

迈克尔逊干涉法精确测量太赫兹频谱及目标速度

刘 楚^{1,2}, 钟 凯^{1,2}, 史 杰^{1,2}, 靳 硕³, 葛 萌³, 李吉宁^{1,2}, 徐德刚^{1,2}, 姚建铨^{1,2}

- (1. 天津大学 精密仪器与光电子工程学院 激光与光电子研究所, 天津 300072;
2. 光电信息技术教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072;
3. 北京航天计量测试技术研究所, 北京 100076)

摘要: 搭建了一套迈克尔逊干涉仪, 对 CO₂ 激光的 9P36 和 9R10 谱线泵浦 CH₃OH 气体所产生的频率分别为 2.52 THz 和 3.11 THz 的太赫兹激光器输出频谱进行了精细测量。测量系统频率分辨率约为 1 GHz, 测量结果显示 CO₂ 激光泵浦的太赫兹源为单色源并具有极窄的线宽, 波长与激光器标称值进行对比具有很好的一致性。基于这套系统实现了对干涉仪动臂目标的运动速度准确测量, 提出了两种分别适用于匀速运动和变速运动情况下的速度反演方法, 反演结果与设定值均相符。结论表明, 迈克尔逊干涉仪不但可以精确测量太赫兹波源的频谱, 同时配合单色太赫兹源可以准确测量目标速度, 为太赫兹波段光谱、成像等领域的应用奠定基础。

关键词: 太赫兹; 迈克尔逊干涉仪; 频谱; 速度

中图分类号: O436.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1117006

Accurate measurement of terahertz spectrum and target velocity based on Michelson interferometry

Liu Chu^{1,2}, Zhong Kai^{1,2}, Shi Jie^{1,2}, Jin Shuo³, Ge Meng³, Li Jining^{1,2}, Xu Degang^{1,2},
Yao Jianquan^{1,2}

- (1. Institute of Laser and Optoelectronics, College of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Key Laboratory of Opto-electronics Information Technology (Ministry of Education), Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. Beijing Aerospace Institute for Metrology and Measurement Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: A Michelson interferometer was constructed to measure the spectra generated by a terahertz (THz) gas laser pumped by a CO₂ laser. The hyperfine spectra at 2.52 THz and 3.11 THz generated in CH₃OH gas pumped by the 9P36 and 9R10 laser lines of the CO₂ laser was measured with the frequency resolution of around 1 GHz. The measurement results showed that the THz laser was monochromatic and had very narrow linewidth. The measured wavelength was consistent with the nominal value. Velocity measurement of target on the translation mirror was also performed based on this interferometer. Two methods for acquiring velocity were proposed, demonstrating good accordance with the set values for both fixed and variable velocities. It is concluded that the Michelson interferometer could be used to accurately

收稿日期: 2018-06-10; 修订日期: 2018-07-28

基金项目: 国家自然科学基金(61675146)

作者简介: 刘楚(1991-), 男, 硕士生, 主要从事太赫兹介电参数测量及目标特性方面的研究。Email: liuchu91@163.com

导师简介: 钟凯(1984-), 男, 副教授, 博士生导师, 博士, 主要从事激光及太赫兹技术方面的研究。Email: zhongkai1984@gmail.com

measure the spectrum of a THz source, and the velocity measurement was also possible with the help of a monochromatic THz source, laying the basis for THz applications like spectroscopy, imaging, etc.

Key words: terahertz; Michelson interferometer; spectrum; velocity

0 引言

太赫兹波(Terahertz 或 THz)是指频率在 0.1~10 THz(1 THz=1 012 Hz)的电磁波,该频段介于微波与红外之间,在雷达技术、生物医学成像、公共安全检测、无损探测、宽带通信等领域有重要应用价值^[1-6]。太赫兹技术的广泛应用依赖高效的太赫兹辐射源和探测技术,该领域近 10 余年来已取得了重要进步。另一方面,在太赫兹波频率精确测量方面,由于适用于太赫兹频段材料及器件的缺乏,测量方法及技术与长波的微波波段及短波的红外波段相比发展较为落后。对于目前唯一能够获得高频连续太赫兹波高功率输出的实用太赫兹源——太赫兹气体激光器^[7-10],截止目前尚未有高精度准确频谱测量的报道,极大地限制了该类太赫兹源在太赫兹雷达、波谱分析、危险品检测、高光谱成像等领域的应用。

