

文章编号: 1672-8785(2020)11-0001-10

太赫兹空气相干探测技术 研究进展

杜海伟^{1,2} 朱思源² 吕 金² 刘君威² 陈凤仪²

(1. 南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室, 江西南昌 330063;

2. 南昌航空大学测试与光电工程学院, 江西南昌 330063)

摘 要: 太赫兹空气相干探测技术是一种宽带太赫兹探测技术。由于探测带宽仅受到探测激光脉冲宽度的影响, 该技术的响应范围能够达到几十太赫兹, 因此在实验上研发成功之后便成为了太赫兹技术领域一项重要的探测技术。详细介绍了太赫兹空气相干探测技术的实验原理和实验光路, 总结了该技术最近几年的研究进展及改进措施, 并对其探测性能和使用特点进行了分析与讨论。该研究可对初步使用太赫兹空气相干探测技术起到很好的参考作用。

关键词: 太赫兹; 空气相干探测技术; 宽带

中图分类号: O433.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2020.11.001

Research Progress of Terahertz Air Coherent Detection Technique

DU Hai-wei^{1,2}, ZHU Si-yuan², LV Jin², LIU Jun-wei², CHEN Feng-yi²

(1. Key Laboratory of Nondestructive Testing (Ministry of Education), Nanchang

Hangkong University, Nanchang 330063, China;

2. School of Measuring and Optical Engineering, Nanchang Hangkong

University, Nanchang 330063, China)

Abstract: The terahertz air coherent detection technology is a broadband terahertz detection technology. Since the detection bandwidth is only affected by the pulse width of the probe laser, the response range of this technology can reach tens of terahertz, so after successful experimental research, it has become an important detection technology in the field of terahertz technology. The experimental principle and experimental optical path of the terahertz air coherent detection technology are introduced in detail, the research progress and improvement measures of the technology in recent years are summarized, and its detection performance and use characteristics are analyzed and discussed. This research can provide a good reference for the preliminary use of terahertz air coherent detection technology.

Key words: terahertz; air coherent detection technique; broadband

收稿日期: 2020-09-01

基金项目: 江西省自然科学基金面上项目(20192BAB202008); 南昌航空大学博士科研启动项目

作者简介: 杜海伟(1980-), 男, 河南安阳人, 副教授, 博士, 主要从事太赫兹技术及其应用、超快光学与超快现象、激光等离子体相互作用等方面的研究。E-mail: haiweidu@nchu.edu.cn

0 引言

太赫兹波是一种频率位于 0.1~10 THz 之间的电磁波,其波长范围为 0.03~3 mm,在电磁波谱中位于红外光和微波之间,属于远红外波段。有时也用毫米波与亚毫米波泛指该波段。由于具有光子能量低、穿透性好、带宽容量大等特点,太赫兹波在材料科学、生物学、安检、通讯等领域具有巨大的应用前景^[1-2]。特别是该波段包含了大量生物分子振动和转动频率且光子能量较低(对生物分子无电离损伤),使得太赫兹波在生物医学成像、无损检测中具有明显的优势^[3-4]。经过三十余年的发展,太赫兹基础及应用研究逐步发展成为一个影响显著的研究领域,即太赫兹科学与技术。

太赫兹辐射的产生和探测是太赫兹技术研究及应用的基础。太赫兹波源可根据其辐射特点分为连续型和脉冲型两种:连续型具有连续辐射、功率低、带宽窄等特点;脉冲型具有辐射时间短、峰值功率高、带宽较宽等特点^[5]。不同的特点导致两者的应用领域略有不同。其中,脉冲型太赫兹辐射由于带宽能够覆盖几十太赫兹,在光谱技术与光谱分析、波谱成像等领域具有不可替代的作用。

太赫兹探测技术主要分为非相干探测和相干探测两类^[6-8]。前者用于测量太赫兹辐射的功率或能量,主要有热释电探测器、测辐射热计、高莱探测器、肖特基器件等;后者能够测得太赫兹辐射的振幅、脉冲波形和相位,目前主要采用光学转换的方式对太赫兹辐射进行相干探测。常用的太赫兹相干探测方法包括电光取样、光电导天线以及空气相干探测技术。这三种方法的探测原理、探测光路、探测性能与特点有所不同。其中,空气相干探测技术测得的宽带可达数十太赫兹,覆盖了整个太赫兹波段,因此该方法在宽带太赫兹技术领域具有重要的地位。

本文主要介绍太赫兹空气相干探测技术的实验原理和实验光路,然后对该技术近几年的

研究进展和改进措施进行总结(包括定标方法、响应带宽、实验光路的改善等),并对其探测性能和使用领域进行讨论。期望本文对全面了解和初步使用太赫兹空气相干探测技术有所帮助,进而推动该技术在宽带太赫兹科学与技术中的应用。

