

基于太赫兹时域谱烟支湿度密度检测的实验研究

周永军 张辉 张宣妮 王西明

咸阳师范学院物理与电子工程学院, 陕西 咸阳 712000

摘要 卷烟湿度及密度是衡量烟支品质的重要物理指标,适当的湿度和密度不仅可以提高烟支质量,而且可以降低残品率。以检测烟支湿度及密度为目的,利用时域谱(TDS)实验系统采集密度相同但湿度不同的3组烟支样品(每组11个样品)及湿度相同但密度不同的2组烟支样品(每组14个样品)的太赫兹时域波谱,建立了基于峰值衰减量 $\ln E$ 的湿度计算模型和烟支密度与太赫兹时域谱峰值的数学表达式。结果表明,利用湿度模型计算的结果与传统烘干称重法比较,在湿度20%以下两者的绝对误差小于2.5%;烟支密度与太赫兹时域谱峰值相关且相关系数约为0.9639。说明基于太赫兹时域谱的烟支湿度密度检测不但可行而且具有较高精度。

关键词 光谱学; 太赫兹; 时域谱; 烟支湿度密度; 检测

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.013001

Experimental Research on Cigarette Humidity and Density Detection Based on Terahertz Time-Domain Spectroscopy

Zhou Yongjun Zhang Hui Zhang Xuanni Wang Ximing

School of Physics and Electronic Engineering, Xianyang Normal University, Xianyang, Shaanxi 712000, China

Abstract Humidity and density are important physical indicators to evaluate the quality of cigarettes. Proper humidity and density can improve the quality of the cigarettes and reduce the defective rate. To detect cigarette humidity and density, the terahertz time-domain spectra (TDS) of 3 cigarette sample groups (each group contains 11 samples) with identical density and different humidity and 2 cigarette sample groups (each group contains 14 samples) with identical humidity and different density, are collected using the time-domain spectroscopy system. The humidity calculation model which is based on the peak attenuation $\ln E$ and the mathematical expression between cigarette density and the spectral peak in terahertz time-domain are established. Compared with the traditional method of drying and weighing, the results obtained by the humidity calculation model show that the absolute error is less than 2.5% when the humidity is lower than 20%. The cigarette density and the spectral peak in terahertz time-domain are relevant. The correlation coefficient can reach 0.9639. The detection of cigarette humidity and density based on the terahertz time-domain spectroscopy is not only feasible but also with high accuracy.

Key words spectroscopy; terahertz; time-domain spectroscopy; cigarette humidity and density; detection

OCIS codes 300.6495; 120.1880; 300.1030

1 引言

随着烟草在国际贸易出口创汇中所占比重越来越大,烟草及成品烟贮藏过程中病害(烟虫危害、霉变等)防治问题越来越突出。新产烟叶一般需经过一定时间的自然醇化(目的是提高烟叶燃吸品质和可用性)才宜加工为成品烟,而片烟醇化贮藏周期一般长达1~2年,这期间极易发生由微生物引起的烟虫危害、霉变等病害,有报道称全世界烟草行业每年因病害造成的直接经济损失达三亿多美元^[1],其中霉变占有很大比例。烟草霉变是指霉菌以烟草水分为载体吸收各种盐类、糖类和淀粉等营养物质^[2]引起的烟叶劣变过程,轻则降低烟草的品质,重则烟草会完全失去使用价值^[3]。

烟草水分超标(湿度大于15%)是导致烟草及成品烟霉变的主因,且湿度越高,烟草霉变几率越高。如能

收稿日期: 2015-04-10; 收到修改稿日期: 2015-07-29; 网络出版日期: 2015-11-20

基金项目: 国家自然科学基金(61307002)、陕西省科技研究发展计划(2014JQ8316)、陕西省教育厅自然科学基金(09JK806)、咸阳师范学院科研基金(14XSYK009)、咸阳师范学院教改项目(201402010)

作者简介: 周永军(1976—),男,博士,讲师,主要从事太赫兹光电子学方面的研究。E-mail: hoozyj@tom.com

及时探知烟草湿度,采取措施将其控制在安全范围以内(湿度低于15%),不仅可以抑制霉菌生长,而且有助于提高烟草品质(如物理性能、可燃性、烟气成分及感官特性等);另外对烟草加工而言,合适的卷烟密度及含水率对稳定烟支重量、提高烟丝抗碎性及降低烟支空头率等有一定的意义^[4-5]。随着烟草加工技术的不断深入和特色工艺的提出^[6],精准探知卷烟湿度及密度对烟草加工、烟草及制品的贮存有着重要的意义。

