

# 超分辨太赫兹波频谱仪系统

魏白光<sup>1</sup>, 袁慧<sup>2,3\*</sup>, 赵跃进<sup>3</sup>, 张存林<sup>4</sup>

<sup>1</sup>吉林化工学院教务处, 吉林 吉林 132022;

<sup>2</sup>Physikalisches Institut, Johann Wolfgang Goethe-Universität, Frankfurt am Main 60438;

<sup>3</sup>北京理工大学光电学院北京市精密光电测试仪器及技术重点实验室, 北京 100081;

<sup>4</sup>首都师范大学物理系太赫兹光电子学教育部重点实验室, 北京 100048

**摘要** 基于光学干涉理论,提出了一种超分辨太赫兹波频谱仪系统。干涉系统采用的是自主研制的宽带氮化镓阵列探测器,用于信号的多点同时探测。所提出的太赫兹波频谱仪具有较高的精度,可实现超分辨。利用阵列探测器得到的二维强度分布,可以测定待测光源的光束质量。利用倍频链发射源产生的 470~720 GHz 连续太赫兹波对频谱仪进行验证。在 75 mm 探测距离下,频谱仪的频谱分辨率为 100 MHz,测量精度为 0.1%,该精度是相同探测距离下分辨极限及精度的 20 倍。

**关键词** 测量; 太赫兹; 频谱仪; 干涉; 超分辨

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0614036

## Super-Resolution Terahertz Wave Spectrometer

Wei Baiguang<sup>1</sup>, Yuan Hui<sup>2,3\*</sup>, Zhao Yuejin<sup>3</sup>, Zhang Cunlin<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Office of Academic Affairs, Jilin Institute of Chemical Technology, Jilin, Jilin 132022, China;

<sup>2</sup>Physikalisches Institut, Johann Wolfgang Goethe-Universität, Frankfurt am Main 60438, Germany;

<sup>3</sup>Beijing Key Laboratory for Precision Optoelectronic Measurement Instrument and Technology, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

<sup>4</sup>Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education of China, Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China

**Abstract** Herein, a super-resolution terahertz wave spectrometer system is proposed based on optical interference theory. The interference system can be used for the multipoint simultaneous detection of signals based on a self-developed broadband GaN array detector. The proposed spectrometer has high precision and can achieve super-resolution. The beam quality of the source to be tested can be measured based on the two-dimensional intensity distribution obtained by the proposed array detector. Continuous terahertz waves, generated by a multiplier-chain emission source with a frequency range from 470 to 720 GHz, are used as the testing source to verify the proposed spectrometer. At a detection distance of 75 mm, the spectral resolution and the measurement accuracy are determined to be 100 MHz and 0.1%, respectively. These values are 20 times the resolution and accuracy limits under the same detection conditions.

**Key words** measurement; terahertz; spectroscopy; interference; super-resolution

**OCIS codes** 120.3180; 040.2235; 070.4790; 300.6190

## 1 引言

太赫兹波是指频率在 0.1~10 THz 之间的一种电磁辐射<sup>[1-2]</sup>,介于中红外和毫米波之间,具有一

些独特的性质(如穿透性、安全性、瞬态性及谱识别性等),可以穿透大部分非极性分子材料(如纸张、皮革、泡沫塑料等),对于许多生物大分子具有独特的“指纹”识别谱,可携带大量独特的生物学和信息学

收稿日期: 2019-01-23; 修回日期: 2019-02-28; 录用日期: 2019-03-04

基金项目: 吉林化工学院项目(2018016)

\* E-mail: yuan@physik.uni-frankfurt.de

特征,因而在空间传输、雷达通信、无损检测和隐蔽物成像<sup>[2-4]</sup>等方面具有广阔的应用前景。随着各行各业的飞速发展,实际应用中太赫兹辐射的要求也越来越高。大量太赫兹辐射源[如量子级联激光器(QCL)、返波振荡器(BWO)和耿氏振荡器(Gunn)等]的性能不断提高,因此在各种嘈杂环境中对其进行精确测量的需求也在不断增加,尤其是对频谱特性的精确测量。然而,最近的研究表明,在整个频率范围内只有少数精确、有效的方法可以检测太赫兹波的频谱特性。