1 基本原理

当太赫兹脉冲较强时,其电场与激光电场能够在介质中通过非线性作用产生激光二次谐波,比如在液体中由四波混频作用产生激光二次谐波^[9]。戴建明教授和张希成教授等人在研究初期,通过利用太赫兹电场和超短激光脉冲电场在空气中的作用产生激光二次谐波来对太赫兹脉冲信息进行了探测,并最先在实验上取得了成功^[10-11]。该方法通过用探测激光离化空气分子来产生等离子体并产生激光二次谐波,而且基于太赫兹波与激光脉冲在空气中的四波混频作用产生二次谐波。因此,其中的作用介质是空气分子。正是由于这个激光二次谐波包含了太赫兹电场信息,该方法能够通过测量二次谐波获取太赫兹脉冲的一些信息。后来他们继续深入开展了此项研究,在太赫兹脉冲与激光脉冲作用的空气介质两侧加入了调制的偏置电场,使得该方法成为一种太赫兹相干探测技术(被命名为太赫兹空气相干探测技术)^[12]。基于这项改进,使用空气探测太赫兹波脉冲的方法变得实用、简洁。由于该方法使用的探测介质为空气分子,其对太赫兹波的吸收和色散效应可以忽略不计。因此,这种方法能够探测到很宽的太赫兹脉冲^[12]。

下面详细介绍太赫兹空气相干探测技术的物理原理。太赫兹脉冲和飞秒激光脉冲在与介质共同作用时,通过比较它们的脉冲宽度,可将前者认为是一种准静态电场。因此,以空气分子作为一种非线性作用介质,激光脉冲与太赫兹电场在介质中的四波混频作用所产生的激光二次谐波可以表述为

$$E_{2\omega} \approx \chi^{(3)} E_{\text{THz}} E_{\omega} E_{\omega} \quad (1)$$

式中, $\chi^{(3)}$ 为介质的三阶非线性系数; E_{THz} 和

E_ω 分别为太赫兹波和激光的电场。如果在激光与空气的相互作用处加入偏置电场, 那么偏置电场与激光的四波混频作用也可产生二次谐波:

$$E_{2\omega} \approx \chi^{(3)} E_{\text{bias}} E_\omega E_\omega \quad (2)$$

因此, 偏置电场和太赫兹电场同时与激光作用时在空气介质中产生的激光二次谐波可以表述为

$$E_{2\omega} \approx \chi^{(3)} (E_{\text{bias}} + E_{\text{THz}}) E_\omega E_\omega \quad (3)$$

产生的激光二次谐波的光强为

$$I_{2\omega} \propto (\chi^{(3)} I_\omega)^2 (E_{\text{THz}}^2 + E_{\text{bias}}^2 + 2E_{\text{THz}} E_{\text{bias}}) \quad (4)$$

调制偏置电场 E_{bias} 的重复频率, 并采用锁相放大器(或锁相环技术)对上述由光电探测器测得的光信号进行提取。以偏置电场的重复频率作为锁相放大器的参考频率, 使得该探测转化为外差探测, 即式(4)中仅包含与锁相放大器相同频率的信号($2(\chi^{(3)} I_\omega)^2 E_{\text{THz}} E_{\text{bias}}$)被读取。因此, 由锁相放大器的信号可得到激光二次谐波光强与太赫兹波电场的线性关系:

$$I_{2\omega} \propto 2(\chi^{(3)} I_\omega)^2 E_{\text{THz}} E_{\text{bias}} \quad (5)$$

式(5)表明, 若保持探测激光的光强和偏置电场不变, 则激光二次谐波的光强与太赫兹波电场成正比。当激光二次谐波脉冲的脉宽和光斑大小不变时, 由其脉冲能量的相对值即可获得太赫兹电场的相对值。改变激光脉冲与太赫兹脉冲之间的时间延迟, 在时域上对太赫兹脉冲电场进行取样, 即可测得太赫兹脉冲的时域波形信号。通过傅里叶变换可获得其频谱分布及相位。该波形包含了太赫兹辐射的振幅和相位信息, 因此这是一种相干探测技术。

空气相干探测技术需要用一对金属电极在空气中产生偏置静电场, 因此也称为空气偏置相干探测(Air-Biased Coherent Detection, ABCD)^[12]。该技术与光电导天线、电光取样是目前三种最常用的太赫兹宽带相干探测技术。其中, 光电导天线的半导体材料的载流子寿命和电光取样技术中电光晶体的声子对太赫兹波的吸收都会影响到这两种探测技术的探测带宽。相比而言, 空气相干探测技术将空气分子作为

作用介质, 对太赫兹波的吸收和色散作用几乎可以忽略。因此, 该技术的探测带宽仅受到探测激光脉冲宽度的影响, 而与探测介质无关。

上述过程以四波混频模型为基础, 没有考虑激光与等离子体的作用。在这个探测过程中, 激光脉冲对气体原子进行弱电离并产生等离子体。电离过程同样会产生激光二次谐波^[10], 其重复频率与探测激光一致。利用锁相放大器对光电探测器的光电信号进行提取时, 注意到只有由四波混频效应产生的激光二次谐波的重复频率与偏置电场一致, 使得锁相放大器能够成功地把这个激光二次谐波提取出来; 而激光与等离子体作用所产生的激光二次谐波的光电信号成为了太赫兹信号的一个背景噪声。因此, 上述模型仅考虑四波混频产生二次谐波而忽略激光与等离子体的作用是合理的。

2 实验光路

图 1 所示为太赫兹空气相干探测技术的典型光路。一般利用分光镜将激光束分为两束: 一束是泵浦光, 用于产生太赫兹辐射; 一束是探测光, 用于对太赫兹脉冲扫描进行时域取样。这里, 太赫兹辐射源采用双色飞秒激光脉冲与等离子体作用所产生的宽带太赫兹脉冲辐射。在此主要对探测部分进行详细介绍。