目前检测烟草湿度的技术方法有烘箱烘干法^[7-8]、硫酸干燥器法^[9]、共沸蒸馏法^[7]、红外技术^[10]、核扫描技术^[11]、微波技术^[12]等。烘箱烘干法、硫酸干燥器法及共沸蒸馏法存在测试周期较长、测试方法繁琐等不足;红外技术和微波技术虽测量精度较高,但易受大气衰减及周围环境其他气体的影响;核扫描技术由于危害人体健康且管理成本高等原因已被淘汰或仅用于某些科学研究。

随着20世纪80年代一系列新技术、新材料的发展,一种包含丰富光谱信息且有很多独特优点的辐射测试技术——太赫兹技术得以迅速发展,与红外光谱测试技术相比,太赫兹时域光谱可同时获得样品的吸收和色散信息,且具有较高的信噪比(10^{10})和探测灵敏度,因而太赫兹应用技术受到科研工作者的广泛关注^[13-21]。

本文利用时域谱(TDS)系统采集了密度相同但湿度不同的3组烟支样品(每组11个样品)及相对湿度相同但密度不同的2组烟支样品(每组14个样品)的太赫兹时域波谱,建立了烟支密度与时域谱峰值间的数学表达式及基于峰值衰减量 $\ln E$ 的湿度计算模型,并将由湿度计算模型得到的结果与传统烘干称重法的结果进行误差比较。结果表明该方法不仅可行而且具有较高精度。

2 实验样品制备及太赫兹时域光谱采集

具有一定体积且含水的物料可近似为由3部分组成的混合物:一定体积的空气、一定体积的干燥物料及一定体积的水。因此烟支湿度可定义为

$$M = \frac{m_w}{m_d + m_w} \times 100\%, \quad (1)$$

烟支密度定义为

$$D = \frac{m_d + m_w}{V}, \quad (2)$$

式中 m_w 为物料含水质量; m_d 为干燥物料质量, V 为物料体积。

2.1 实验样品制备

1) 湿度实验样品制备:将购买于市场的某品牌香烟(烟支直径为8 mm,长度为59 mm)通过分析天平称量[型号为FA1104B,精度(感量)为0.1 mg,量程为110 g]求平均重量,挑选出重量为平均重量 ± 0.01 g的烟支置于DLWTH-12L型恒温恒湿试验箱中平衡24 h(温度22.5 °C、不同湿度环境),制成湿度实验样品。

2) 密度实验样品制备:挑选重量不同的烟支并置于DLWTH-12L型恒温恒湿试验箱中平衡24 h(温度22.5 °C、相同湿度),制成密度实验样品。

2.2 烟支样品太赫兹时域谱采集

太赫兹时域频谱系统是一种当前比较成熟的太赫兹产生和探测系统,其原理如图1所示,飞秒激光脉冲经分束镜后分为抽运光和探测光,抽运光激励发射器产生太赫兹脉冲辐射并入射到探测器上,改变探测器的某些特性,由探测光将这种变化读出,通过测量探测器输出电压,就能间接测量到太赫兹波,改变抽运光

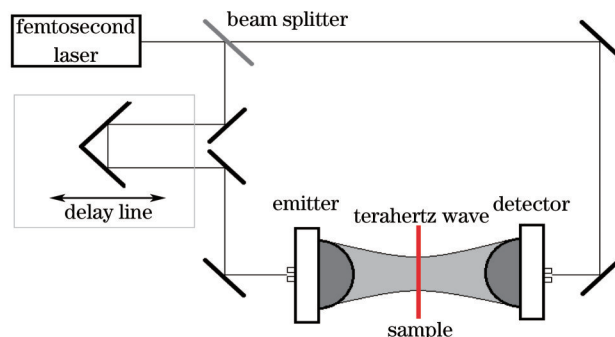


图1 太赫兹时域频谱系统原理图

Fig.1 Schematic of terahertz time-domain spectroscopy system

光路上的延迟线就能测量得到太赫兹波的时域波形,如果在发射器和探测器中间放置一个样品即可测得样品的时域太赫兹波谱。将时域谱进行傅里叶变换,可以得到相应的频域谱^[22]。

