

太赫兹波远程探测的最新研究进展

吴四清^{1,2}, 刘劲松¹, 汪盛烈¹, 胡兵¹

(1. 华中科技大学武汉光电国家实验室/光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074;

2. 湖北科技学院电子与信息工程学院, 湖北 咸宁 437100)

摘要:太赫兹波具有许多独特的性质, 在很多科学技术领域有着广泛的应用前景。然而, 由于水汽对太赫兹波存在强烈的吸收, 使得太赫兹波在空气中的传输距离十分有限, 限制了太赫兹波的应用, 如何实现太赫兹波的远程探测成为太赫兹领域的研究重点。本文介绍了最近出现的 THz-REEF 和 TEA 两种远程太赫兹波探测方法, 分析了探测过程和探测系统的结构, 解释了内在的物理机制, 并对其应用进行了展望。

关键词:太赫兹波; 激光脉冲; THz-REEF; TEA

中图分类号:TN241 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2013.12.01

Recent research progress of terahertz waves remote detection

WU Si-qing^{1,2}, LIU Jin-song¹, WANG Sheng-lie¹, HU Bing¹

(1. Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. School of Electronic and Information Engineering, Hubei University of Science & Technology, Xianning 437100, China)

Abstract: Terahertz (THz) wave has many unique properties and broad prospects in many fields of science and technology. However, due to the strong water vapor absorption of THz wave in air, the transmitting distances of THz wave are very limited, which restricts the THz applications. How to implement THz remote detection becomes the focus of the study in the THz field. This paper focuses on the recent remote THz wave detecting method of THz-REEF and TEA, analyzes the detecting process and the structure of the detecting system, explains the intrinsic physical mechanism, and look into the future of THz applications.

Key words: THz wave; laser pulse; THz-REEF; TEA

1 引言

太赫兹波是指振荡频率在 10^{12} 量级, 位于电磁波谱中微波和红外之间特定波段的电磁波。该波段电磁波具有很多独特的性质^[1-3], 在许多科学技术领域具有广泛的应用前景。如: 太赫兹波对许多非极性物质和介电材料具有良好的穿透性, 可对不透明物体进行成像^[4-7], 是超声波和 X 射线成像技术的有效补充; 太赫兹光子能量为 4.1 meV, 低于各种化学键能, 是 X 射线光子能量的 $10^7 \sim 10^8$ 分之一, 太赫兹辐射不会导致光致电离而破坏被检物质, 非常适用于针对人体或其他生物样品的活体无损检

测; 太赫兹波段包含了丰富的化学和物理信息, 大多生物大分子和极性分子的转动和振动能级跃迁都处在这一波段, 根据这些指纹谱^[8], 太赫兹光谱成像技术能够分辨物体的形貌, 鉴别物体的组成成分, 方便分析物体的物理化学性质, 为缉毒、反恐、排爆等提供相关的理论依据和技术支撑。目前太赫兹波的

基金项目:国家自然科学基金 (No. 61177095); 湖北省重点基金 (No. 2012FFA074); 教育部博士点基金 (No. 20100142110042); 中央高校基本科研业务费 (HUST; No. 2012QN094 和 2012QN097) 资助。

