

太赫兹波(TeraHertz)科学与技术

贾刚^{*†} 汪力[‡] 张希成^{*}

(^{*} 美国伦塞勒工学院物理系,美国纽约州特洛伊市;

[†] 吉林大学电子科学与工程学院,长春 130023;[‡] 中国科学院物理研究所,北京 100080)

[摘要] 本文介绍了太赫兹波的一些重要性质,太赫兹波的产生和探测技术,以及目前国际上在太赫兹波的基础研究和应用基础研究方面的最新进展,并简单讨论了太赫兹波技术的发展前景。

[关键词] 太赫兹波,发射器,探测器,成像

太赫兹波通常定义为频率从 0.1—10 太赫兹范围内的电磁波。现在研究较多的中心区通常在 0.3—3 太赫兹范围内。太是兆兆(Tera)的英文音译,所以太赫兹电磁波也被称为 T 射线,属于远红外线和亚毫米波范畴。这一频率范围内的电磁波具有丰富的科学内容和广阔的应用前景^[1]。

虽然至少在上一个世纪 20 年代就有人对太赫兹产生了浓厚的科学上的兴趣^[2],但是由于它夹在微波和红外线中间,在技术上它夹在传统的微波技术和光学技术中间,所以相当长一段时期很少有人问津电磁波谱的这一波段,以至于形成远红外线和亚毫米波空白区,也就是太赫兹空白区(如图 1 所示)。最近十多年来,由于用超快激光激发产生 T 射线系统的发展,促使对太赫兹空白区的研究有了很大发展。但是与其他波段电磁波谱技术相比依然处于不发达状态,如果要使太赫兹波科学和技术达到比较完善的程度,可能还需要四分之一世纪。

1 太赫兹电磁波的独特性质

(1)凝聚态体系的声子吸收很多位于太赫兹波段,自由电子对太赫兹波也有很强的吸收和散射,太赫兹光谱分析是研究凝聚态材料中物理过程的一个很好的工具。特别对许多有机分子在太赫兹电磁波段呈现出强烈的吸收和色散特性。这些特性是与有机分子的转动和振动能级相联系的偶极跃迁造成的。利用 T 射线有可能通过特有的光谱特征识别有机分子,就像用指纹识别不同的人一样。

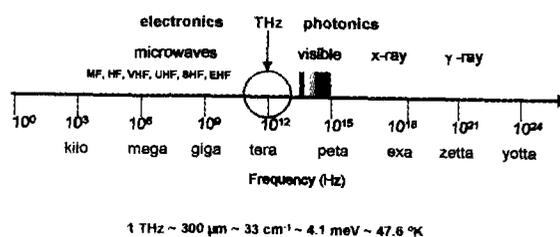


图 1 太赫兹空白区在电磁波谱中的位置

(2) T 射线的光子能量较低,频率恰好是一太赫兹时,光子能量只有大约四毫电子伏特,因此不能对生物组织产生有害的光电离和破坏,适合于对生物组织进行活体检查。

(3) 通过测量脉冲相干太赫兹电磁波信号的时域波形,可以得到包括振幅和相位的光谱数据,直接给出吸收谱和色散谱,或复介电常数、复电导率。

(4) 利用已发展的电光测量或偶极天线测量技术,可以得到具有很高的信噪比的太赫兹电磁波时域谱,并且具有对黑体辐射或者热背景不敏感的优点。

由于以上这些独特的性质,人们对太赫兹波的研究兴趣与日俱增。现在世界范围内从事太赫兹科学与技术研究的课题组已超过一百个,其中美国、欧洲、日本和中国台湾等国家和地区均投入了大量的人力和物力资源。20 世纪 90 年代初,几年内发表的关于脉冲太赫兹波的论文总共只有几十篇,而到 20 世纪末统计,11 年来发表的关于脉冲太赫兹波的