在太赫兹频率的现有测量方法中,最常用的是太赫兹时域光谱(THz-TDS)系统中的电光采样法^[11-13],但是电光采样只能用于飞秒激光激发的太赫兹源,探测过程同时需要飞秒激光的作用,因此测量过程较为复杂且无法对独立的太赫兹源光谱进行测量。对于独立的连续及脉冲式太赫兹辐射源频谱测量,目前已报到的方法有法布里珀罗(F-P)干涉法、迈克尔逊干涉法、Martin-Puplett(M-P)干涉法等^[14-16]。其中 F-P 干涉法受到材料的太赫兹频段反射率限制,难以有效提高分辨率。M-P 干涉法适用于偏振太赫兹波,需要配合屋脊型反射镜才能实现,器件的复杂程度及可选择性受限。Liu 等报道了利用 M-P 干涉法对太赫兹激光器的频谱进行测量^[15],但频率测量的准确度及光谱分辨率均不理想。迈克尔逊干涉法因其原理简单、结构紧凑且可应用于自由空间而受到更多关注。Zuo 等利用热释电探测器搭建了测量系统并对太赫兹激光器发出的太赫兹频谱进行了精确测量^[16],但该方案需要引入斩波器对入射太赫兹波进行调制,且由于测量系统存在的问题,得到的频谱在主峰周围分布大量次级频谱,与激光

器的理论输出频谱特性不符。

文中基于高阻硅片分光器及常温工作的 DTGS 探测器搭建了一套迈克尔逊干涉仪系统,对 CO₂ 激光泵浦 CH₃OH 气体产生的 2.52 THz 及 3.11 THz 太赫兹激光器频谱进行了精确测量。首次获得测量精度约 1 GHz 的两个频点处的精细频谱及中心频率值,相比参考文献[15]、[16],明显降低了系统复杂性,且测量结果在频率准确性及分辨率方面均取得了明显进步。这些测量结果可以为太赫兹激光器在雷达等领域的应用提供重要参考。此外,在确定中心频率的前提下,利用迈克尔逊干涉法对移动镜(目标)的移动速度进行了测量,提出了两种速度反演的的方法,测量结果与设定值相比均具有很好的一致性,该方法有望用于三维目标的移动速度及表面轮廓测量。

1 系统组成及原理

文中所采用的实验系统如图 1 所示。光源使用爱丁堡仪器公司所生产的 F1RL100 型太赫兹激光器,它采用高功率连续 CO₂ 激光器来泵浦 CH₃OH 气体产生太赫兹波,当 CO₂ 的谱线分别为 9P36 和 9R10 时,对应输出的太赫兹波标称频率分别为 2.52 THz 和 3.11 THz。激光器输出的太赫兹波束经镀金反射镜 M0 反射后,利用一个与波束成 45°角的硅片(厚度 1 mm,反射率约 30%,透过率约 55%)作为分束器(BS),将太赫兹波分作两路,反射的波束由固定的镀金平面反射镜(固定镜 M1)反射,另一路透射波束由移动的镀金平面反射镜(移动镜 M2)反射。移动镜固定在电控位移平台(西格玛 SGSP26-150,分辨率 2 μm,最大行程 150 mm)上,由电脑程序通过控制器设定其移动速度和行程。两路波束再次经过分束器 BS 合束后直接到达 DTGS 探测器。该 DTGS 探测器可以探测直流信号,因此不需要对入射波束进行斩波调制。M2 的位置变化会改变该路波束到达分束器时与另一路波束的光程差,从而使合束后的干涉信号呈现强度的变化,通过记录 M2 的

位置信息与探测器的电压信号即获得干涉图，再通过傅里叶变换可以转换为频谱图，从而实现了太赫兹频谱的测量。

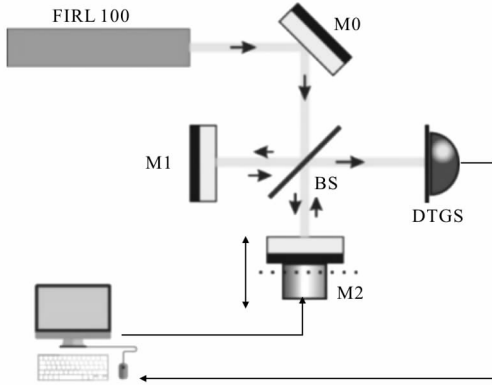


图 1 迈克尔逊干涉仪实验测量系统
Fig.1 Experimental measurement system based on a Michelson interferometer