由辐射源产生的太赫兹脉冲经过两个离轴抛物面镜收集和聚焦后, 与探测激光的聚焦点在空间中进行重合。在此重合点上, 通过设置金属电极来添加偏置静电场。该电场是对激光重复频率进行调制后的脉冲方波, 其频率被用作锁相放大器的参考频率。聚焦点上的空气在探测激光、太赫兹电场和偏置电场的共同作用下产生激光二次谐波。经过聚焦点后的激光束包含激光基频光、二次谐波和若干太赫兹电场。通过光学带通滤波片(透射激光二次谐波且过滤其他波段的激光)后, 只剩下激光二次谐波入射到光电探测器中。由于这个激光二次谐波比较弱, 一般采用光电倍增管对其进行探测。

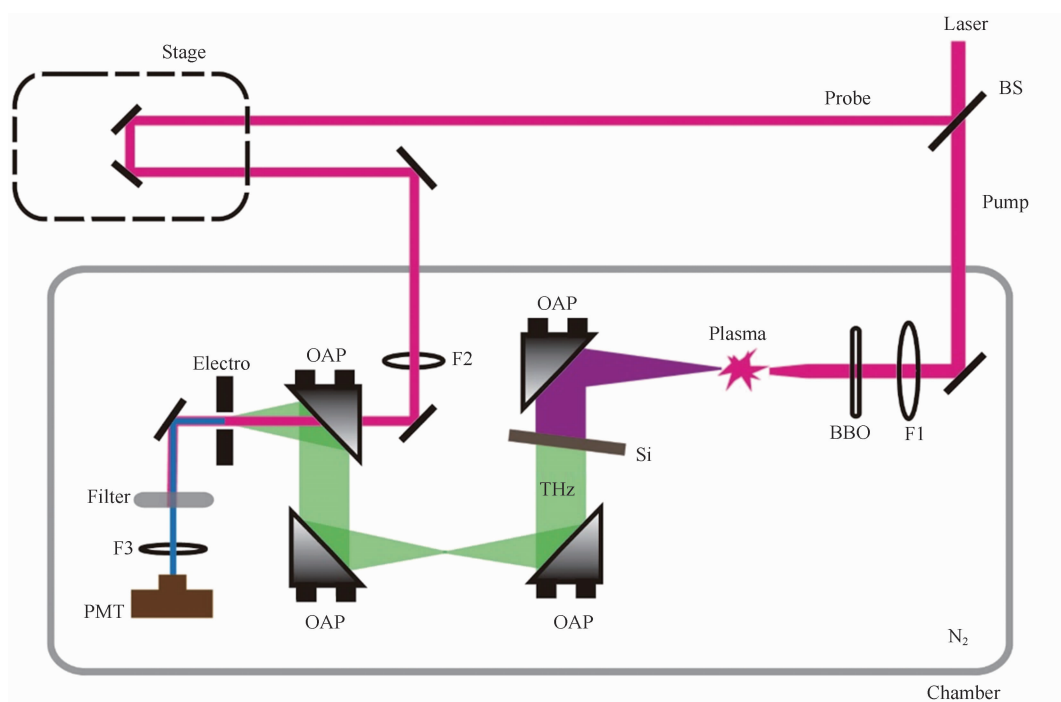


图 1 太赫兹空气相干探测技术的典型实验光路

将光电倍增管的光电信号输入给锁相放大器。锁相放大器以偏置电场的频率作为参考频率，通过差分探测获得由太赫兹电场与探测激光四波混频作用产生的激光二次谐波的光强随激光脉冲与太赫兹脉冲之间时间延迟的分布。利用电动平移台改变探测激光脉冲的光程，进而改变激光脉冲与太赫兹脉冲之间的时间延迟。此时即可获得太赫兹电场的时域波形。一般为了避免空气中的水蒸气对太赫兹波的吸收，需将太赫兹路径密封并充入干燥氮气。在实际测试样品中，一般需把相对湿度降到 1% 以下。

3 研究进展

太赫兹空气相干探测技术在实验上研发成功后，在太赫兹光谱技术方面得到了广泛应用。特别是通过双色飞秒激光脉冲与空气等离子体作用产生太赫兹辐射并利用空气相干探测技术探测太赫兹脉冲，建立了带宽达 10 THz 的太赫兹光谱系统和具有时间分辨特性的太赫兹光谱系统。该系统以空气分子为作用介质，属于太赫兹空气光子学领域^[13]。图 2 所示为一个典型的通过双色飞秒激光脉冲与空气等离子体作用产生太赫兹辐射并利用空气相干探测