实验装置是立陶宛 Ekspla 公司的 THz KIT 型太赫兹时域频谱系统,工作频率范围为 0.2~3 THz,太赫兹脉冲的电压峰值为 0.13 V,脉宽为 1.0 ps。利用美国 Coherent Asia 公司 Micra-5 型飞秒激光器(重复频率为 76~82 MHz,波长为 800 nm 时输出功率大于 400 mW,脉宽小于 100 fs)作为抽运源(聚焦光斑宽度为 2 mm),测量烟支样品的时域太赫兹频谱。

3 实验结果

将相同密度、不同湿度的样品分成 3 组(每组 11 个样品);相同湿度、不同密度的样品分成 2 组(每组 14 个样品),再按上述实验步骤对每个样品进行 TDS 测试。表 1 为烟支样品重量及相应的湿度;表 2 为相对湿度分别为 12.26%、13.53% 的烟支样品密度及波谱峰值。

表 1 烟支样品重量及湿度

Table 1 Weight and humidity of cigarette samples

Sample No.	Group No.					
	1		2		3	
	Total weight /g	Humidity /%	Total weight /g	Humidity /%	Total weight /g	Humidity /%
1	1.1043	22.258	1.1251	20.780	1.1377	22.158
2	1.0959	21.663	1.1209	20.483	1.0815	18.113
3	1.0461	17.933	1.0542	15.452	1.0555	16.097
4	1.0433	17.713	1.0462	14.806	1.0435	15.132
5	1.0352	17.069	1.0456	14.757	1.0109	12.395
6	1.0047	14.552	1.0301	13.474	1.0036	11.758
7	0.9758	12.021	0.9954	10.458	0.9871	10.283
8	0.9626	10.814	0.9844	9.457	0.9713	8.800
9	0.9231	6.998	0.9667	7.799	0.9481	6.590
10	0.9000	4.611	0.9468	5.862	0.9470	6.480
11	0.8832	2.797	0.9183	2.940	0.9127	2.970

表 2 烟支密度及波谱峰值

Table 2 Density of cigarettes and spectral peak

Sample No.	Group No.			
	1		2	
	Density /($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3}$)	Peak /(V/cm)	Density /($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3}$)	Peak /(V/cm)
1	269.9207	0.0093	285.3846	0.0094
2	267.5128	0.0092	284.9702	0.0095
3	264.9401	0.0101	276.5069	0.0103
4	252.7571	0.0103	268.9291	0.0104
5	238.8169	0.0116	268.6450	0.0111
6	237.7288	0.0118	260.0269	0.0112
7	243.4333	0.0126	254.6560	0.0119
8	231.1197	0.0128	247.3050	0.0126
9	228.4985	0.0131	245.0469	0.0137
10	225.6800	0.0134	239.2115	0.0139
11	222.1194	0.0145	234.1872	0.0140
12	215.2327	0.0150	224.9150	0.0148
13	208.4259	0.0151	221.4750	0.0158
14	204.3358	0.0157	213.6179	0.0159

为了直观反映样品峰值附近时域延迟、峰值衰减与湿度间的关系,以湿度第 3 组样品为例给出波谱峰值附近时域延迟与湿度变化关系及峰值衰减量随样品湿度的变化,如图 2 所示。从图 2(a)可以看出样品太赫