本文于 2002 年 5 月 8 日收到。

论文超过1 100篇。所研究的问题涉及物理、材料、信息、生物和医学等多个领域。

2 太赫兹波发射器和探测器

2.1 太赫兹波发射器

太赫兹波发射源可以分为四大类:(1)激光器,包括自由电子激光器和气体激光器。它们输出的太赫兹波平均功率最高。(2)电子发射器,包括耿氏(Gunn)振荡器、布洛赫(Bloch)振荡器和冷等离子体等。这类发射器结构紧凑,造价较低,但目前尚未实用化。(3)光电导偶极天线,目前使用较多的是条形和蝶形结构。通过施加偏置电压,用中等功率的激光脉冲激发,能够产生脉冲功率很高的太赫兹波。(4)飞秒激光脉冲激发的半导体晶体,特别是其中的电光晶体。用飞秒激光激发半导体晶体产生太赫兹电磁波脉冲有两种方式:一种是用光子能量大于半导体禁带宽度的脉冲激光照射半导体,使半导体中产生电子、空穴对,在电场中产生载流子的瞬态输运,这种真实的瞬态电流的变化,便会发射太赫兹电磁辐射;另一种方案是用飞秒激光脉冲照射属于电光晶体的半导体晶体,通过脉冲光整流效应产生太赫兹电磁辐射。此类太赫兹波脉冲具有很宽的频谱。

2.2 太赫兹波探测器

太赫兹波探测器目前也可以分为四大类:(1)辐射量热计(Bolometer)和热电探测器。它使用方便,但只能做非相干检测,不能获得相干波的相位信息。(2)电子探测器,其特点是成本较低,结构紧凑。(3)光电导偶极天线及其阵列,特点是其暗电流和噪声较低。(4)用飞秒激光取样的电光晶体。用飞秒激光触发的电光晶体探测器的特点是具有极宽的频谱响应和非常高的测量信噪比。此外,测量孔径大,因而也适合于二维直接成像测量。电光检测方法又可分为时分检测和波分检测。时分检测是用飞秒激光脉冲对太赫兹波时间波形进行取样测量。而波分检测是利用具有足够频谱展宽的啁啾激光脉冲,在电光晶体中将太赫兹脉冲的时域波形一次复制到啁啾激光脉冲的各频率分量上,再通过对啁啾脉冲的光谱测量得到太赫兹波形。电光晶体也可以与条纹像机相结合,直接测量太赫兹电磁脉冲。在碲化锌晶体中很容易实现太赫兹波与探测光($\lambda = 800\text{nm}$)的相位匹配,使探测光的群速度与太赫兹波的相速度相等,是目前使用最多的一种电光晶体。

3 对太赫兹波本身的研究

3.1 电磁场对太赫兹波产生过程的影响

用飞秒激光脉冲激发半导体产生真实瞬态电流而发射太赫兹电磁波时,光电导偶极发射天线的偏置电压越大,发射的太赫兹波也越强;当利用晶体自身的表面场来驱动载流子产生太赫兹波时,在某些晶体取向情况下,用飞秒激光脉冲激发半导体不产生向前辐射的太赫兹波,这时可以通过施加磁场,在洛伦兹力的作用下产生太赫兹波。改变磁场的方向,还可以控制太赫兹波的极性。

3.2 太赫兹波的传输

(1)自由空间的太赫兹波的传输可以采用常规的光学技术。为了控制太赫兹波的传输,可以利用抛物面镜和超半球硅透镜等光学元件准直或聚焦太赫兹波。最近,用硅衬底研制出的费涅尔透镜或费涅尔波带片这种二元光学元件取得了更好的聚焦效果。

(2)太赫兹波在波导中的传输可应用于近场太赫兹波器件、太赫兹波互联、太赫兹波准光学腔和实现太赫兹波谱的超灵敏测量。已经开展的研究有太赫兹脉冲在圆形和矩形金属波导中的传输、单模太赫兹波在蓝宝石光纤中的传输、单模太赫兹波在聚乙烯介质带平板波导中的传输、太赫兹脉冲通过细小孔径、通过薄的和厚的金属狭缝的传输,以及太赫兹光子晶体波导的研制等。

(3)太赫兹波在气体、液体和固体中的传播涉及到介质的吸收特性、相移特性和散射特性等。这是目前太赫兹波与物质相互作用研究的一个重要领域。在近乎透明的材料中,相移特性可以直接分析时间波形的变化来获得。散射特性研究目前主要是进行以米氏(Mie)散射为主的研究。

4 太赫兹波的应用研究

相干的太赫兹脉冲具有很宽的频谱带宽,通过对样品太赫兹波的测量和研究,可以获得材料中的许多信息,因此太赫兹波具有广阔的应用前景。跨学科的合作研究已经形成一个技术领域,常常称之为太赫兹技术^[2]。

4.1 利用频谱的应用研究

每种分子都有特定的振动能级和转动能级,对太赫兹波产生特定的吸收。研究生物组织和化学物质的特征谱,能够用来鉴别化学成分。现在已经研究过的有甲基氯化物和甲基氟化物的太赫兹吸收谱