技术测得的太赫兹脉冲的时域波形及其频谱分布。可以看出，该脉冲频谱的宽带可达 10 THz 左右。

由于空气相干探测技术在太赫兹探测领域的独特性，有多个研究小组相继对其进行了改进和探索。下面介绍该技术最近几年的研究进展和改进措施。

3.1 定标技术

在太赫兹空气相干探测技术中，一般通过用方波电压信号连接到金属电极来产生具有调制频率的偏置电场。该调制频率即为锁相放大器的参考频率，使得锁相放大器的输出信号由式(5)决定。这充分利用了方波信号的平方为整流信号的特点，消除了式(4)中的第二项以达到对太赫兹电场进行差分探测的效果。若改用正零方波为电压信号产生一个时域上正零分布的偏置静电场(见图 3)，其平方项仍具有调制频率，此时锁相放大器的信号主要包含以下两项：

$$I_{2\omega} \propto (\chi^{(3)} I_{\omega})^2 (E_{\text{bias}}^2 + 2E_{\text{THz}} E_{\text{bias}}) \quad (6)$$

即有太赫兹电场与无太赫兹电场时，锁相放大器均有信号。且令

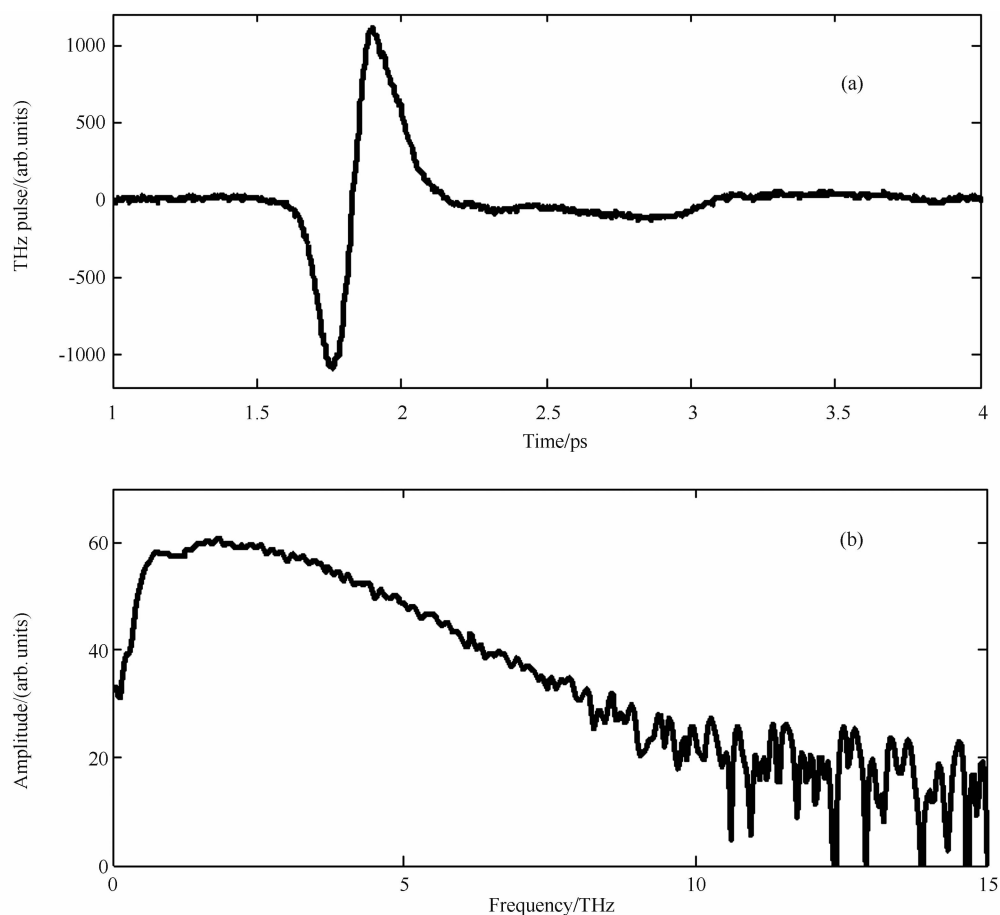


图 2 通过双色飞秒激光脉冲与空气等离子体作用产生太赫兹辐射并利用空气相干探测技术测得的典型宽带太赫兹脉冲: (a)时域脉冲波形; (b)相应频谱^[14]

$$S_1 = (\chi^{(3)} I_\omega)^2 E_{\text{bias}}^2 \quad (7)$$

$$S_2 = 2(\chi^{(3)} I_\omega)^2 E_{\text{THz}} E_{\text{bias}} \quad (8)$$

则两者的比值为

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{E_{\text{bias}}}{2E_{\text{THz}}} \quad (9)$$

因此, 可利用锁相放大器分别测得无太赫兹脉冲时的背景信号 S_1 和有太赫兹脉冲时的信号 S_2 , 然后由两者的比值得到太赫兹电场与偏置电场的比值^[14], 进而根据已知的偏置电场大小获得太赫兹电场的振幅。这样便可通过扫描的方式对太赫兹电场振幅进行定标, 从而获得太赫兹电场的真实值。