截至目前,太赫兹波频谱特性的检测方法主要有三种:外差法、半导体量子阱探测(QWIP)法和干涉测量法。其中,外差法主要有电外差法和电光采样法<sup>[5-10]</sup>。电外差法只能在单次测量过程中表征太赫兹频谱内的窄带频率,难以获得高频信号的精确测量。此外,利用电外差法进行探测时需要频率相当的本振信号作为参考,而通常产生稳定参考信号的成本较高且系统相对复杂;电光采样法通常用于检测脉冲太赫兹波源光谱单元中的光电导天线(PCA)或非线性晶体额外的锁模激光,但该方法的实验成本较高、系统较复杂且其信噪比较低。采用QWIP法<sup>[11-12]</sup>进行探测时,其量子阱中被束缚的空穴与横向的色散息息相关,因此需采用光栅作为色散元件进行耦合。此外,在太赫兹波段采用QWIP法时需要系统工作在偏压状态下,此时为抑制暗电流,需要极低的工作温度。干涉测量法通常用于检测激光光谱,目前在太赫兹领域也具有重大意义<sup>[13-15]</sup>。干涉测量法能够实现6 GHz内单频连续太赫兹光源的实时检测<sup>[16]</sup>,而且通过使用干涉原理可扩展太赫兹光源的测量频率范围,具有定量测量、较高成本效益和可实时测量等优势,可应用于宽带脉冲太赫兹波的测量。现有的脉冲太赫兹波研究<sup>[17]</sup>表明这种方法能使频谱覆盖到整个太赫兹波段,可以检测连续太赫兹波的全频段范围,但是分辨率受参考信号扫描范围的限制<sup>[18]</sup>。针对该问题,本文提出了一种基于光学干涉原理的超分辨太赫兹频谱仪,采用阵列探测器多个探测点并行输出及数据合并的方式解决了探测长度对分辨率限制的问题。系统通过时间调制的方式对信号进行采集,使每次采样数据都包含了所有太赫兹波的光谱成分信息,极大地提高了信噪比和测试精度。与传统的太赫兹频谱测量方法相比,本文所提方法的光路简单,不使用光栅分光元件便能得到能量较弱的太赫兹波频谱分布。

## 2 基本原理

### 2.1 干涉基本原理和频谱与干涉信号的基本关系

所提的太赫兹频谱仪是基于迈克耳孙干涉原理搭建的。根据干涉理论,单频信号的干涉强度可表示为

$$I(x, y) = I_1(x, y) + I_2(x, y) + 2\cos(\Delta\varphi) \sqrt{I_1(x, y)I_2(x, y)}, \quad (1)$$

式中: $(x, y)$ 为空间位置坐标; $I_1(x, y)$ 为测量光的强度; $I_2(x, y)$ 为参考光的强度; $\Delta\varphi$ 为测量光和参考光间的相位差。当探测光与参考光之间的光程差为 $X$ 时,相应的相位差为 $\Delta\varphi = 4\pi X/f$ ,其中 $f$ 为太赫兹波的频率。当 $X$ 呈线性变化时, $I(x, y)$ 的交流分量 $I_{AC}$ [ $I_{AC} = 2\cos(\Delta\varphi) \sqrt{I_1(x, y)I_2(x, y)}$ ]按余弦定律变化,并携带信号源的频率信息,其频谱分布 $F(\nu)$ 可通过交流分量的傅里叶变换获得。单频信号 $F(\nu)$ 可表示为

$$F(\nu) = 2[\delta(\nu - f) + \delta(\nu + f)], \quad (2)$$

式中: $\nu$ 为频率坐标; $\delta(\cdot)$ 为狄拉克函数。(2)式右端为余弦函数经傅里叶变换的频谱表达式。

由于(2)式中的 $F(\nu)$ 与 $f$ 有关,可以从其分布中提取光谱信息。对于复色光入射的情况,干涉信号为各频率干涉信号的叠加,可以表示为

$$I(x, y) = \int [I_1(x, y, f) + I_2(x, y, f) + 2\cos(\Delta\varphi) \sqrt{I_1(x, y, f)I_2(x, y, f)}] df. \quad (3)$$