作者简介:吴四清 (1973 -), 男, 在读博士研究生, 主要从事太赫兹辐射的产生与探测方面的研究。E-mail: wusiqingcnu@163.com

收稿日期:2013-04-24

探测方法主要有光导天线探测^[9]、电光晶体探测^[10]和空气探测^[11]。光导天线探测法利用太赫兹电场驱动探测激光脉冲在半导体内产生瞬时载流子形成光电流,根据光电导天线中所产生的光电流与驱动它的太赫兹电场成比例现象,间接探测太赫兹电场。该方法适用于低频太赫兹波的探测,有很好的信噪比和灵敏度,但探测带宽窄。电光晶体探测法是将探测光与太赫兹辐射同时作用在一块电光晶体上,通过测量载有太赫兹信息的探测光束偏振态的改变,得到太赫兹电磁辐射脉冲的电场信息。该方法适用于高频太赫兹的探测,具有响应时间短、探测带宽大、信噪比和灵敏度高等优点。空气检测法是最近出现的一种方法,该方法通过探测由太赫兹波产生的二倍频光的强度随泵浦和探测激光脉冲之间的时间延迟关系,得到太赫兹脉冲光强随时间的变化。该方法所探测的光信号频率不同于探测脉冲本身的频率,因而可以避免背景光的干扰,能探测到很弱的信号,探测频谱宽度可以超过 8 THz,实现动态范围可达 30 dB。

然而,由于大气中水气对太赫兹波具有很强的吸收(大于 100 dB/km)特性^[12],太赫兹波在空气中传播的距离非常有限,上述常规的探测技术无法实现太赫兹波的远程检测,导致其在国土安全、环境监测以及天文学等众多领域中的应用受到阻碍。最近,美国伦斯特理工学院太赫兹研究中心,提出了太赫兹增强荧光 (THz-REEF, Terahertz-Radiation-Enhanced Emission of Fluorescence)^[13-15]和太赫兹增强声波 (TEA, Terahertz-Enhanced-Acoustics)^[15-17]两种太赫兹远程探测方法。以下篇幅将对这两种方法做详细的介绍。

2 THz-REEF 和 TEA 太赫兹波远程探测方法介绍

最近,美国伦斯特理工学院太赫兹研究中心的张希成小组在实验时发现,强飞秒激光脉冲在空气中聚焦后会将大气分子电离,形成空气等离子体,并辐射荧光和声波。与此同时,若将一束太赫兹波照射到该等离子体,能够增强荧光 (THz-REEF) 和声波的强度 (TEA),并将太赫兹波的信息加载到荧光和声波上。由于荧光和声波在大气环境下传播损耗较小,因此可以通过在远距离探测荧光和声波来获得太赫兹波的信息,这样就能够间接的实现太赫兹波远程探测。

图 1 是张希成小组设计的 THz-REEF 远程太赫

兹波探测实验示意图^[12]。由波长 800 nm 的飞秒激光脉冲 E_0 经 BBO 晶体倍频后产生波长 400 nm 的倍频激光脉冲 $E_{2\omega}$,基频和倍频组成的双色激光在空气中被聚焦。在焦点处,激光脉冲的光强在 $10^{13} \sim 10^{14}$ W/cm² 量级,激光引起的多光子电离 (mult iphoton ionization)^[18-19]过程将气体分子电离,在空气中形成等离子体。空气等离子体中含有氮气离子和氧离子组成的正电荷,也含有自由电子组成的负电荷。在等离子体中,被激发的气体分子和气体离子会以紫外荧光的形式辐射能量。采用单色仪和光电倍增管组成的荧光探测系统,可以在较远距离处探测到等离子体发射的荧光谱。

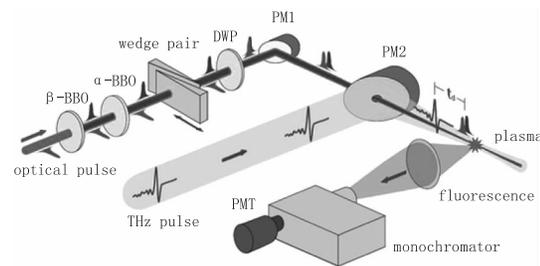


图 1 THz-REEF 太赫兹波远程探测实验设计图

Fig. 1 THz-REEF experimental schematic for THz waves remote detection

对于 THz-REEF 现象潜在的物理机制,可以做如下解释。当太赫兹电场和等离子体相互作用时,太赫兹电场会使电子的运动加速,从而使其获得更高的动能。在这些高能量的电子的一系列非弹性碰撞作用下,氮气分子 N_2 会从高位里德伯态 (high-lying Rydberg states) 演变成氮气离子 N_2^+ ^[20]。当大量的氮气离子形成后, N_2^+ 先和 N_2 结合生成 N_4^+ ($N_2^+ + N_2 \Rightarrow N_4^+$), 然后通过 $N_4^+ + e \Rightarrow N_2(C^3\Pi_u) + N_2$ 形成激发态的氮气分子 $N_2(C^3\Pi_u)$ 。然后,在接下来的几纳秒之内,处于激发态的氮气分子会由激发态回到基态,同时向外发射出紫外荧光。由此可见,太赫兹电场能够通过加速电子导致电离,从而引起荧光增强。