假定经固定镜 M1 和移动镜 M2 反射后的太赫兹波合束后到达探测器的光强分别为 I_1 和 I_2 ，探测器所响应的信号为：

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(2\pi f \Delta / c) \quad (1)$$

式中： Δ 为两路太赫兹波的光程差； f 为太赫兹波频率，由于光程差为两反射镜到达分束器距离差值的两倍，所以干涉信号随移动镜的运动位移 d 的变化为：

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(4\pi f d / c) \quad (2)$$

对干涉信号进行傅里叶变换

$$F(f) = \int_0^{\infty} I(d) \exp(-2\pi i \frac{f}{c} d) dd \quad (3)$$

可以得到对应干涉信号的频率谱，即希望获得的太赫兹频谱。根据傅里叶变换光谱技术的原理，移动镜的扫描距离越长对应的频率分辨率就越高，因此在实验中尽量采用较长的移动距离。

由于移动镜的运动位移 $d = v n \delta t$ ，其中 v 为移动镜的扫描运动速度， δt 为采样间隔时间， n 为采样数据点数。当以一个已知的恒定速度和采样频率进行实验时，通过傅里叶变换计算即可得出需要的太赫兹频谱分布。反之，对于单色太赫兹源，如果已知其准确的频率 f ，也可以对移动镜(目标)的移动速度进行测量。对速度的提取可以采用两种处理方法：相对速度法及干涉条纹法，具体原理如下。

第一种，相对速度法。当已知采样时间间隔 δt 且得到了太赫兹源的频率 f ，可以先假定移动镜(目标)的移动速度为 v' ，其中实际移动速度 v 与 v' 的关系为：

$$v = p v' \quad (4)$$

式中： p 为常数系数。使用假定的速度进行傅里叶变换处理，得到相应的频率为 $F(p f)$ 的频率，而太赫兹源的频率 f 是客观恒定的，由横坐标的缩放定律及频率的比较可以得出实际速度与假定速度的比值 p ，即可得出实际速度 v 。该方法只能测量匀速运动的目标速度。

第二种，干涉条纹法，由于所采用的太赫兹源是单频窄线宽的，假设空气的折射率为 1，根据电磁波的干涉叠加规律，当移动镜位移 d (到干涉仪分束器的相应光程差为 $2d$) 为波长的整数倍，即满足如下条件时：

$$2d = n \lambda \quad (5)$$

其干涉信号强度变化一个周期，其中太赫兹波长 $\lambda = c / f$ ， c 为光速。换言之，探测器所测得的信号从一个峰值到相邻峰值，移动镜 M2 移动的距离为半个波长。对于已知的采样间隔，移动速度可以由下式确定：

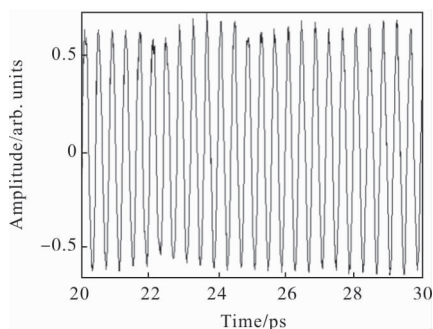
$$v = \frac{\lambda}{2 \Delta t} \quad (6)$$

式中： Δt 为探测器所测得相邻两个干涉峰值信号所对应的测量时间差。该方法可以对变速运动的目标速度进行测量，所利用的是移动镜(目标)与固定镜所反射信号的相位差。此外，由于目标表面的连续起伏变化也可以改变两束太赫兹波的光程差，从而改变干涉信号强度，因此该方法也可以用于对连续起伏改变的表面进行深度信息测量，获得目标表面的三维轮廓图像。