对应频谱为各频率信号的频谱之和,即

$$F = \sum F(\nu). \quad (4)$$

由于复色光的频谱分布为各频率成分之和,为简便分析,在此采用单频连续太赫兹(CW THz)源对其进行验证。

### 2.2 太赫兹信号探测原理

为提高测量结果的信噪比和测量精度,系统采用时间调制的方式对信号进行编码,信号的解调采用锁相放大器实现。锁相放大器将阵列探测器的探测信号作为输入,调制信号作为参考,对采集信号进行滤波放大,在提高信噪比的同时也使系统具有较宽的动态范围。

采用信号驱动的倍频太赫兹源进行验证,采用电学驱动的方波信号进行调制,调制信号可表示为

$$I_t = \text{rect}(\omega t) \otimes \frac{1}{2} \text{comb}\left(\frac{\omega t}{2}\right), \quad (5)$$

式中: $t$ 为时间; $\omega$ 为角频率; $\text{rect}(\cdot)$ 为矩形函数;

$\text{comb}(\cdot)$ 为梳状函数。锁相放大器利用不同信号的筛选功能将参考信号和待测信号相乘,故锁相放大器的输出为

$$I(x, y, t) = \frac{A}{\pi} [I_1(x, y, t) + I_2(x, y, t) + 2\cos(\Delta\varphi, t) \sqrt{I_1(x, y, t)I_2(x, y, t)}], \quad (6)$$

式中: $A$ 为调制幅度,与阵列探测器的转换效率和锁相放大器的放大系数有关。

### 2.3 超分辨率理论分析

系统的频谱为扫描强度变化的傅里叶变换。根据通信原理,当采用单点探测器对干涉强度进行测量时,系统的分辨率与最大光程差或参考光的扫描范围成反比。当系统扫描长度为 $L$ 时,探测光的最大延迟时间为 $2L/c$ ,其相应的最小频率分辨率为

$$\sigma = \frac{c}{2L}, \quad (7)$$

式中: $c$ 为光速。

由(7)式可以看出:扫描长度 $L$ 越长,系统的频率分辨率越高,然而受空气对太赫兹波的衰减、扰动和扫描平移台移动范围有限等因素的影响, $L$ 不可能无限制延长。在此采用多像素阵列探测器对干涉信号进行并行探测。利用对不同像素探测数据进行时间序列叠加合成的方式在数据处理阶段对 $L$ 进行虚拟延长。探测器像素为 $6 \text{ pixel} \times 7 \text{ pixel}$ ,但是在聚焦光斑附近进行探测时,从探测器周围像素探测到的干涉信号对比度相对中间像素较差,因而选取中间像素为 $4 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$ 的信号作为采集信号,并进行后续处理。对采集到的各像素探测信号依序进行整合,相当于在空间上对扫描长度 $L$ 进行了虚拟延长。若采用 $20 \text{ pixel}$ 采集的数据进行计算,则相当于将 $L$ 扩大了20倍。将其代入(7)式可得到该系统的频谱测量分辨率为

$$\sigma' = \frac{c}{40L}. \quad (8)$$

比较(7)式和(8)式可以发现,采用所论证的阵列探测器记录干涉强度,得到的频谱测量分辨率为相同探测距离下利用单点探测器进行探测的频谱测量分辨率的20倍。

### 2.4 实验系统

基于干涉原理<sup>[19-20]</sup>,搭建的超分辨太赫兹频谱仪原理图如图1所示。其中 $S$ 为待测太赫兹波源,离轴抛物面镜 $L1$ 作为准直镜将入射光准直为平行光,高阻硅晶片(厚度 $0.5 \text{ mm}$ )作为分束器( $BS$ )对准直光进行分束。反射镜 $M1$ 固定不动,将 $M1$ 反

射光经分束器再次反射后的信号作为参考光。反射镜 $M2$ 固定在一维精密平移台上,通过平移台控制 $M2$ 的线性移动,改变其反射光的光程差,使透过硅片的反射光作为探测光入射到探测单元。参考光和测量光经过硅片的二次反射和透射后重新形成共线光路。探测单元由聚焦抛物面镜 $L2$ 及宽带阵列氮化镓( $\text{GaN}$ )探测器构成,其中 $L2$ 将探测光聚焦到参考光,使得在探测区域获得更多的干涉能量。由于 $L2$ 的聚焦作用,当探测阵列恰好位于 $L2$ 的焦平面处时,在焦点中央的像素处探测到的光信号相对较强,其他像素所探测到的能量则相对较弱,甚至有可能被噪声淹没。在实际测量中,为了使能量覆盖到探测器的各个像素上,探测器需稍偏移焦点位置。