兹波时域延迟时间随着湿度增加变长(时域延迟点为波形曲线和幅值为零的直线的交点);从图2(b)可知随着湿度增加样品峰值呈指数衰减趋势。

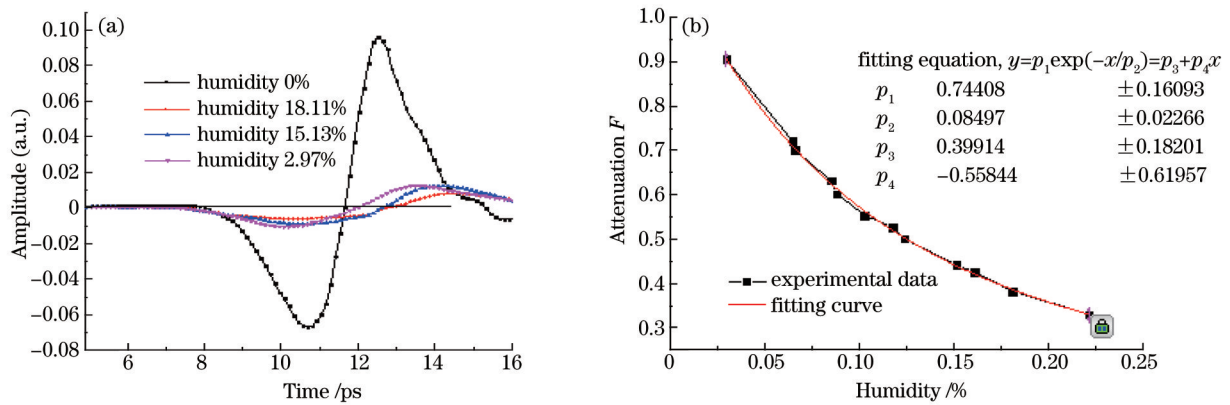


图2 烟支样品 TDS 测试及拟合结果。(a) 峰值时域延迟与湿度 x 的关系;(b) 峰值衰减 F 与湿度 x 的关系拟合曲线

Fig.2 Testing and fitting results of TDS of cigarette samples. (a) Relationship between peak delay in time-domain and humidity; (b) fitting curve between peak attenuation F and humidity

4 实验结果分析

从图2可知太赫兹频段样品的时间延迟、峰值衰减均随着湿度改变呈规律性变化。依此能否反推出样品的湿度,如果可以,可信度有多大?依据呈指数衰减的峰值建立了湿度计算模型并与目前湿度检测方法中公认最为精确的烘干比重法进行比较,需说明的是在进行误差比较前,假定烘干称重法所得结果准确无误。定义时域波形的峰值衰减为

$$E = \frac{P_{\text{Sample}}}{P_{\text{Ref}}}, \quad (3)$$

式中 P_{Sample} 和 P_{Ref} 分别为样品的时域峰值和参考波形的时域峰值,图3为衰减量 $\ln E$ 与湿度 x 的关系拟合曲线,从图中可以看出 $\ln E$ 与 x 呈线性关系且拟合方程为 $\ln E = -0.00655 - 4.63965x$,由此可以得出湿度 $x = \frac{\ln E + 0.00655}{-4.63965}$ 。

为了检验该方法的可行性,将模型计算结果和烘干称重法测量结果进行比较,得到两者绝对误差值 $\Delta x = |x_1 - x_2|$,图4为绝对误差与湿度的关系。

从图4可以看出,湿度20%以内两者的绝对误差值小于2.5%。从表2中可以看出随着烟支密度增加,太赫兹波谱峰值逐渐减小,这与实际情况相符(入射强度一定的太赫兹波,当其穿过某一物料时,物料中每一个基本单元均会对其产生吸收和色散作用,密度不同则所包含基本单元的数量不同,因而穿过物料后太赫兹透射谱强度就会有所不同),依据透射谱强度差异便可知物料密度差异。为了验证由透射谱强度探知烟支密度的可信度,以相对湿度分别为12.26%、13.53%的2个样本组共28个烟支样品的密度及透射波谱峰的结果为依据,分析其相关性,如图5所示,可以看出两者间具有较强的相关性,相关系数约为0.9639,2个样本