2 太赫兹激光器的频谱测量

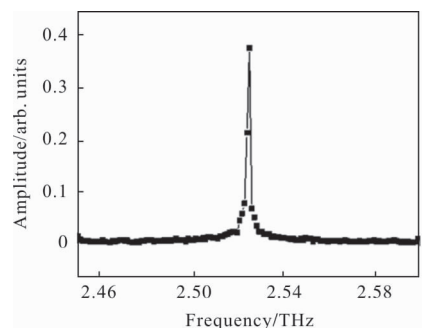
利用上述实验装置和数据处理方法，首先对 FIRL100 太赫兹激光器采用 CO₂ 的 9P36 谱线泵浦 CH₃OH 气体时产生的标称为 2.52 THz 的输出频谱进行了测量。实验中，步进电机运动速度设为 1 mm/s，探测器的采样率设为 5 000 Hz，移动镜的总运动距离设为 140 mm，通过公式(2)和(4)可以得到以 Δ/c 为横坐标，即公式(1)中 I 关于 Δ/c 的时域干涉图样，如

图2(a)所示。因为数据量较大(0~900 ps),因此该图中只截取了其中 20~30 ps 区域的干涉数据。对干涉数据进行傅里叶变换,即可得到对应的频谱数据,即太赫兹激光器的输出频谱分布,如图 2(b)所示。



(a) 时域干涉图(20~30 ps 部分)

(a) Time domain interferogram in the 20~30 ps range



(b) 频谱分布图

(b) Frequency domain spectrum

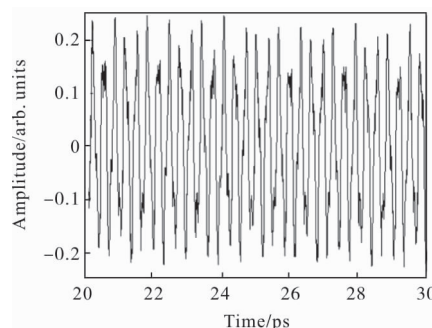
图 2 2.52 THz 测量结果

Fig.2 Experimental results at 2.52 THz

根据计算结果,经傅里叶变换后得到的频谱数据的最高分辨率(两相邻数据点的频率间隔)为 1.07 GHz,这一结果远远优于之前参考文献[15]、[16]所报道的结果。如图 2(b)所示的结果,该频点处激光器的中心频率为 2.525 4 THz,且半高全宽小于 2 GHz。由于频率分辨率与移动镜的最大运动距离相关(当移动距离缩小到为 40 mm 时,频率分辨率为 3.76 GHz),受电动位移平台长度的限制,实验中未能获得更加精细的中心频率数据及准确的谱线宽度(线宽可能远远小于 2 GHz),若是需要更高精度的结果,可以使用更大长度的运动平台。但该测量结果与仪器标称的频点信息一致,测得的频谱分辨率也可以满足绝大多数情况的需求。

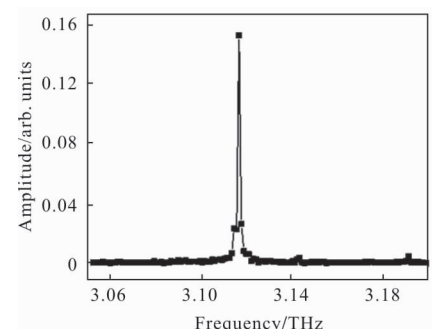
采用同样的方法,利用该迈克尔逊干涉仪对

CO₂ 激光的 9R10 谱线泵浦 CH₃OH 气体产生的标称为 3.11 THz 的输出太赫兹波频谱进行了测量。实验中,平台运动速度、探测器采样频率、运动距离设定均与 2.52 THz 频点测量时相同。测量所得的时域干涉图及频域光谱图如图 3 所示。结果表明,该工作模式下激光器的中心频率为 3.116 0 THz,谱线的半高全宽小于 2 GHz。



(a) 时域干涉图(20~30 ps 部分)