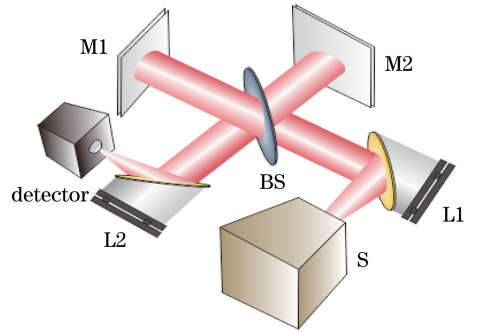


图1 超分辨太赫兹频谱仪原理图

Fig. 1 Principle diagram of super-resolution terahertz wave spectrometer

阵列探测器由 $6 \text{ pixel} \times 7 \text{ pixel}$ 单像素 $\text{GaN}$ 探测器( $\text{GaN}$ 探测器为宽带探测器,其响应频率覆盖太赫兹波段)以阵列方式组合而成,其像素大小为 $0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 。该阵列探测器各像素串行输出,利用锁相放大器并以斩波频率为参考对探测器的输入信号进行分析和检测。

系统采用信号发生器驱动的倍频链发射源对太赫兹波频率的测量结果进行验证,该太赫兹源的输出频率范围为 $470 \sim 720 \text{ GHz}$ ,输出功率约为 $0.1 \text{ mW}$ 。由于电子倍频链可以提供相干、偏振和单色的输出,采用该设备可以更好地检测系统的分辨率特性。

## 3 实验结果

实验采用的太赫兹测试源输出频率由驱动信号发生器控制,其输入频率范围为 $13 \sim 20 \text{ GHz}$ ,经过36倍频后作为太赫兹辐射被太赫兹波频谱仪探测,频谱仪的测试频率范围为 $470 \sim 720 \text{ GHz}$ 。图2为 $\text{GaN}$ 阵列探测器对聚焦光斑的强度响应,该结果表

明光斑大直径约为 5 pixel,即 2.5 mm(像素尺寸为 0.5 mm×0.5mm)。对于阵列探测器而言,周边像素的光线入射强度比中间像素小,对应的干涉强度对比度较低。为保证测量的精度,这里舍弃阵列探测器周边像素的测量结果,仅采用中间 4 pixel×5 pixel像素的结果进行后续处理。

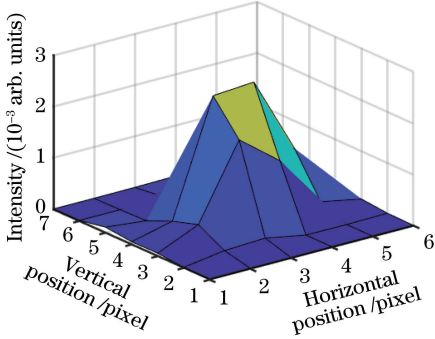


图 2 GaN 阵列探测器对聚焦光斑的强度响应  
Fig. 2 Intensity response of GaN array detector to focusing spot

为了更清晰地展示测试结果,分别选取频谱较为简单的 504 GHz 太赫兹波和频谱相对复杂的 600 GHz 太赫兹波进行分析。图 3 为频谱仪探测得到的频率为 504 GHz 和 600 GHz 太赫兹波的干涉强度分布图,其中插图为阵列探测器中间像素在探测长度 75 mm 内对 504 GHz 信号的探测结果。

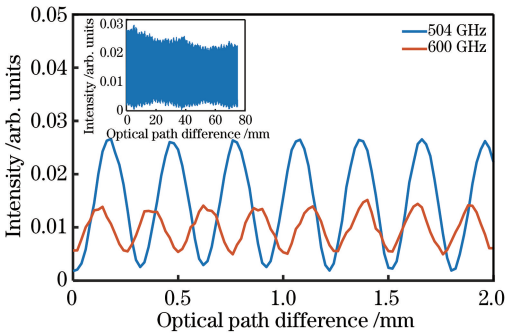


图 3 频谱仪探测得到的频率为 504 GHz 和 600 GHz 太赫兹波的干涉强度分布图

Fig. 3 Interference intensity distributions of terahertz waves with frequencies of 504 GHz and 600 GHz detected by spectrometer

