

Research Progress on Terahertz Excited Medium

Ge Wang, Yiliang Zhang, Wenjun Cai, Yan Zhu*

Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan
Email: zhuyankmust@foxmail.com

Received: Mar. 10th, 2018; accepted: May 7th, 2018; published: May 14th, 2018

Abstract

The terahertz (THz) spectrum of materials has attracted attention because of its rich physical and chemical information and its unique properties. Terahertz radiation source, especially the high-power and high-efficiency THz excitation medium (excitation source), is important in terahertz technology. This article reviews the research progress on terahertz generation using gases, solids and liquids as the excitation medium.

Keywords

Terahertz, Excitation Medium, Excitation Source

太赫兹激发介质研究进展

王 葛, 张怡良, 蔡文军, 朱 艳*

昆明理工大学, 云南 昆明
Email: zhuyankmust@foxmail.com

收稿日期: 2018年3月10日; 录用日期: 2018年5月7日; 发布日期: 2018年5月14日

摘 要

物质的太赫兹(THz)光谱由于其丰富的物理和化学信息以及独特的性质而引起了人们的关注。其中太赫兹辐射源是太赫兹技术转化为实际生产力的重要因素, 而大功率、高效率的THz激发介质(激发源)则是THz时域光谱技术、THz诊断和成像技术以及THz雷达和通信投入实际应用的前提。本文综述了以气体、固体和液体作为激发介质产生太赫兹的研究进展, 并对这几种激发介质做了对比分析, 最后对未来太赫兹激发的发展方向做出了展望。

*通讯作者。

关键词

太赫兹, 激发介质, 激发源

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

太赫兹波是一种电磁波, 其频率范围为 0.1~10 THz, 波长位于毫米波与远红外之间(30 μm ~3 mm)。20 世纪末, 射电天文学领域的学者首次研究了太赫兹的观测问题。但由于当时科学技术发展落后, 未能找到一种稳定可靠的 THz 波源和检测技术, 以至于在 1985 年以前, 很少有科研工作者了解这个频段范围内的性质特征, 研究界也因此把这个频段称之为“太赫兹空隙”(THz Gap) [1]-[7]。直到 2000 年, 由于飞秒激光、光电导开关、光整流和光电采样等技术的快速发展, 具备高功率、高稳定性、高可靠性特点的 THz 源得以产生[8]-[12]。目前学术界已经把研制出更高功率、更高效率且能在室温下稳定运转的 THz 源[13]以及实现在现实生活和研究工作中的广泛运用作为了太赫兹当前最为核心的研究方向。本文综述了以气体、固体和液体作为激发介质产生太赫兹的研究进展。

2. 以气体作为太赫兹激发介质

2.1. 以空气作为产生太赫兹的激发介质

从 1991 年开始, 将超短激光脉冲聚焦在空气中, 并将空气用作激发介质来产生太赫兹辐射的研究已引起人们的广泛关注[14] [15] [16] [17]。研究者通过把高能量的超短激光脉冲聚焦在周围的空气中, 使焦点所在位置处的空气发生电离现象形成等离子体。由此产生的有质动力会使离子电荷与电子电荷之间产生一个比较大的密度差, 形成电荷分离。该电荷分离过程会形成强有力的电磁瞬变现象, 进而产生出太赫兹波[18]。通过电流波动辐射的太赫兹和从 GaAs 介质射出的太赫兹具有相同的强度, 但前者的频谱峰值高于后者。

实验装置如图 1 所示。研究人员采用在强偏压场下光电离空气产生太赫兹辐射的方法, 并将太赫兹脉冲的幅度和宽度与来自半导体发射器产生的太赫兹信号进行了对比。

2.2. 以氮气作为产生太赫兹的激发介质

同样氮气作为一种很好的激发介质也被相关科研工作者进行了探索研究。因为气体中产生的太赫兹波形对激发脉冲的光学相位很敏感, 所以对泵浦脉冲的纯相位脉冲调制可作为研究气体介质中太赫兹波产生机制的一种有用工具。2009 年研究人员[19]通过飞秒脉冲整形技术调制出激励脉冲的方法, 对从氮气中产生的太赫兹波进行了研究。同时, 该研究团队采用遗传算法来优化太赫兹波产生的光激励脉冲, 并且给出了以太赫兹功率和二次谐波强度作为适应度函数的优化过程比较。实验表明可以通过在傅立叶空间中使用一系列周期性矩形光学相位来产生出具有可变分离脉冲的太赫兹脉冲串。研究人员利用经过光学调制后的激光脉冲激发氮气从而产生太赫兹波, 主要使用了光调制器得到不同相位。具体实验装置如图 2 所示, 其中脉冲整形器放置在钛蓝宝石振荡器和再生激光放大器之间。缩写: GM, 金镜子; CL, 圆柱形镜片; G, 光栅; SLM, 空间光调制器; M, 镜子; BS, THz 分束器; F, Si 过滤器; BBO,