受空气相干探测技术探测带宽的影响, 这种方法获得的实验值比通过热释电探测器探测再经换算获得的太赫兹脉冲幅值略小。由于具有更宽的频率响应带宽, 热释电探测器能够测

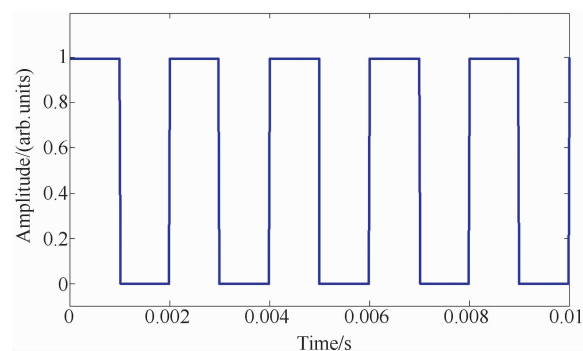


图 3 用于定标太赫兹电场振幅的正零方波电场信号的示意图

到的太赫兹能量范围更大, 因此其脉冲值比上述定标方法略大。若直接将直流电场作为偏置电场, 则可通过比较直流电场和太赫兹电场分别与探测光在空气中产生的激光二次谐波来获得太赫兹电场幅值^[15]。但是这样扫描无法得到太赫兹脉冲波形。

3.2 响应带宽

超短激光脉冲时域宽度的测量主要通过自相关技术来实现,即利用分束得到的两束激光脉冲在倍频晶体中产生和频脉冲信号,然后由该信号的宽度计算待测激光脉冲的宽度;其电场时域分布可通过频率分辨的光开关(Frequency-Resolved Optical Gating, FROG)技术测得,即包含强度和相位^[16]。由于缺乏太赫兹倍频晶体,太赫兹脉冲信号的宽带和相位难以通过上述技术测得^[16]。因此,太赫兹相干探测需要采用与测量超短激光脉冲不同的探测技术。目前常用的太赫兹相干探测技术(光电导天线、电光取样和空气相干探测技术)均能够获得太赫兹电场时域分布,即包含脉冲波形和相位。分析上述三种技术的探测时间的响应时间极限,由不确定关系(即脉冲时间长度与频率宽度之积遵循不确定关系)可知,一般可通过分析其探测的频率响应带宽来获得。而频谱响应带宽的分析同样能够为太赫兹光谱分析技术带来一定的便利。

光电导天线和电光取样技术在探测太赫兹辐射时都存在有限的探测带宽。受半导体材料中载流子寿命的影响,前者的频率响应难以达到太赫兹高频部分^[17];后者则由于电光晶体中的光学声子对太赫兹波的吸收以及晶体对激光脉冲的色散作用而难以测量太赫兹高频部分^[18]。太赫兹空气相干探测技术在开发成功后虽然能够探测到整个太赫兹波段(甚至达到 30 THz^[13]),但其探测带宽与激光脉冲宽度之间的定量关系一直没有确定,也难以得到比较精确的探测响应函数。

最近,我们以非线性光学原理为基础推导了在激光脉冲电场和太赫兹电场作用下气体分子的响应极限,进而得到了空气相干探测技术的响应带宽极限^[19]。在该技术中将空气分子作为作用介质。这些分子在四波混频作用中遵循非线性光学的基本原理(虽然有极少部分分子被电离成等离子体,但大部分分子仍然保留了整体中性分子的特性),因此在产生激光二

次谐波的超快过程中,分子三阶极化率的响应根源可分为两部分:电子在外电场中的极化和原子核在外电场中的极化。前者经过探测后约为飞秒量级^[20],后者则处在皮秒量级^[16]。两者的作用时间尺度非常不同,给处理分子对脉冲电场的时间响应带来了难度。但是以电子的响应为瞬态响应,能够获得四波混频中气体分子介质对电场的响应极限时间以及空气相干探测技术的极限带宽,即一个以高斯函数的平方为因子的卷积函数^[19]。

在实际使用空气相干探测技术时,探测激光脉冲宽度为已知条件。因此,上述卷积函数因子即可为已知条件。通过对不同脉冲长度的探测激光进行计算,可以获得该探测激光所对应的空气相干探测技术的响应带宽极限。为了便于与实验结果进行比较,引入了响应带宽的拟合函数^[19]:

$$f_{\text{FWHM}} = \frac{628}{\tau_{\text{probe}}} \quad (10)$$

式中, f_{FWHM} 为响应函数的半高全宽因子(单位为 THz); τ_{probe} 为探测激光脉冲的半高全宽脉冲宽度(单位为 fs)。图 4 为该函数所对应的曲线。可以看出,响应带宽随着探测激光脉冲宽度的增加而快速减小。对于脉宽为 100 fs 的探测激光脉冲来说,其空气相干探测技术的响应带宽约为 7 THz。在具体实施空气相干探测技术时,可根据该拟合函数得到具体的探测激光脉冲宽度所对应的探测系统的探测带宽极限。此函数能够为宽带太赫兹实验系统的搭建与测试提供很好的理论参考。

3.3 固态介质的使用

在空气相干探测技术中,由于利用探测激光在空气介质中的非线性效应产生激光二次谐波,所以需要较强的探测激光。例如,对于脉宽为 100 fs 的探测激光脉冲,需要 100 μJ 左右的脉冲能量。这个实验条件将空气相干探测技术限制在可提供大脉冲能量的激光系统上,而且较大的探测激光能量也意味着用于产生太赫兹辐射的激光能量有所减小。为此,有人参照

