者也请采用上述格式单面打印,务必随信寄来文章的磁盘或光盘;恕不接受手写稿件;投稿请务必将联系人姓名、详细地址,以及电话、传真、电子信箱等各种联系方式全部在文章末尾书写清楚,以方便我们与您联系(因本单位信箱与新浪信箱不能正常联系,所以务必提供新浪以外的电子信箱);文稿务必附上英文题目和作者的英文姓名,但无需附“参考文献”“摘要”和“关键词”等;手绘插图

题,然后制造器件或模型作检测。如图7所示出频率为560GHz、功率为56MW的新型太赫兹折叠波导行波管振荡器,选择的线路为折叠波导行波管,并且是一个闭合回路,电磁波从输出端反馈到输入端,以进一步与电子注相互作用。

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,与越来越先进的微加工技术相结合,如采用LIGA(包括了X射线、紫外线等平板印刷术,电成形及DRIE技术,电沉积等技术及各种微加工技术的组合),解决了折叠波导行波管小尺寸高精度线路制造的困难,可获得亚微米的表面光洁度,适宜生产折叠波导线路及波导转换结构,能够批量加工三维微型结构,使工作

线条及其中的标注文字务必整洁清晰,插图须在文稿中的相应位置标上编号,插图及图表中的外文务必译成中文;外国人名和地名请尽可能译成中文,有必要保留外文名称时,则在文中首次出现处将外文用括号标注在中译名后面;请注意语言规范,例如“其它”一律改为“其他”、“公里”改为“千米”、“公斤”改为“千克”、句号用圈“。”,数字和百分数尽量采用阿拉伯数字,书刊和一般文章的题目用书名号。

《现代物理知识》的读者对象颇为广泛,有科学工作者、教育工作者、科学管理干部、大学生、中学生和其他物理学爱好者。欢迎各界人士继续订阅!

在邮局漏订或需要过去杂志的读者,请按下列价格汇款到《现代物理知识》编辑部(100049,北京918信箱现编部)补订:1992年合订本,18元;1993年合订本,18元;1994年合订本,22元;1994年增刊,8元;1995年合订本,22元;1996年合订本,26元;1996年增刊,15元;1997年合订本,30元;1998、1999年合订本已售完,尚有1999年1、4、5、6期单行本,每本3元;2000年附加增刊合订本,38元;2000年增刊,10元;2001年合订本,48元;2002年合订本,48元;2003年合订本,48元;2004年合订本,48元;2005年每期7元,全年42元;《奇异之美——盖尔曼传》,32元;《微观纵览》,18元。以上所列,均含邮资或免邮资。

频率扩展至500G~1000GHz。可望以折叠波导行波管做个突破口,得到先进的高频率、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。

综上所述,太赫兹技术正以其独特的应用特点迎来广阔的应用前景,掀起研究热潮,但要太赫兹技术从实验室转向更广泛的实际应用中,还有许多工作要做。缺少高功率、低造价、轻重量、小体积的太赫兹源是限制现代太赫兹技术应用的最主要因素。越来越多的科学家投身研究更为有效的太赫兹源,随着研究的深入,可望迎来太赫兹技术革命性的应用。

(四川成都电子科技大学物理电子学院太赫兹技术研究中心 610054)