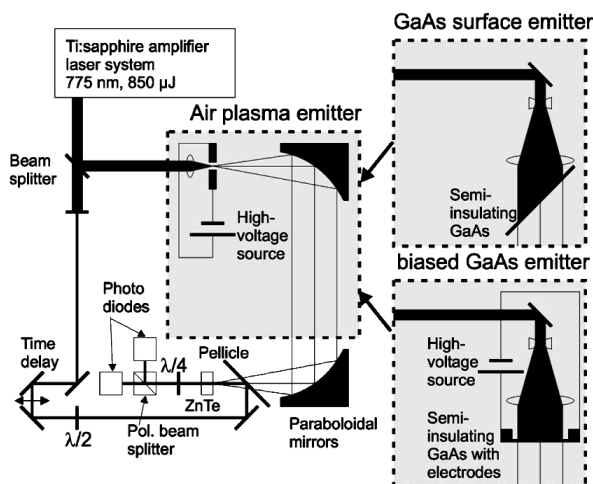


Figure 1. Experimental setup for generating terahertz in air [18]
图 1. 空气产生太赫兹的实验装置图[18]

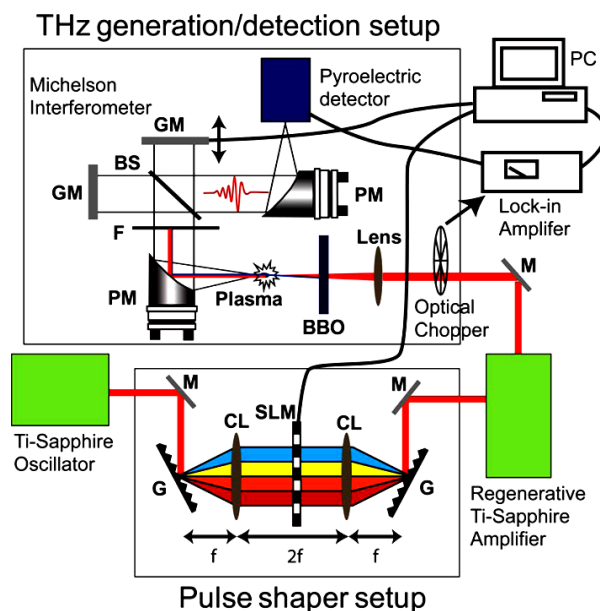


Figure 2. Experimental setup for the generation of terahertz waves from nitrogen [19]
图 2. 氮气产生太赫兹波的实验装置图[19]

硼酸钡硼酸盐晶体；PC，个人电脑；PM，抛物面镜。SLM 由 PC 控制[19]。

3. 以固体作为太赫兹激发介质

3.1. 以无机非金属作为激发介质产生太赫兹

2004 年，研究者利用超短激光脉冲聚焦到晶体上并通过光学整流或者光电导偶极天线的方法来产生出太赫兹辐射[20][21][22]。获得高效性、稳定性、小型化以及能在室温下工作的相干太赫兹辐射源一直是研究界不断努力探索的一个目标。通过非线性光学差频来产生太赫兹辐射的实验中，非线性的差频晶体是一类非常重要的器件，选择非线性系数和光损阈值高的晶体，能够极大提高差频效率和 THz 波的输

出功率。目前 GaSe 和 ZnGeP₂(ZGP)是被广泛用于产生中远红外波段可调谐输出太赫兹的非线性晶体[23]。

3.2. 以金属作为激发介质产生太赫兹

众所周知,金属表面电子态密度呈现出不连续性。2004年,相关研究人员检测到了来自金属表面光学整流的太赫兹(THz)辐射[24]。研究小组观察到在金和银表面进行的强脉冲光激发而引发的非线性光学响应能够产生太赫兹瞬变现象。这一发现为研究金属表面的非线性现象打开了一条新的途径,也可用于开发新的太赫兹产生介质。图3显示了实验设置,通过对该实验的研究与探索也实现了从金属表面的非线性特性和电子结构中获得大量新信息的可能性。