或透射谱、甲烷与空气混合燃烧时火焰的吸收谱、火焰中的热水蒸汽的吸收谱。虽然目前研究工作进行得不够多,但是已经显示出巨大的应用潜力,将来可以进行疾病诊断、环境监测、产品质量监控等许多方面的应用。

4.2 利用时域谱的应用研究

对相干太赫兹波与物质相互作用,通过振幅和相位变化的测量,可以表征固体、液体和气体材料的电子、晶格振动和化学成分等性质。可以研究材料的吸收系数、折射率、介电常数、频移等性质。许多对可见光不透明而对 X 光完全透明的物质,可以用太赫兹波进行测量。例如太赫兹波透过纸张后,振幅和相位均会发生变化,据此可以计量书本的页数和钞票的张数。把太赫兹波的发射和接收在同一器件上实现、制成收发机可以用来测量距离、传递信息,成为一种通讯工具。利用太赫兹波可以透过很多电介质这一特性,可以应用于安全检查和无损检测。

4.3 太赫兹波(T射线)的成像

1995年利用太赫兹波成像的第一篇文章发表以后,太赫兹波成像技术受到普遍重视,最初利用振幅的变化研究了塑料封装的集成电路的内部引线等结构和树叶中含水量的分布图像。现在已经有多种新的成像技术出现和正在进行深入研究^[4-6]。这些成像技术包括:

- (1)使用光电导偶极子的 T 射线常规成像技术;
- (2)使用 CCD 摄像机的电光 T 射线成像技术;
- (3)使用单周期脉冲 T 射线通过时间反演进行物体重构的成像技术^[7];
- (4)利用基尔霍夫(Kirchhoff)移动的 T 射线反射成像技术^[8];
- (5)动态孔径和暗场 T 射线成像技术;
- (6)T 射线计算机层析成像技术,简称 T 射线 CT;
- (7)T 射线衍射层析成像技术,简称 T 射线 DT;
- (8)T 射线显微镜成像技术,利用近场技术等手段,分辨率可以达到微米;
- (9)50 m—200 m 的 T 射线成像技术。

以上各种成像技术在扫描方式、信噪比、动态范围、分辨率、成像所用时间、制造成本、紧凑程度、应用范围和领域各有千秋。其中,T 射线 CT 成像技术与 X 射线 CT 相比,不仅可以获得被测物吸收率的三维分布,而且可以获得折射率或介电常数的三维分布。有些物体对 X 射线完全透明,成像对比度很

差,如对 T 射线有一定的透过率,则 T 射线成像就可以作为一种有效的补充手段。由于 T 射线光子能量较 X 射线光子能量低很多,不会引起光电离和破坏,对生物进行活体检查更安全。因此,T 射线 CT 在医学检查、安全检查、环境监测、食品生产质量监控等许多方面存在巨大的应用潜力。

4.4 太赫兹波在生物技术和信息技术领域的应用

太赫兹波在这两个领域的应用能够带动高水平的学科交叉研究,无论在科学问题的解决,还是发展新型应用技术,具有广阔的前景^[9]。在生物技术方面,不同生物分子的太赫兹光谱表征、脱氧核糖核酸(DNA)和蛋白质的无标记检测、分子反应的测量等方面,已经取得了一些鼓舞人心的进展,吸引了越来越多的注意。在信息技术方面太赫兹波收发机的原理试验已经开展,人造卫星上搭载的太赫兹探测器已成功地绘制了地球上海洋的温度分布图,作为宽带无线通讯的一种手段也正在研究之中。

5 方兴未艾的太赫兹波科学与技术

太赫兹波技术虽然有了很大发展,但是无论从基础研究还是从应用基础研究的角度看,都还有许多工作要做。例如高强度太赫兹脉冲产生的非线性现象、发展生物芯片的无标记读出技术、细胞分辨水平的近场太赫兹波成像、太赫兹波高频光电子集成器件等研究还是处于刚刚启动的阶段。和经过百年以上研究的传统光学领域相比,太赫兹波这一研究课题是非常年青的。随着研究的不断深入,其应用与交叉研究的学科领域的不断扩大,可以预计太赫兹波的研究将迎来一个蓬勃发展的阶段。