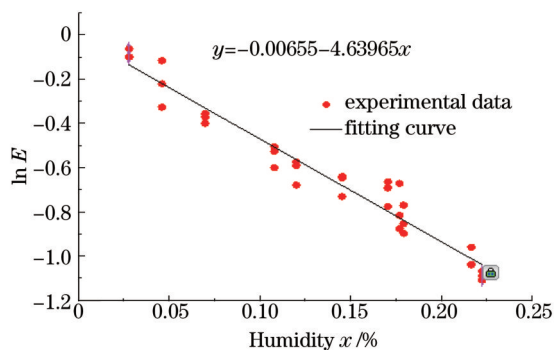


图3 衰减量 $\ln E$ 和湿度 x 的拟合曲线

Fig.3 Fitting curve of $\ln E$ and humidity x

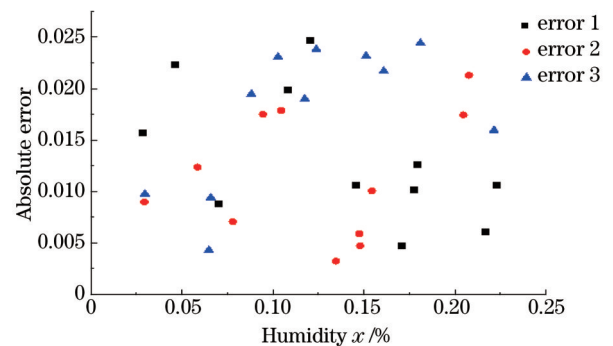


图4 绝对误差 Δx 随湿度 x 的变化曲线

Fig.4 Curve of absolute error Δx with humidity x

组的回归方程为 $y = 0.0359 - 0.0996x$ 。由此可知基于太赫兹时域波谱的烟支湿度密度检测不仅可行且具有较高的精度。

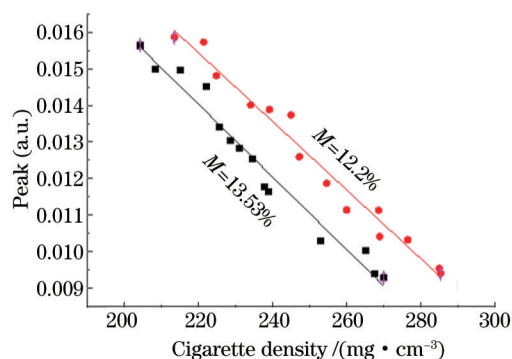


图5 烟支密度和峰值的拟合曲线

Fig.5 Fitting curve between cigarette density and spectral peak

5 结 论

利用TDS系统对烟支湿度密度进行检测,并依据所得样品的太赫兹时域波谱,建立了烟支密度与时域谱峰值间的数学表达式及基于峰值衰减量 $\ln E$ 的湿度计算模型,烟支密度与透射谱峰值间的相关性分析及湿度计算模型结果与传统烘干称重法结果的误差比较,表明太赫兹技术可为烟支湿度密度检测提供一种新的方法,相关结论和模型仅在一种烟支样品检测基础上得到,对于不同产区的烟支,由于组成成分存在差异,即便在相同湿度情况下,其曲线也可能存在差异,要想将这种方法投入实际应用,还需要开展大量相关工作来完善,如采集更多种类烟支的太赫兹参数,建立实用快速便捷的太赫兹测量方法,开发便携、高可靠性、低成本的太赫兹频谱仪等。

参 考 文 献

- 1 Wolf F A. Tobacco Disease and Decays[M]. Durham: Duke University Press, 1957: 268-279.
- 2 Yu Xiaofang. Tobacco Product Maintenance[M]. Changsha: Hunan Science & Technology Press, 1995: 5-247.
余校芳. 烟草商品养护[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1995: 5-247.
- 3 Jin Wenbo, Liu Xiangchun, Mao Changxing, *et al.*. Cigarette Transportation Science[M]. Beijing: China Light Industry Press, 1994: 69-307.
金闻博, 刘祥春, 毛长兴, 等. 卷烟储运学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1994: 69-307.
- 4 State Tobacco Monopoly Administration. Cigarette Process Specifications[M]. Beijing: Central Literary Contributions Publishing Bureau, 2003: 4.
国家烟草专卖局. 卷烟工艺规范[M]. 北京: 中央文献出版社, 2003: 4.
- 5 Chen Liangyuan. Cigarette Process[M]. Zhengzhou: Henan Science and Technology Press, 1996.
陈良元. 卷烟加工工艺[M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 1996.
- 6 Luo Dengshan, Yao Guangming, Liu Zhaoxian. Discussion on process technology in Chinese type cigarette production[J]. Tobacco Science & Technology, 2005, (5): 4-8.
罗登山, 姚光明, 刘朝贤. 中式卷烟加工工艺技术探讨[J]. 烟草科技, 2005, (5): 4-8.
- 7 Viart P, Flesselles J. Factorial experiment on the determination of the moisture content of a cut tobacco treated with a wetting agent[C]. annales SEITA, 1979, 8: 165-194.
- 8 Bartkovicz I. Studies on the casing and drying of cigarette tobacco[J]. Tyton, 1964, 1(2): 78-85.
- 9 Jin Aoxi, Huang Shaoh. Studies on some hygroscopic properties of several Chinese tobacco[J]. Tobacco Science, 1990, (1): 50-60.
金熬熙, 黄绍和. 几种中国烟叶某些吸湿特性的研究[J]. 烟草学刊, 1990, (1): 50-60.
- 10 Li Wenquan, Qi Liqin. The application of near-infrared technology in tobacco production[J]. Popular Standardization, 2008, S2: 49-51.
李文泉, 齐丽琴. 近红外技术在烟草生产中的应用[J]. 大众标准化, 2008, S2: 49-51.
- 11 Wu Zhigang. On Line Microwave Resonator Measuring Systems for Cigarette's Density/Moisture Content[D]. Xi'an: Xidian