4. 以液体作为太赫兹激发介质

4.1. 以水膜作为激发介质产生太赫兹

由于液态水是太赫兹范围内的强吸收体,因此长期以来一直未有人考虑过用水来激发太赫兹。但最近,张希成的团队成功实现了以水作为激发介质来产生太赫兹[25],该团队测量了在水中产生的太赫兹波,并对比了由空气等离子体产生的太赫兹波,发现其强度比从空气中产生的太赫兹强1.8倍。

张希成的研究小组通过激光激发超薄水膜的办法,成功地产生了太赫兹。在这情况下,水膜的厚度约为200微米。其实验装置如下图4所示。

4.2. 以水蒸气作为激发介质产生太赫兹

水蒸气可以看做是0维的水,目前研究人员也实现了用飞秒激光脉冲激发水蒸气产生强烈的太赫兹

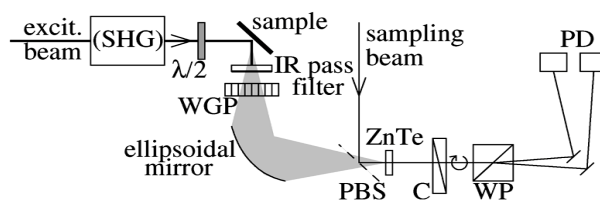


Figure 3. Terahertz wave experimental setup for metal [24]

图3. 金属产生太赫兹波的实验装置图[24]

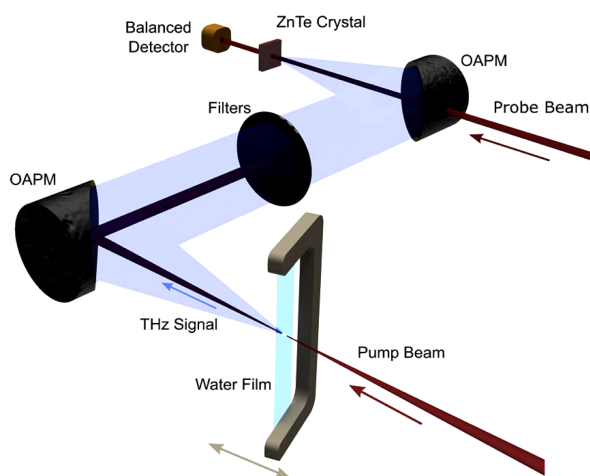


Figure 4. The schematic diagram of experimental device of Terahertz wave excited by water film [25]

图4. 水膜产生太赫兹波的实验装置示意图[25]

宽带辐射[26]。将强烈的激光脉冲聚焦在气室中所含的水蒸气上, 会观察到光激发水蒸气产生的非常强烈的 THz 场, 水蒸气的 THz 激发效率比干燥氮气高 50% 以上, 水蒸气也因此成为了光激发下的特殊太赫兹波源。

研究小组在压力范围从毫托到 800 托的水蒸汽中研究太赫兹波的产生。图 5 简略的展示出了实验装置结构图。由硼酸钡(BBO)晶体产生的二次谐波脉冲(2ω)与强烈的基波脉冲(ω)被聚焦于气体上。图 5 中的插图显示了使用电池或脉冲喷嘴的等离子体产生区域的细节, 其整个系统应放置在可以抽空或用于干燥氮气吹扫的腔室内[27]。

5. 总结与展望

在运用空气等离子激发太赫兹波中, 它们所产生的太赫兹波具有超宽带、脉宽窄、峰值功率高等特点, 可应用于太赫兹时域光谱成像、精密时间分辨光谱等研究。其信噪比要远高于传统远红外傅立叶光谱, 但是这里的太赫兹脉冲频谱较宽、时间相干性差、转换效率较低且不能连续可调, 得到的太赫兹光束的平均功率只有纳瓦到微瓦量级, 不利于对其探测。在强偏压场下, 通过光电离空气产生太赫兹辐射的方法中, 所包涵的太赫兹脉冲在幅度和宽度方面可与来自半导体介质的太赫兹信号相媲美, 但更难聚焦。气体中产生的太赫兹波形对激发脉冲的光学相位很敏感, 而且只有通过对其相位的脉冲整形后才可进一步成为研究气体介质中太赫兹波产生机制的有用工具。