对该频率下的单像素和合成数据分别做傅里叶变换,可以得到如图 4 所示的频率为 504 GHz 和 600 GHz 太赫兹波的频谱。其中,蓝色和黄色曲线分别是频率为 504 GHz 和 600 GHz 的单像素测量结果,红色曲线和紫色曲线为多像素合成测量结果,插图为各频谱局部放大图。该测量结果表明合成测量结果具有更高的分辨率。

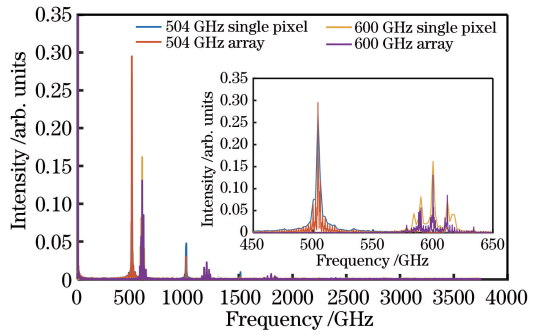


图 4 频谱仪探测得到的频率为 504 GHz 和 600 GHz 太赫兹波的频谱

Fig. 4 Spectra of terahertz waves with frequencies of 504 GHz and 600 GHz obtained by spectrometer

为比较所搭建的超分辨率谱测量系统与单像素测量系统的分辨率,对倍频链路太赫兹源输入进行设置,以产生频率为 599.899 GHz 和 600 GHz 的信号,并分别采用单像素及阵列探测器进行探测,得到的测量结果如图 5 所示(图中蓝色和红色虚线分别为单像素探测器对频率为 599.899 GHz 和 600 GHz 信号的测量结果,蓝色和红色实线分别为阵列探测器对频率为 599.899 GHz 和 600 GHz 信号的测量结果)。采用单像素对两种频率信号进行测量,其结果均为 600 GHz,无法分辨频率差约为 100 MHz 的信号。而阵列探测器对 599.899 GHz 信号的测量结果为 599.9 GHz,对 600 GHz 信号的测量结果为 600 GHz。虽然阵列探测器探测到的 599.899 GHz 信号的测量结果不能精确到 1 MHz,但对其进行 100 MHz 精度的近似后,其测量结果与标准值相吻合,证明该系统的测量精度约为 100 MHz,且为单像素测量结果数据点频率间距(2 GHz)的 20 倍。

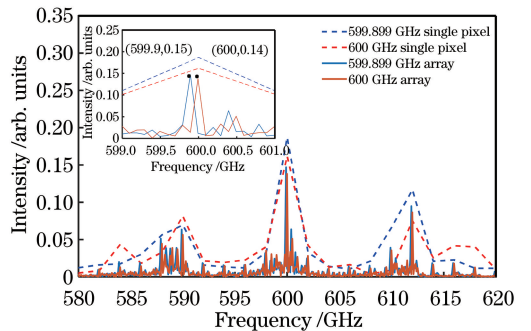


图 5 单像素系统与阵列探测器对频率为 599.899 GHz 和 600 GHz 信号的测量结果

Fig. 5 Measurement results of terahertz waves with frequencies of 599.899 GHz and 600 GHz by single pixel system and array detector

## 4 分析与讨论

图 6 所示为不同频率下的太赫兹源的频谱分布,其中插图为在不同频率输出条件下辐射源的干涉强度测量结果。图 7 为频率测量结果与标准值的比较图。各频率输出结果的分立窄带谱线表明系统的分辨率达到了测试要求。通过将各频率的测试结果与标称值进行对比,可以验证测量结果的准确度。