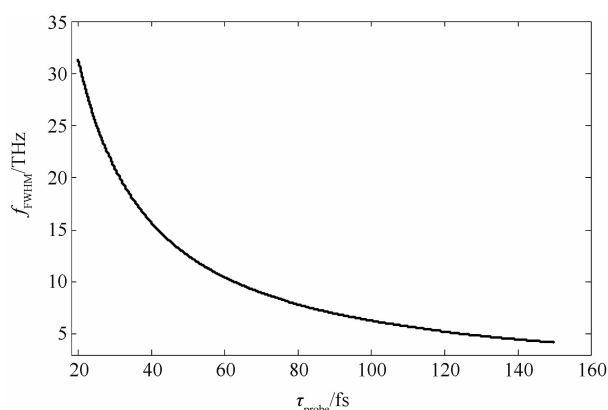


图 4 探测激光脉宽与空气相干探测技术探测带宽的拟合关系^[19]

空气相干探测系统, 根据由太赫兹电场产生激光二次谐波的作用原理设计了一种太赫兹固态偏置电场相干探测 (Solid-State-Biased Coherent Detection, SSBCD) 技术^[21]。

图 5 为 Tomasino A 等人设计的一种基于互补金属氧化物半导体 (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor, CMOS) 加工技术获得的固态微纳器件的结构示意图^[21]。该器件包含三层: 底层为 2 mm 厚的石英玻璃基底; 中间层为采用离子束溅射得到的 100 nm 厚的金电极, 其中间通过湿法刻蚀获得 30 μm 的间隙; 上层采用化学气相沉积法产生 30 μm 厚的石英玻璃, 该玻璃在沉积的同时填满金电极的间隙。使用此器件时, 通过金属电极加入的偏置电场、待测太赫兹电场以及探测激光脉冲在金属电极中间的石英玻璃里相互作用, 因此该技术被称为 SSBCD 技术。他们系统地研究了偏置电场大小和探测激光能量对探测结果的影响, 并将其与传统的空气相干探测技术进行了比较, 发现该技术能够获得与后者相同的探测带宽, 但是需要更小的偏置电场以及小三个数量级的探测激光能量。即在他们的实验系统中, 空气相干探测技术需要 100 μJ 的探测激光脉冲能量 (此数值与其他研究小组报道的能量相同), 而基于这个固态器件的探测技术则需要 100 nJ 的脉冲能量。

与气体相比, 固体具有更大的三阶非线性系数 $\chi^{(3)}$ 。由于采用电场在玻璃中的非线性作

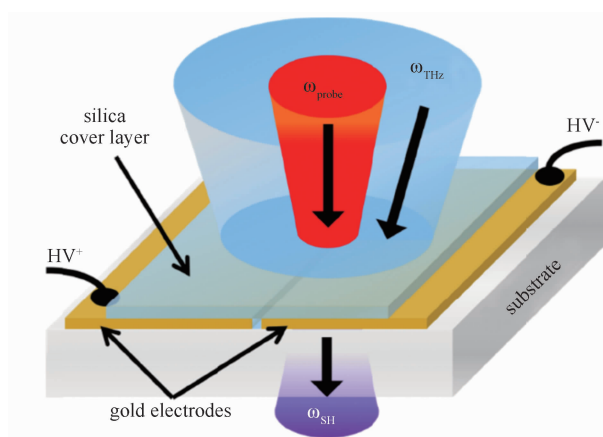


图 5 SSBCD 器件的结构示意图^[21]

用所产生的激光二次谐波, 这个固态器件需要的探测激光能量降低了三个数量级, 且偏置电场较小。因为石英玻璃对太赫兹传播的色散较大, 所以该介质的作用厚度不能太大, 导致这种固体器件只能通过特殊加工方法进行制备。该器件使得太赫兹宽带探测技术能够在能量较小的激光系统上得到广泛使用。

3.4 平衡探测

在初期使用空气相干探测技术时, 探测激光一般用线偏振光, 其偏振方向与偏置电场方向相同。考虑到气体介质三阶非线性系数的各向异性和待测太赫兹波的偏振分布信息, 有人改变了电极的设置方式, 从而将偏振相关的作用效果用在空气相干探测技术中。Lu X F 等人将探测激光的偏振方向与偏置电场方向设置成一定夹角, 使得太赫兹水平和竖直两个偏振方向上的分量分别与激光及偏置电场作用, 产生水平偏振和竖直偏振的激光二次谐波, 而激光在这两个方向上的分量之差与太赫兹电场成正比^[22]。采用沃拉斯顿棱镜对激光二次谐波进行偏振分光, 然后采用两个探测器 (即光电倍增管) 分别对这两个分量进行测量并对其进行作差运算, 从而获得太赫兹时域波形。与原来的光路相比, 这种方法可将探测信噪比提高一倍。注意到该方法采用了两个探测器, 使得实验系统的经济成本略有提升。

若将水平与垂直两个方向上的偏置电场与太赫兹电场同时作用于气体介质, 产生两个偏

振方向上的激光二次谐波, 则可获得包含具有固定相位的两个偏振方向的太赫兹合成场, 由此可同时获得太赫兹波形和偏振分布^[23]。这种方法即为偏振灵敏的空气相干探测技术^[24]。