- University, 2005.
- 吴志刚. 在线烟支密度/湿度微波谐振腔检测系统[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2005.
- 12 Zhang Jimin. Engineering practice for realization of cigarette humidity and density measure by microwave technology[J]. *Electronic Instrumentation Customer*, 2008, 15(4): 66–67.
- 张济民. 微波技术实现烟支湿密度测量的工程实践[J]. *仪器仪表用户*, 2008, 15(4): 66–67.
- 13 Sun Zhenlong, Tu Xuecou, Jiang Yi, *et al.*. Fast imaging system based on self-made terahertz detector[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(8): 0811002.
- 孙振龙, 涂学凑, 姜奕, 等. 基于自制太赫兹检测器的快速成像系统[J]. *中国激光*, 2014, 41(8): 0811002.
- 14 Wang Dayong, Huang Haochong, Zhou Xun, *et al.*. Phase-contrast imaging by the continuous-wave terahertz in-line digital holography[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(8): 0809003.
- 王大勇, 黄昊翀, 周逊, 等. 连续太赫兹波同轴数字全息相衬成像[J]. *中国激光*, 2014, 41(8): 0809003.
- 15 Jordens C, Wietzke S, Scheller M, *et al.*. Investigation of the water absorption in polyamide and wood plastic composite by terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Polymer Testing*, 2010, 29(2): 209–215.
- 16 He Quanhua, Jia Dagong, Zhang Hongxia, *et al.*. Study on ratio demodulation for ammonia concentration measurement based on THz-TDS[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(9): 0915002.
- 何全华, 贾大功, 张红霞, 等. 基于太赫兹时域光谱技术比例法解调氨气浓度的研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(9): 0915002.
- 17 Shen Fei, Ying Yibin. Applications of terahertz spectroscopy and imaging techniques in food safety inspection[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(6): 1445–1449.
- 沈飞, 应义斌. 太赫兹光谱和成像技术在食品安全检测中的应用[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(6): 1445–1449.
- 18 Yan Zhanke, Zhang Hongjian, Ying Yibin. Research progress of terahertz wave technology in quality measurement of food and agricultural products[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2007, 27(11): 2228–2234.
- 闫战科, 张宏建, 应义斌. THz技术在农产品/食品品质检测中的应用[J]. *光谱学与光谱分析*, 2007, 27(11): 2228–2234.
- 19 Xia Jiabin, Fan Chengfa, Wang Kejia, *et al.*. Soil moisture measurement based on terahertz transmission spectrum[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(2): 023001.
- 夏佳欣, 范成发, 王可嘉, 等. 基于太赫兹透射谱的土壤含水量测量[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(2): 023001.
- 20 Zheng Xianhua, Wang Xinke, Sun Wenfeng, *et al.*. Developments and applications of the terahertz digital holography[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0209003.
- 郑显华, 王新柯, 孙文峰, 等. 太赫兹数字全息术的研发与应用[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0209003.
- 21 Li Qi, Hu Jiaqi. Reconstruction study on terahertz on-axis digital holography of small target at different lateral positions [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(12): 1209001.
- 李琦, 胡佳琦. 不同横向位置的小目标太赫兹同轴数字全息再现研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(12): 1209001.
- 22 Zhang X C, Xu J Z. Introduction to THz Wave Photonics[M]. Berlin: Springer, 2010: 27–70.

栏目编辑: 吴秀娟