TEA 太赫兹远程探测过程如图 2 所示^[16]。由时间相差 t_R 的基频光 (800 nm) 和倍频光 (400 nm) 组成的双色飞秒激光脉冲在空气中被聚焦后,将空气电离形成等离子体,同时向周围辐射声波,等离子体辐射的声波可使用高灵敏度麦克风探测到。经间隔时间 t_D , 将一束太赫兹波以与激光束同轴的方向照射到等离子体上,同时探测此时等离子体辐射的

声波。对比附加太赫兹波前后的声波,得到声波增强的信息,可以获得太赫兹波的变化规律。对于 TEA 现象的物理机制,根据现有的理论可解释为:飞秒激光激发大气等离子体,形成自由电子群,入射的太赫兹波“加热”了电子群,提高了电子碰撞粒子(包括离子和没有电离的分子、原子)的能量,“加热”了的电子群可以有更多的能量传递给周围的粒子,提高了等离子体的声压,进而提高了声波的强度。

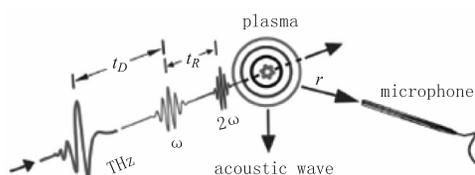


图2 TEA 太赫兹波远程探测示意图

Fig. 2 TEA schematic for THz waves remote detection

3 结 语

一直以来,由于水蒸气对太赫兹波的强吸收,太赫兹波在大气中传播时的衰减高于 100 dB/km,远距离宽带太赫兹波的探测被认为不可能,最近出现的两种方法使远程太赫兹波探测成为可能。本文在介绍了三种常规的太赫兹波探测方法的基本原理、物理过程及其所具有的特点的基础上,详细阐述了 THz-REEF 和 TEA 两种太赫兹波远程探测技术,就两种技术的远程太赫兹波探测过程和探测系统的结构进行了分析,并对其内在的物理机制做了解释。远程太赫兹波探测为研究强光和物质相互作用中的等离子体的检测提供了一种有效方法^[21],也为太赫兹技术在安全检测、环境控制等领域的应用提供了更广阔的应用空间。

参考文献:

- [1] Xu Jingzhou, Zhang Xicheng. Terahertz science technology and applications [M]. Beijing: Peking University Press, 2007:4-6. (in Chinese)
许景周,张希成. 太赫兹科学技术和应用[M]. 北京:北京大学出版社,2007:4-6.
- [2] Zhang Cunlin, et al. Terahertz sensing and imaging[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008:3-5. (in Chinese)
张存林,等. 太赫兹感测与成像[M]. 北京:国防工业出版社,2008:3-5.
- [3] Wang Shaohong, Xu Jingzhou, Wang Li, et al. Applications and prospects of THz technology [J]. Physics, 2001, 30 (10):612-615. (in Chinese)
王少宏,许景周,汪力,等. THz 技术的应用及展望 [J]. 物理,2001,30(10):612-615.
- [4] Li Qi, Yao Rui, Ding Shenghui, et al. Experiment on 2.52 THz transmission mode imaging for concealed objects [J]. Chinese J. Lasers, 2011, 38 (7):0711001-1-4. (in Chinese)
李琦,姚睿,丁胜晖,等. 遮挡物的 2.52THz 透射成像实验研究 [J]. 中国激光,2011,38(7):0711001-1-4.
- [5] Ding Shenghui, Li Qi, Yao Rui, et al. Preliminary study on THz confocal imaging [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30 (s1):100402. (in Chinese)
丁胜晖,李琦,姚睿,等. 太赫兹共焦成像的初步研究 [J]. 光学学报,2010,30(s1):100402.
- [6] Zhang Cunlin, Mu Kaijun. Terahertz spectroscopy and imaging [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47: 023001-1-14. (in Chinese)
张存林,牧凯军. 太赫兹波谱与成像 [J]. 激光与光电子学进展,2010,47:023001-1-14.
- [7] Yao Rui, Ding Shenghui, Li Qi, et al. Improvement of 2.52 THz array transmission imaging system and resolution analysis [J]. Chinese J. Lasers, 2011, 38 (1): 0111001-1-6. (in Chinese)
姚睿,丁胜晖,李琦,等. 2.52 THz 面阵透射成像系统改进及分辨率分析 [J]. 中国激光,2011,38(1): 0111001-1-6.
- [8] Liu Wenquan, Lu Yuanfu, Feng Guangzhi, et al. Research progress of rapid scan terahertz time domain spectroscopy system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48, 123001-1-7. (in Chinese)
刘文权,鲁远甫,冯广智,等. 快速扫描太赫兹时域光谱系统的研究进展 [J]. 激光与光电子学进展,2011, 48,123001-1-7.
- [9] M V Exter, Ch Fattinger, D Grischkowsky. High-brightness terahertz beams characterized with an ultrafast detector [J]. Appl. Phys. Lett., 1989, 55 (4):337-339.
- [10] Q Wu, X C Zhang. Free-space electro-optic sampling of terahertz beams [J]. Appl. Phys. Lett., 1995, 67 (24): 3523-3525.
- [11] J Dai, X Xie, X C Zhang. Detection of broadband terahertz waves with a laser-induced plasma in gases [J]. Phys. Rev. Lett., 2006, 97 (10):103903-1-4.
- [12] Liu Jingle, Zhang Xicheng. Remote terahertz wave sensing using laser-induced fluorescence [J]. Physics, 2010, 39 (6):419-422. (in Chinese)

- 刘晶乐,张希成. 利用激光诱导荧光来探测远程宽带太赫兹波[J]. 物理,2010,39(6):419-422.
- [13] J Liu, X C Zhang. Terahertz-radiation-enhanced emission of fluorescence from gas plasma[J]. Phys. Rev. Lett., 2009,103(23):235002-1-4.
- [14] J Liu, et al. Broadband terahertz wave remote sensing using coherent manipulation of fluorescence from asymmetrically ionized gases [J]. Nature Photon., 2010, 4: 627-631.
- [15] J Dai, B Clough, I C Ho, et al. Recent progress in terahertz wave air photonics [J]. IEEE Trans. THz Sci. Tech., 2011,1(1):274-281.
- [16] B Clough, et al. Laser-induced photoacoustics influenced by single cycle terahertz radiation[J]. Opt. Lett., 2010, 35(21):3544-3546.
- [17] B Clough, J L Liu, X C Zhang. Encoding terahertz signatures into laser-induced plasma acoustic waves[J]. Proc. of SPIE, 2011, 7938, 793804-1-7.
- [18] D W Schumacher, P H Bucksbaum. Phase dependence of intense-field ionization [J]. Phys. Rev. A., 1996, 54(5):4271-4278.
- [19] N B Delone, V P Krainov. Atoms in strong light fields [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1985.
- [20] A Azarm, H L Xu, Y Kamali, et al. Direct observation of super-excited states in methane created by a femtosecond intense laser field [J]. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys., 2008, 41: 225601.
- [21] J Liu, X C Zhang. Plasma characterization using terahertz-wave-enhanced fluorescence [J]. Appl. Phys. Lett., 2010, 96(4):041505-1-3.