上述两种方法均利用四波混频效应中介质的三阶非线性系数各向异性的特点对太赫兹空气相干探测技术进行了改进, 使其能够获得太赫兹偏振分布信息。这种改进对于探测未知偏振分布(如椭圆分布)的太赫兹辐射源将会有所帮助。如图 6 所示, 当待测太赫兹辐射的偏振分布未知且偏置电场方向、探测激光偏振方向与太赫兹长轴具有不同的角度时, 采用上述两种方法则可能测得太赫兹辐射的偏振分布(即椭圆的长轴与短轴之比)。

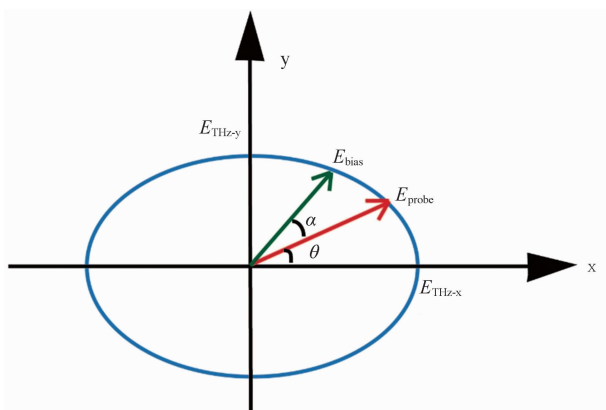


图 6 太赫兹偏振分布及探测激光偏振方向、偏置电场方向的示意图

4 讨论与总结

空气相干探测技术主要是将空气分子作为作用介质, 因此通过改用其他非线性系数较大的气体分子, 可以改善这种技术的灵敏度。Lv X F 等人将稀有气体氙和有机气体六氟化硫(SF_6)作为作用介质, 提高了空气相干探测技术的灵敏度^[24]。这种改进措施虽然改善了探测灵敏度, 但是考虑到使用了气体腔体以及腔体配套的太赫兹窗口, 该方法会增加实验系统的复杂性和经济成本。Wang T W 等人对空气相干探测技术的系统性及线性响应进行了系统研究, 并在实验系统中比较了光电倍增管和雪崩光电二极管(Avalanche Photodiode, APD)的

探测性能, 发现两者的使用效果在空气相干探测技术中并无明显差别。这为后续采用 APD 代替光电倍增管提供了实验依据, 并可降低实验系统的经济成本^[25]。

Li C Y 和 Du H W 等人将由光学倍频晶体产生的激光二次谐波作为本征振荡的合成项, 以代替由偏置电场产生的激光二次谐波。他们将该方法命名为光学偏置电场相干探测(Optically-Biased Coherent Detection, OB CD)技术^[26-27]。但由于光学晶体的倍频系数远远大于气体的三阶非线性系数, 其激光倍频转化效率远高于气体的四波混频效应。所以在实验操作中, 需通过精确控制探测激光能量来将晶体倍频效应和气体四波混频效应的转化效率控制在一定范围内, 使探测器能够同时探测到两者产生的激光二次谐波, 以免前者太强而淹没后者产生的激光二次谐波。因此, 这种技术在实验测量中对操作技巧的要求更高, 但探测灵敏度和探测性能并没有得到提高。由于空气相干探测技术利用了太赫兹电场与激光脉冲共同作用所产生的激光二次谐波, 在此过程中, 激光二次谐波是一个重要的可观测量。我们系统地研究了 this 二次谐波在空气相干探测中的作用, 并提出了利用直流偏置电场获得太赫兹脉冲波形的方法^[28]。

经过几十年的发展, 光电导天线和电光取样技术的探测原理及实验系统已经非常成熟。两者在太赫兹探测中得到了广泛应用, 并被多家商业公司的太赫兹光谱系统采用。虽然空气相干探测技术的灵敏度难以与它们相比, 但是随着其逐步改进和发展成熟, 也正在日益得到推广使用, 特别是在宽带太赫兹光谱系统和时间分辨的太赫兹光谱系统中^[29]。随着实验条件及技术的不断成熟和相关研究的逐步深入, 太赫兹高频段由于波长更短而具有更小的空间分辨率, 因此在近场成像^[30]和生物成像^[31]中可能得到更多应用。而利用空气相干探测技术原理并结合固态器件(如 SSBCD)的方法则为太赫兹高频段的相

干探测提供了一种可能的技术途径。

总之, 太赫兹空气相干探测技术以其宽带探测的特点在太赫兹技术中日益受到关注并得到使用。本文详细介绍了该技术的实验原理和实验光路, 并对其最近的研究进展进行了介绍和讨论, 包括定标方法、探测带宽、固态器件的使用以及偏振相关的技术改进等。其中, 固态器件的使用使得所需的探测激光能量降低了三个数量级, 为未来在基于振荡级飞秒激光装置的实验系统中的应用提供了可能。本文可为了解和初步使用空气相干探测技术提供参考, 有助于推广该技术在太赫兹科技(尤其是超宽带太赫兹技术)中的使用。