(a) Time domain interferogram in the 20~30 ps range



(b) 频谱分布图

(b) Frequency domain spectrum

图 3 3.11 THz 测量结果

Fig.3 Experimental results at 3.11 THz

通过图 2 及图 3 的比较可以看出,在 3.11 THz 频点处干涉峰更加密集,即干涉峰时间间隔更小(相邻干涉峰间隔为半个波长),这与理论描述是相符的。此外,3.11 THz 频点的干涉信号强度比 2.52 THz 频点时要弱一些,这是由于 3.11 THz 频点处激光器的输出功率较低造成的,但功率的高低对频谱的测量没有影响。实验中,所测量的 2.52 GHz 频点的输出功率约为 45 mW,3.11 THz 输出功率约为 18 mW。通过对 2.52 THz 和 3.11 THz 两个频点的频谱实验测量及与标称值和文献报道值的一致性比较,可以充分证明迈克尔逊干涉法的可靠性与准确性,所获得的两个频点处的精细频谱数据也为该类太赫兹源

的应用提供了重要参考和支撑。

3 目标运动速度测量

在对太赫兹激光器的频率进行精确测量的基础上,采用同一系统对移动镜(目标)的运动速度进行了实验测量。实验中采用 2.52 THz 频点作为测量波束,以利用其更高的输出功率和更好的干涉信噪比。首先,采用相对速度法处理数据,固定采样率为 5 000 Hz,测量匀速运动的速度。获得干涉信号后,假定目标的速度为 v' 对干涉信号进行傅里叶变换,由公式(2)和(4)可知,傅里叶变换所得到的中心频率 f' 、实际中心频率 f 、假定速度 v' 和实际速度 v 的关系如下:

$$\frac{v'}{v} = \frac{f'}{f} \quad (7)$$

在不同的匀速运动条件(设定速度分别为 1、2、5、10 mm/s)下,假定速度 v' 均为 1 mm/s,经傅里叶变换所得数据如图 4 所示。根据公式(7)可以计算出相应的实际运动速度,速度设定值、测量值及相应的相对误差如表 1 所示。由控制器设定位移台单位时间的运动步数,从而实现对运动速度的设置,单步移动的分辨率为 4 μm 。测量值与设定值一致性非常好,每次测量的相对误差均小于 0.2%。速度分辨率由于与太赫兹源的频率密切相关,因此测量时目标运动距离越长,速度分辨率越高,当前设置下速度分辨率约为 4×10^{-4} mm/s。测量结果的误差来源包括探测器噪声、探测器响应速度及太赫兹源中心频率的准确性等。图 4 中除了 4 个主要的频率峰外,较小的峰值是由实验噪声引起的,使用更高灵敏度的探测器可以消除这一现象。

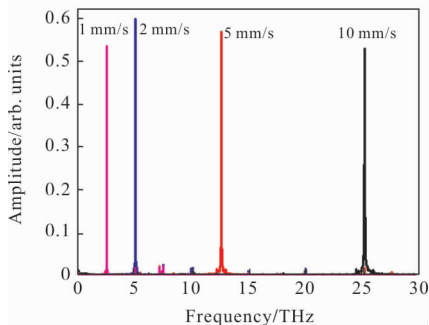


图 4 采用相对速度法测量时不同速度对应的频谱图
Fig.4 Terahertz spectrum at different speeds using the relative-velocity method

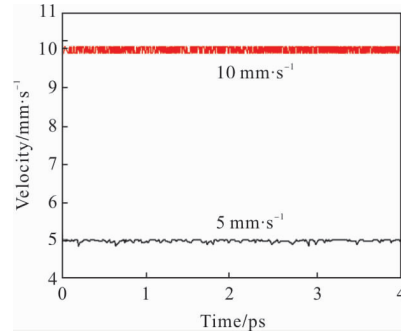
表 1 匀速运动的速度测量结果

Tab.1 Velocity measurement for uniform motion

Set velocity/ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	Central frequency after Fourier transform/THz	Measured velocity/ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	Relative error
10	25.300 7	10.018 5	0.185%
5	12.650 3	5.009 2	0.184%
2	5.060 1	2.003 68	0.184%
1	2.530 0	1.001 82	0.182%