利用所采用的电子倍频链以信号发生器产生的单频信号倍频作为输出,具有极好的相干性与偏振态,其输出频率与理论值的误差小于 1 MHz,因而可采用理论值作为标准值对测量结果进行验证。理论分析结果表明:频率扫描过程中的最小分辨率与扫描长度成正比,如当扫描长度为 75 mm 时,其理论分辨率为 2 GHz,且各频率测量结果在该分辨率下与标准值相吻合。当采用数据整合的方式对其进行超分辨测量时,理论分辨率为 100 MHz,各频率测量结果在该分辨率下与标准值相吻合。通过与单点探测的测量结果进行对比,可以看出超分辨测量结果中含有单点探测遗漏的频谱分布细节,在相同扫描长度条件下可以获得更多的频谱分布信息。此外,系统的信号提取是通过锁相放大器实现的,其驱动源斩波频率为 233 Hz,锁相积分时间为 10 ms,该条件下的等效噪声功率  $I_{\min}$  为  $0.1 \mu\text{W}$ 。根据动态范围公式  $D_R = 20\lg(I_{\max}/I_{\min})$  和待测太赫兹源  $0.1 \text{ mW}$  的最大输出功率( $I_{\max}$ ),计算得到系统具有 60 dB 的动态范围。系统在各频率下的测量结果与标准值相吻合,对应的测量分辨率为 100 MHz,故其测量精度大于 0.1%。

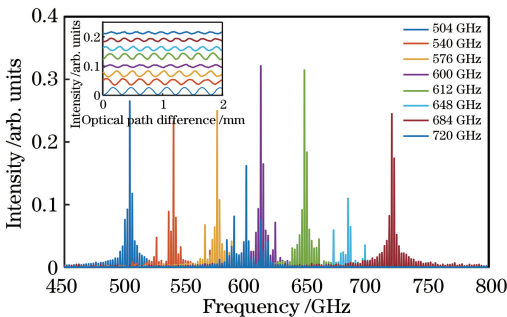


图 6 不同频率下的太赫兹源的频谱分布

Fig. 6 Spectra of terahertz sources with different frequencies

从图 3 插图中扫描全程范围内干涉强度的分布可以看出,系统所测量的随扫描距离变化的干涉信号强度存在一定的波动。造成该波动的主要原因包括:1)待测太赫兹源本身的频率漂移,可归结于待测项;2)在测量中由机械扫描产生的光程差、平移台震

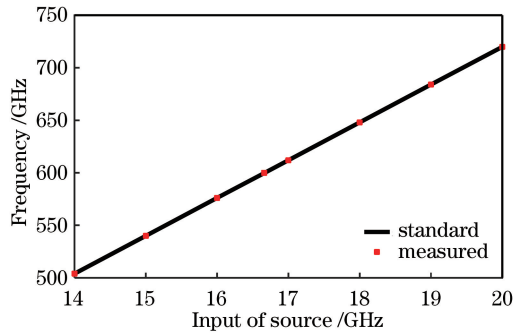


图 7 频率测量结果与标准值的比较图

Fig. 7 Comparison between spectral measurement results and standard values

动、温度和环境扰动均会对测量结果产生影响。目前仍无法区分频谱中的波动是由太赫兹源本身产生的还是由环境影响导致的,故需要进一步优化系统以提高其测量精度。

## 5 结 论

提出了一种基于光学干涉原理的超分辨太赫兹光谱测量系统。主要分析了干涉原理在太赫兹频段应用的数学模型,并将其应用在太赫兹频谱测量系统中。系统采用多点阵列 GaN 探测器对太赫兹波干涉信号进行同步测量,通过数字信号处理方式对采集的数据进行了整合,并对数据容量进行了数字拓展,从而提高了相同探测距离下的分辨率。利用窄带宽的太赫兹倍频链发射源对实验结果进行验证,在测量长度为 75 mm 条件下可以实现 100 MHz 的频谱分辨率,该分辨率为相同条件下单点探测器测量结果的 20 倍。同时测量精度可达 0.1%,为相同条件下单点探测测量结果的 20 倍。结果表明,所设计的方案在分辨率和精度上得到了相应的提高,可满足系统发展中高精度、低成本、高动态的要求,适用于精密频谱测量。然而,由于环境噪声等对测量太赫兹波能量密度的影响,该实验存在一定的实验误差,故该实验系统与外界的隔离及抗震等特性还需进一步改进。

**致谢** 特别感谢赵跃进教授以及张存林教授在论文撰写及科研方面的无私帮助。

## 参 考 文 献

- [1] Peiponen K E, Zeitler A, Kuwata-Gonokami M. Terahertz spectroscopy and imaging [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013: 29-40.
- [2] Lu T L, Yuan H, Wu T, *et al.* Continuous terahertz