对于固态物质而言, 主要采用光电导、光整流这两种方式来产生太赫兹波辐射。两种方式都有着各自的优缺点。从辐射出的太赫兹脉冲能量强度这个角度来讲光导天线要比光整流效应辐射出的太赫兹脉冲能量强, 原因是在光整流方式中入射的激光能量决定了所辐射出的太赫兹波的能量。对于光导天线

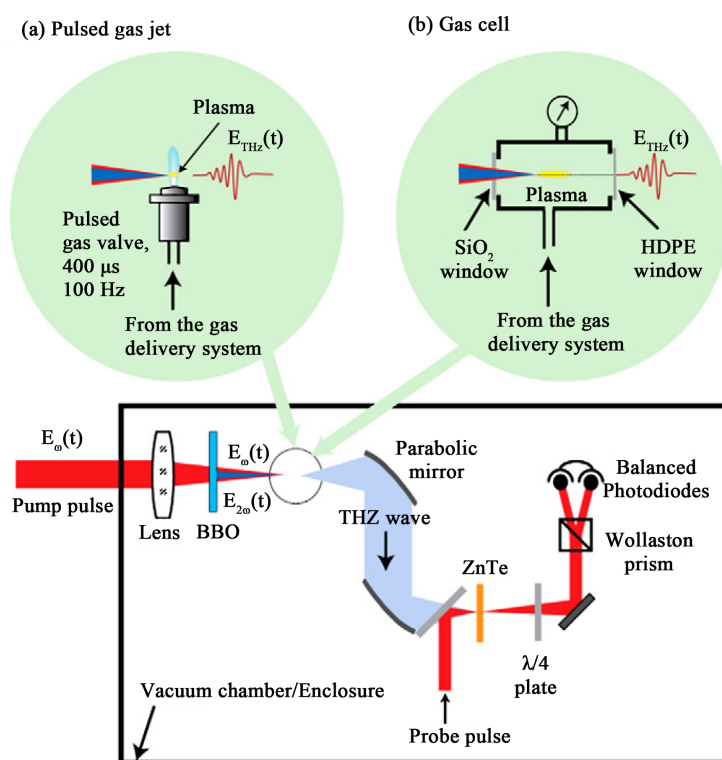


Figure 5. Schematic diagram of experimental setup: (a) Steam glass battery (b) Pulse nozzle [27]

图 5. 实验装置的示意图: (a) 蒸汽玻璃电池; (b) 脉冲喷嘴[27]

这种产生太赫兹辐射的方法而言, 辐射强度是由从天线中所加的偏置电场来决定的, 通过对外加电场强度的调节来实现对产生的太赫兹脉冲强度的控制。在产生的电磁波的频率方面, 光导天线形成的太赫兹波的频率很低, 而光整流形成的太赫兹波的频率很高。在太赫兹脉冲频谱宽度方面光整流产生的太赫兹波也优于光导天线产生的太赫兹脉冲。

对水和水蒸气产生太赫兹辐射的情况, 液态水中的太赫兹辐射对各种光脉冲持续时间都具有明显的响应, 并且对入射激光脉冲呈现出能量的线性依赖性。另外, 由于水中产生太赫兹波的研究目前还处于初级阶段, 很多现象还要相关研究人员进一步的研究才能加以解释。鉴于张希成等人的团队在此方面取得的突破性进展, 预计未来将会有越来越多的研究团队投入这个新领域的研究。

无论以气体、固体还是液体作为激发介质, 目前学术界都把研制出更高功率、更高效率且能在室温下稳定运转的太赫兹源[27]作为目标。随着太赫兹激发介质的研究发展, 太赫兹将在现实生活以及工业生产中获得越来越广泛的运用。