参考文献

- [1] Mittleman D. Perspective: Terahertz Science and Technology [J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, **122**(23): 230901.
- [2] Dhillon S, Vitiello M, Linfield E, et al. The 2017 Terahertz Science and Technology Roadmap [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2017, **50**(4): 043001.
- [3] 符张龙, 李锐志, 李弘义, 等. 基于太赫兹量子级联激光器的生物医学成像研究进展 [J]. *中国激光*, 2020, **47**(2): 0207014.
- [4] Wan M, Healy J, Sheridan J. Terahertz Phase Imaging and Biomedical Applications [J]. *Optics and Laser Technology*, 2020, **122**: 105859.
- [5] 张存林. 太赫兹感测与成像 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [6] Sizov F, Rogalski A. THz Detectors [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2010, **34**: 278–347.
- [7] 金飙兵, 单文磊, 郭旭光, 等. 太赫兹检测技术 [J]. *物理*, 2011, **42**(11): 770–780.
- [8] 张真真, 黎华, 曹俊诚. 高速太赫兹探测器 [J]. *物理学报*, 2018, **67**(9): 090702.
- [9] Cook D, Chen J, Morlino E, et al. Terahertz-field-induced Second-harmonic Generation Measurements of Liquid Dynamics [J]. *Chemical Physics Letters*, 1999, **309**(3): 221–228.
- [10] Dai J M, Xie X, Zhang X C. Detection of Broadband Terahertz Waves with a Laser-induced Plasma in Gases [J]. *Physics Review Letters*, 2006, **97**(10): 103903.
- [11] 戴建明, 谢旭, 张希成. 利用空气来探测脉冲太赫兹波 [J]. *物理*, 2007, **36**(3): 191–194.
- [12] Karpowicz N, Dai J M, Lu X, et al. Coherent Heterodyne Time-domain Spectroscopy Covering the Entire “Terahertz Gap” [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **92**(1): 011131.
- [13] Dai J M, Clough B, Ho I C, et al. Recent Progress in Terahertz Wave Air Photonics [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2011, **1**(1): 274–281.
- [14] Du H W, Tang F, Zhang D Y, et al. Calibration of the Field Strength of Broadband Terahertz Radiation in Air Coherent Detection Technique [J]. *Journal of Applied Physics*, 2018, **124**(14): 143101.
- [15] Borodin A, Esaulkov M, Frolov A, et al. Possibility of Direct Estimation of Terahertz Pulse Electric Field [J]. *Optics Letters*, 2014, **39**(14): 4092–4095.
- [16] Reimann K. Table-top Sources of Ultrashort THz Pulses [J]. *Reports on Progress in Physics*, 2007, **70**(10): 1597–1632.
- [17] Jepsen P, Jacobsen R, Keiding S. Generation and Detection of Terahertz Pulses from Biased Semiconductor Antennas [J]. *Journal of Optical Society of America B*, 1996, **13**(11): 2424–2436.
- [18] Gallot G, Zhang J, McGowan R, et al. Measurements of the THz Absorption and Dispersion of ZnTe and Their Relevance to the Electro-optic Detection of THz Radiation [J]. *Applied Physics Letters*, 1999, **74**(23): 3450–3452.
- [19] Du H W. Investigation on Response Function of Terahertz Air Coherent Detection Technique [J]. *Applied Physics B*, 2020, **126**(7): 124.
- [20] Hassan M T, Luu T T, Moulet A, et al. Optical Attosecond Pulses and Tracking the Nonlinear Response of Bound Electrons [J]. *Nature*, 2016, **530**: 66–70.
- [21] Tomasino A, Mazhorova A, Clerici M, et al. Sol-

- id-state-biased Coherent Detection of Ultra-broadband Terahertz Pulses [J]. *Optica*, 2017, **4**(11): 1358–1362.
- [22] Lv X F, Zhang X C. Balanced Terahertz Wave Air-biased-coherent-detection [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, **98**(15): 151111.
- [23] Lv Z H, Zhang D, Meng C, et al. Polarization-sensitive Air-biased-coherent-detection for Terahertz Wave [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, **101**(8): 081119.
- [24] Lv X F, Karpowicz N, Zhang X C. Broadband Terahertz Detection with Selected Gases [J]. *Journal of Optical Society of America B*, 2009, **26**(9): A66–A73.
- [25] Wang T W, Iwaszczuk K, Wrisberg E, et al. Linearity of Air-biased Coherent Detection for Terahertz Time-domain Spectroscopy [J]. *Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves*, 2016, **37**(6): 592–604.
- [26] Li C Y, Seletskiy D, Yang Z, et al. Broadband Field-resolved Terahertz Detection via Laser Induced Air Plasma with Controlled Optical Bias [J]. *Optics Express*, 2015, **23**(9): 11436–11443.
- [27] Du H W, Dong J M, Liu Y, et al. A Coherent Detection Technique via Optically Biased Field for Broadband Terahertz Radiation [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2017, **88**(9): 093104.
- [28] Du H W. Systematical Study on the Role of Laser Second Harmonic Generation in the Terahertz air Coherent Detection [J]. *Optics and Laser Technology*, 2020, **130**: 106312.
- [29] Ulbricht R, Hendry E, Shan J, et al. Carrier Dynamics in Semiconductors Studied with Time-resolved Terahertz Spectroscopy [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2011, **83**(2): 543–586.
- [30] 刘宏翔, 姚建铨, 王与焯, 等. 太赫兹波近场成像综述 [J]. *红外与毫米波学报*, 2016, **35**(3): 300–376.
- [31] 刘尚建, 余菲, 李凯, 等. 太赫兹光谱与成像在生物医学领域中的应用[J]. *物理*, 2013, **42**(11): 788–793.