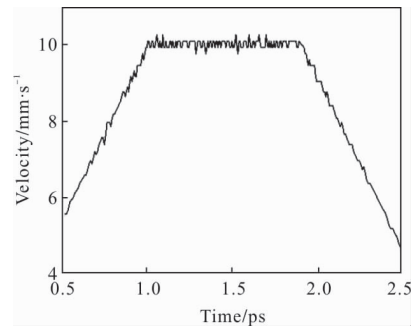
利用相对速度法对目标速度进行测量的缺陷是只能测量匀速运动情况,无法给出连续变化的实时运动速度。为解决这一问题,可以采用干涉条纹法进行数据处理。根据公式(5)、(6),对单频太赫兹源,相邻干涉峰所对应目标移动的距离为半个波长,由采样率可知相邻干涉峰发生的时间间隔,从而得到目标的运动速度。

首先,利用干涉条纹法分别测量了 5 mm/s 和 10 mm/s 两种匀速运动情况下的速度数据,其结果如图 5(a)所示。由测量结果可知,该方法虽然可以获得任意时刻的即时速度,但误差较前一种略大。设定采



(a) 匀速运动

(a) Uniform motion



(b) 变速运动

(b) Variable motion

图 5 干涉条纹法速度测量结果

图 5 Velocity measurement using the interference-fringe method

样率为 5 000 Hz, 运动速度为 10 mm/s 和 5 mm/s 时, 平均测量误差分别为 0.82% 和 0.73%。在变速运动条件下, 通过控制程序使目标速度以一定的加速度先增加到 10 mm/s 而后再减速, 所得到的速度测量结果如图 5(b) 所示。可以看出, 干涉条纹法能够较为准确地测量任意运动模式下的实时速度, 但相对误差与相对速度法相比较, 其原因在于该方法中速度的提取需要获得每个干涉峰的准确位置, 但在实际测量中受采样率及探测器响应的限制, 采样点未必能够与每个峰值准确对应, 峰值位置的选取误差会通过计算过程导致速度测量的误差。误差大小与采样率和物体加速度相关, 设定采样率 5 000 Hz, 加速度大小 9 mm/s^2 , 加、减速过程的平均测量误差分别为 0.91% 与 1.25%。在实际操作中, 可以通过适当的平滑处理有效减小误差, 获得更为准确的目标运动速度。

通过比较两种速度处理方法, 可以发现: 方法一, 速度比较法, 即采用傅里叶变换后对比频率大小获得实际运动速度方法, 拥有更小的误差, 但只能测量一定时间内匀速运动的物体, 无法反映出各个时刻的实时速度。方法二, 干涉条纹法, 可以得到各个时刻的速度, 且可以测量变速运动下的物体, 但该方法误差稍大, 对测量准确性要求高的场合不如前者。在实际应用中, 应针对不同测量需求选取合适的测量数据处理方法。

4 结 论

文中采用一套基于迈克尔逊干涉仪的实验测量系统, 首先对太赫兹激光器中利用 CO_2 激光的 9P36 和 9R10 谱线分别泵浦 CH_3OH 气体所输出的 2.52 THz 和 3.11 THz 的太赫兹波的频谱进行了测量。结果显示, 太赫兹激光器输出的为单频点窄线宽太赫兹波, 其相应的中心频率分别为 2.525 4 THz 和 3.116 0 THz, 测量结果与理论标称值具有很好的一致性, 频率分辨率及准确度在 1 GHz 左右, 测量系统的可靠性高, 相应的频谱测量结果也为该类太赫兹源的应用提供了重要数据支撑。在对频率进行准确测量的基础上, 利用迈克尔逊干涉法对移动镜(目标)的运动速度进行了测量, 提出了两种数据处理方式, 均获得

了准确的目标运动速度。其中速度比较法误差较小, 但只能对匀速运动进行测量; 干涉条纹法误差稍大, 但能够给出变速运动时的实时速度。在实际应用中, 应当根据特定条件及需求合理选取数据处理方法。此外, 干涉条纹法可以扩展为对目标反射信号的相对相位进行测量, 有望用于获得连续起伏表面目标的三维轮廓图像。

参 考 文 献:

- [1] Lee Y S. Principles of Terahertz Science and Technology [M]. Springer Science & Business Media, 2009.
- [2] Yao Jianquan, Zhong Kai, Xu Degang. Study and outlook of terahertz space applications [J]. *Space Electronic Technology*, 2013, 10(2): 1-16. (in Chinese)
姚建铨, 钟凯, 徐德刚. 太赫兹空间应用研究与展望[J]. 空间电子技术, 2013, 10(2): 1-16.
- [3] Guo Lihan, Wang Xinke, Zhang Yan. Terahertz digital holographic imaging of biological tissues [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(3): 611-615. (in Chinese)
郭力茜, 王新柯, 张岩. 生物组织的太赫兹数字全息成像[J]. 光学精密工程, 2017, 25(3): 611-615.
- [4] Xie Qi, Yang Hongru, Li Hongguang, et al. Explosive identification based on terahertz time-domain spectral system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24 (10): 2392-2399. (in Chinese)
解琪, 杨鸿儒, 李宏光, 等. 基于太赫兹时域光谱系统的爆炸物识别[J]. 光学精密工程, 2016, 24(10): 2392-2399.
- [5] Hu Weidong, Ji Jinjia, Liu Ruiting, et al. Terahertz atmosphere remote sensing [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(5): 656-665. (in Chinese)
胡伟东, 季金佳, 刘瑞婷, 等. 太赫兹大气遥感技术[J]. 中国光学, 2017, 10(5): 656-665.
- [6] Ding Li, Ding Xi, Ye Yangyang, et al. Overview of passive terahertz imaging systems for indoor concealed detection [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(1): 114-121. (in Chinese)
丁丽, 丁茜, 叶阳阳, 等. 室内人体隐匿物被动太赫兹成像研究进展[J]. 中国光学, 2017, 10(1): 114-121.
- [7] Zhong K, Shi W, Xu D, et al. Optically pumped terahertz sources [J]. *Science China Technological Sciences*, 2017, 60 (12): 1801-1818.
- [8] Wang Maorong, Zhong Kai, Liu Chu, et al. Radar cross section measurement of standard targets at 3.11 THz based on terahertz gas lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*,

- 2018, 47(2): 0225001. (in Chinese)
- 王茂榕, 钟凯, 刘楚, 等. 基于太赫兹气体激光器的 3.11 THz 标准体雷达散射截面测量 [J]. 红外与激光工程, 2018, 47(2): 0225001.
- [9] Fan Changkun, Li Qi, Zhou Yi, et al. Measurement investigation of 2.52 terahertz back scattering in aluminium plates with four kinds of roughness [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 35(11): 111201. (in Chinese)
- 樊长坤, 李琦, 周毅, 等. 四种粗糙度铝板的 2.52 太赫兹后向散射测量研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 35(11): 111201.
- [10] Li Qi, Yang Yongfa, Hu Jiaqi. A composite algorithm used for terahertz confocal scanning image restoration[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 321–326. (in Chinese)
- 李琦, 杨永发, 胡佳琦. 一种用于太赫兹共焦扫描图像复原的复合算法[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(1): 321–326.
- [11] Han Xiaohui, Cui Hongliang, Zhang Jin, et al. Accurate and rapid extraction of optical parameters for thin plates with terahertz time domain spectroscopy technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(5): 0525003. (in Chinese)
- 韩晓惠, 崔洪亮, 张瑾, 等. 太赫兹时域光谱技术用于准确地提取薄片的光学参数 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(5): 0525003.
- [12] Zhang Xutao, Sun Jinhai, Cai He, et al. Quiet zone measurements and data processing of THz–TDS experiment system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(11): 1125003. (in Chinese)
- 张旭涛, 孙金海, 蔡禾, 等. 太赫兹时域光谱系统静区测试及数据处理[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(11): 1125003.
- [13] Wang M R, Zhong K, Liu C, et al. Optical coefficients extraction from terahertz time–domain transmission spectra based on multibeam interference principle [J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(4): 044101.
- [14] Stone M R, Naftaly M, Miles R E, et al. Generation of continuous–wave terahertz radiation using a two–mode titanium sapphire laser containing an intracavity Fabry–Perot etalon [J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 97(10): 103108.
- [15] Liu W, Wu D, Wang Y, et al. Terahertz frequency measurement of far–infrared laser with an improvement of Martin–Puplett interferometer [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2010, 614(2): 313–318.
- [16] Zuo Z G, Ling F R, Wang P, et al. Hyperfine spectrum measurement of an optically pumped far–infrared laser with a Michelson interferometer [J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10(5): 055004.