- spectrum measurement based on interferometry[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(4): 041202.
- 卢铁林, 袁慧, 吴同, 等. 干涉法测量连续太赫兹波频谱[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(4): 041202.
- [3] Yang Y P, Zhang Z W. Terahertz imaging technology[M]. Beijing: Central Minzu University Press, 2008: 2-4.
- 杨玉平, 张振伟. 太赫兹成像技术[M]. 北京: 中央民族大学出版社, 2008: 2-4.
- [4] Fattinger C, Grischkowsky D. Terahertz beams[J]. *Applied Physics Letters*, 1989, 54(6): 490-492.
- [5] Capasso F, Paiella R, Martini R, *et al.* Quantum cascade lasers: ultrahigh-speed operation, optical wireless communication, narrow linewidth, and far-infrared emission [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2002, 38(6): 511-532.
- [6] Yokoyama S, Nakamura R, Nose M, *et al.* Terahertz spectrum analyzer based on a terahertz frequency comb[J]. *Optics Express*, 2008, 16(17): 13052-13061.
- [7] Yasui T, Hayashi K, Ichikawa R, *et al.* Real-time absolute frequency measurement of continuous-wave terahertz radiation based on dual terahertz combs of photocarriers with different frequency spacings [J]. *Optics Express*, 2015, 23(9): 11367-11377.
- [8] Lin Q G, Pan X J, Zheng S Q, *et al.* Crossed and balanced single-shot electro-optic measurement for terahertz pulses [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(1): 0114001.
- 林庆钢, 潘新建, 郑水钦, 等. 太赫兹脉冲的正交平衡单次电光测量[J]. *中国激光*, 2017, 44(1): 0114001.
- [9] Gaal P, Raschke M B, Reimann K, *et al.* Measuring optical frequencies in the 0-40 THz range with non-synchronized electro-optic sampling [J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(10): 577-580.
- [10] Yasui T, Kabetani Y, Saneyoshi E, *et al.* Terahertz frequency comb by multifrequency-heterodyning photoconductive detection for high-accuracy, high-resolution terahertz spectroscopy[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(24): 241104.
- [11] Cao J C. Terahertz semiconductor detectors [J]. *Physics*, 2006, 35(11): 953-956.
- 曹俊诚. 太赫兹半导体探测器研究进展[J]. *物理*, 2006, 35(11): 953-956.
- [12] Guo X G, Gu L L, Fu Z L, *et al.* Research on terahertz quantum-well photodetectors [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(9): 092302.
- 郭旭光, 顾亮亮, 符张龙, 等. 太赫兹量子阱探测器研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(9): 092302.
- [13] Kokkonen K, Kaivola M. Scanning heterodyne laser interferometer for phase-sensitive absolute-amplitude measurements of surface vibrations [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(6): 063502.
- [14] Deninger A J, Göbel T, Schönherr D, *et al.* Precisely tunable continuous-wave terahertz source with interferometric frequency control[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2008, 79(4): 044702.
- [15] Johnson J L, Dorney T D, Mittleman D M. Enhanced depth resolution in terahertz imaging using phase-shift interferometry [J]. *Applied Physics Letters*, 2001, 78(6): 835-837.
- [16] Naftaly M, Dean P, Miles R E, *et al.* A simple interferometer for the analysis of terahertz sources and detectors[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2008, 14(2): 443-448.
- [17] Zhang L L, Mu K J, Zhou Y S, *et al.* High-power THz to IR emission by femtosecond laser irradiation of random 2D metallic nanostructures [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 12536.
- [18] Zhao J, Zhang L L, Luo Y M, *et al.* Power dependence of terahertz carrier frequency in a plasma-based two-color generation process [J]. *Chinese Physics B*, 2014, 23(12): 127201.
- [19] Xie J H, Zhao D Z, Yan J X. Physical optics course [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2005: 125-127.
- 谢敬辉, 赵达尊, 阎吉祥. 物理光学教程[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005: 125-127.
- [20] Kujawinska M, Robinson D W. Multichannel phase-stepped holographic interferometry [J]. *Applied Optics*, 1988, 27(2): 312-320.