参考文献

- [1] 叶全意, 杨春. 光子学太赫兹源研究进展[J]. 中国光学, 2012, 5(1): 1-11.
- [2] 谢旭, 张希成. 太赫兹科学与技术[J]. 科学, 2005, 57(3): 10-13.
- [3] 刘盛纲, 钟任斌. 太赫兹科学技术及其应用的新发展[J]. 电子科技大学学报, 2009, 38(5): 481-486.
- [4] 许景周. 太赫兹科学技术和应用[M]. 北京大学出版社, 2007.
- [5] Ye, Q.Y. and Yang, C. (2012) Recent Progress in THz Sources Based on Photonics Methods. *Chinese Optics*, 5, 1-11. <https://doi.org/10.3788/co.20120501.0001b>
- [6] Siegel, P.H. (2002) Terahertz Technology. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, 50, 910-928. <https://doi.org/10.1109/22.989974>
- [7] Ferguson, B. and Zhang, X.C. (2002) Materials for Terahertz Science and Technology. *Physics*, 1, 26-33. <https://doi.org/10.1038/nmat708>
- [8] 张志刚, 徐敏. 飞秒激光脉冲技术的发展和应[J]. 激光杂志, 1999, 20(5): 7-11.
- [9] 刘天夫. 飞秒光谱技术的现状与展望[J]. 物理, 1992, 21(2): 115-120.
- [10] 梁振宪, 施卫. 高压超快 GaAs 光电导开关的研制[J]. 电子学报, 1998, 26(11): 104-106.
- [11] 马成举, 陈延伟, 向军, 等. 太赫兹辐射产生技术进展[J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(4): 56-61.
- [12] 王璐, 刘庆纲, 李锁印, 等. 超高速电光采样技术及应用[J]. 微纳电子技术, 2006, 43(4): 197-202.
- [13] 史伟, 郭宝山, 姚建铨. 一种高效率产生太赫兹波的波导型非线性晶体及制作方法. CN104377534A [P]. 2015.
- [14] 李海容, 王顺金. 超短激光脉冲在空气中形成的等离子体细丝的 transition-Cherenkov 太赫兹辐射[C]//中国电推进技术学术研讨会会议. 2009.
- [15] 张存林. 太赫兹感测与成像[M]. 国防工业出版社, 2008.
- [16] 张铠云. 超短双色激光脉冲与气体作用产生强太赫兹辐射的理论与实验研究[D]. 上海交通大学, 2012.
- [17] 赵国忠, 石小溪, 李森, 等. 基于超短激光脉冲的太赫兹辐射特性研究[J]. 量子电子学报, 2007(1): 124-124.
- [18] Löffler, T., Jacob, F. and Roskos, H.G. (2000) Generation of Terahertz Pulses by Photoionization of Electrically Biased Air. *Applied Physics Letters*, 77, 453-455. <https://doi.org/10.1063/1.127007>
- [19] Das, J. and Yamaguchi, M. (2009) Terahertz Wave Generation in Nitrogen Gas using Shaped Optical Pulses. *Journal of the Optical Society of America B*, 26, A90-A94. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.26.000A90>
- [20] 刘锐, 顾春明, 贺莉蓉, 等. ZnTe 晶体中光学整流产生的 THz 辐射及其电光探测研究[J]. 物理学报, 2004, 53(4): 1217-1222.
- [21] 肖健, 高爱华. 光电导天线产生太赫兹波的研究[J]. 应用光学, 2010, 31(3): 395-399.
- [22] 李铁元, 娄采云, 王黎, 等. 低温生长砷化镓光电导天线产生太赫兹波[J]. 中国激光, 2009, 36(4): 978-982.
- [23] 刘欢, 徐德刚, 姚建铨. 基于 GaSe 和 ZnGeP₂ 晶体差频产生可调谐太赫兹辐射的理论研究[J]. 物理学报, 2008, 57(9): 5662-5669.

-
- [24] Kadlec, F., Kuzel, P. and Coutaz, J.L. (2004) Optical Rectification at Metal Surfaces. *The Joint, International Conference on Infrared and Millimeter Waves and, International Conference on Terahertz Electronics*, Karlsruhe, 27 September-1 October 2004, Vol. 2, 455-456.
- [25] Jin, Q., Yiwen, E., Williams, K., *et al.* (2017) Observation of Broadband Terahertz Wave Generation from Liquid Water. *Applied Physics Letters*, **111**, Article ID: 071103.
- [26] Johnson, K., Price-Gallagher, M., Mamer, O., *et al.* (2008) Water Vapor: An Extraordinary Terahertz Wave Source under Optical Excitation. *Physics Letters A*, **372**, 6037-6040. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2008.07.071>
- [27] 柴路, 牛跃, 栗岩锋, 等. 差频可调谐太赫兹技术的新进展[J]. 物理学报, 2016, 65(7): 1-15.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2168-6122, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: japc@hanspub.org