参 考 文 献

- [1] Mican S P, Zhang X C. T-ray sensing and imaging. submitted to the International Journal of High Speed Electronics and System, 2002.
- [2] Nichols E J, Tear J D. Joining the infrared and electric wave spectra. *Astrophys. J.*, 61: 17—37, 1925.
- [3] Siegel P H. Terahertz Technology. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2002, 50(3):910—928.
- [4] Jiang Z P, Zhang X C. Free-Space Electro-Optic Technologies. *THz Sensing and Imaging Technology*, Springer-Verlag, 2001.
- [5] Chen Q, Zhang X C. Electro-Optic THz Imaging. *Ultrafast Laser: Technology and Applications*, Ed. by Fermann, Galvanauskas, Sucha, Marcel Dekker, Inc. 2001.
- [6] Zhang X C. Terahertz Electric Field Imaging. *The Encyclopedia of Imaging Science & Technology*, Imaging Technology & Systems Section, Vol. 2, pages 1993—1404, Editor J. Hornak, John Wiley & Sons, New York, 2002.

- [7] Ruffin A R, Decher J, Sanchez-Palencia L et al. Time reversal and object reconstruction with single-cycle pulses. *Optics Letters*, 2001, **26** (10): 681—683.
- [8] Dorney T, Johnson J, Van Rudd J et al. Terahertz reflection imaging using kirchhoff migration. *Optics Letters*, 2001, **26**(19): 1 513—1 515.
- [9] Menikh A, MacColl R, Mannlla C A et al. Terahertz boisensing technology: frontier and progress. submitted to *European Journal Chemical Physics and Physical Chemistry*, 2002.

TERAHERTZ SCIENCE AND TECHNOLOGY

Jia Gang^{*†} Wang Li[‡] Zhang Xicheng^{*}

(* *Physics Department, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York, 12180 - 4203, USA;*

† College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 120023; ‡ Institute of Physics CAS, Beijing 100080)

Abstract Terahertz (THz) wave or T-ray, electromagnetic radiation in a frequency interval from 0.1 to 10 THz, is the next frontier in imaging science and technology. THz radiation, or THz wave, occupies a large portion of the electromagnetic spectrum between the infrared and microwave bands (in different units: 1 THz or 1 ps or 300 μm or 33 cm^{-1} or 4.1 meV or 47.6°K.). However, compared to the relatively well-developed medical imaging at microwave and optical frequencies, basic research, new initiatives and advanced technology developments in the THz band are very limited. THz band is a scientifically rich but technologically limited frequency band, due to the less developed THz wave emitters and receivers, compared with its neighboring bands (microwave and optical bands). During the past decade, THz waves have been used to characterize the electronic, vibrational and compositional properties of solid, liquid and gas phase materials. It is a common belief that the future 'killer-application' of THz waves will be in biomedicine. This article overviews terahertz wave generation, propagation, detection, and application, with emphasis on state-of-the-art science and technology.

Key words Terahertz wave, Emitter, Detector, Imaging

·资料·信息·

海峡两岸祁连山合作研究项目成功开展

2001年国家自然科学基金委员会将海峡两岸祁连山合作列为重大合作资助项目。2002年3月18—26日,在台湾省台南市成功大学举办了“中国祁连山及中央造山带的构造演化研讨会”。

祖国大陆代表团由中国地质科学院地质研究所许志琴院士任团长,26位团员分别来自中国地质科学院地质研究所、国土资源信息院、中国地质大学(武汉)等单位。台湾代表分别来自成功大学、自然科学博物馆、中央大学、台湾大学、中山大学、花莲师范学院等单位。

代表们宣读的论文涉及到祁连山、阿尔金山、秦岭、大别-苏鲁、青藏高原和台湾地质。海峡两岸研究人员的报告展示了大量新成果,包括祁连南缘超高压变质带的发现、阿尔金断裂的平移距离及形成时代、祁连变质基底的组成及活化、北祁连东部的多岛弧体系、西秦岭构造以及大别苏鲁地区超高压变

质带的最新研究进展。与会者均认为这是一次高水平的研讨会。许志琴院士还应邀给台湾同行就中国大陆科学钻探项目的进展作了一场十分精彩的演讲,引起台湾地学界普遍反响和极大兴趣,并表示了合作愿望。与会专家的一个共同愿望就是将祁连山研讨会继续办下去,并将祁连山造山带的研究推向世界,成为地学领域的经典研究,像阿尔卑斯造山带一样写进世界教科书。

会后,祖国大陆代表团考察了台湾中部的地质灾害遗迹,参加了“九·二一”地震教育纪念馆,以及南投县泥石流灾害遗迹等。

两岸科学家在地质方面的研究各具特色。通过这一两岸地学合作研究项目的实施,必然从减灾、防灾等角度造福于两岸人民。

(国际合作局 白鸽 王逸 供稿)