2018年4月 Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

## 文章编号: 2095-4980(2018)02-0212-06

## 基于太赫兹透射谱的中药材特征提取方案

赵 峰<sup>1,2</sup>,李静玲<sup>2</sup>,袁敏杰<sup>3</sup>,叶佳声<sup>3</sup>,张 岩<sup>3</sup>,忻向军<sup>1</sup>

(1.北京邮电大学 电子工程学院,北京 100876; 2.西安邮电大学 理学院,陕西 西安 710121;3.首都师范大学 物理系,北京 100048)

摘 要:太赫兹时域光谱技术可以为中药材鉴别与研究提供新方法。中药材对透射的太赫兹 光波没有明显的特征吸收谱线,但太赫兹光波与中药材物质的作用机理表现为一个与中药材种类 及厚度有关的太赫兹光波低通滤波器。针对制备的中药材样品厚度很难标准化,提出中药材样品 厚度归一化数据处理方案。利用不同厚度样品的太赫兹透射光波电场强度采样数据,拟合出标准 厚度(1 mm)中药材样品的太赫兹透射光波电场强度数据,进而计算出每种标准厚度样品对应的中药 材低通滤波器的 3 个参数(α,β,γ),实验结果证明了方案的可行性,可以用来区分中药材的种类。 关键词:归一化;低通滤波器;中药材指纹数据;优化

中图分类号:TN25 文献标志码:A doi: 10.11805/TKYDA201802.0212

# Optimization analysis of characteristic data extraction scheme from Chinese herbal medicines with terahertz spectrum

ZHAO Feng<sup>1,2</sup>, LI Jingling<sup>2</sup>, YUAN Minjie<sup>3</sup>, YE Jiasheng<sup>3</sup>, ZHANG Yan<sup>3</sup>, XIN Xiangjun<sup>1</sup>
(1.School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;
2.School of Science, Xi'an University of Posts & Telecommunications, Xi'an Shaanxi 710121, China;
3.Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: Terahertz time-domain spectroscopy technology(THz-TDS) provides a new method for the identification and study of Chinese herbal medicines. Although the experimental data of electric field intensity indicates that the Chinese herbal samples have no obvious characteristic of spectrum absorption to transmitted terahertz wave, nevertheless, it behaves like a terahertz filter having dependence on the sample's type and thickness of Chinese herbal medicines. Because it is difficult to prepare a standard thickness of the Chinese herbal medicine sample, a sample thickness normalization scheme which utilizes the data of electric field intensity of the transmitted terahertz wave in the samples with different thicknesses is proposed. Then the electric field intensity data of the transmitted terahertz wave in the standard thickness (1 mm) samples are calculated. And then three parameters( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) of each Chinese herbal medicine sample with the standard thickness corresponded low-pass filter are calculated. The experimental results show that the proposed scheme is feasible and can be applied to distinguish the types of Chinese herbal medicines.

Keywords: normalization; low-pass filter; Chinese herbs fingerprint data; optimization

太赫兹频谱区域聚集了无数的频谱特征,这些谱特征与基本的物理过程,如分子的转动跃迁、有机化合物的 大振幅振动、固体的晶格振动、半导体的带内跃迁、超导体的能带带隙等相关。利用太赫兹光波扫描技术对被测 材料进行时间分辨,当频率小于 3 THz 时,从材料透射或反射的太赫兹光波信号的信噪比远高于傅里叶红外光谱 技术中的信号信噪比<sup>[1-3]</sup>。同时,太赫兹辐射光子能量很低,不会对生物组织产生有害的光致电离,可利用太赫 兹光波对有机物质做无损检测。近 10 年来,太赫兹光波电场强度采样技术在药物成分探测、异构体区分,混合 物定性定量分析等多个方面已取得一些初步的研究成果<sup>[4-10]</sup>。 由于原始中药材成份比较复杂,其中有机物大分子电偶极矩的振动能级跃迁对应频率位于红外波段,一部分转(摆)动能级跃迁对应频率位于太赫兹波段。实验结果表明<sup>[4]</sup>,固态中药样品中的有机大分子电偶极矩在太赫兹 光波的电场中,不会出现振动能级跃迁与明显的转动能级跃迁,主要表现出电偶极矩小角度阻尼摆动的特征,太 赫兹光波与中药材大分子的电偶极矩体系间存在能量交换。换言之,透过中药材样品的太赫兹光波携带了中药样 品的电偶极矩强度及分布信息,即,透过中药样品的太赫兹光波不同程度地携带了中药样品的分子结构及成份信 息。测量中药样品的透射太赫兹波电场强度,有可能鉴别与分析中药材样品中有机物质的分子组成特征<sup>[8]</sup>。

文献[4]表明,透过中药材样品的太赫兹光波没有随中药样品不同而呈现明显的吸收频率特征,各种中药材的透射太赫兹光波电场强度时域波形极其相似,其频谱也高度相似,但却有随中药种类不同而明显变化的"阻尼振子模型"参数与太赫兹中药材滤波曲线。实验发现<sup>[4]</sup>:透过中药样品的太赫兹光波电场强度随样品厚度的增加而减弱。但由于实验技术的限制,对于不同种类的药材,很难制作出相同厚度的中药样品,这给利用太赫兹光波电场强度采样实验与"阻尼振子模型"参数来区分中药材品种带来了困难。鉴于目前实验上很难做出各种中药材的统一厚度的样品,只有很好地解决了任意厚度中药材样品太赫兹光波实验数据的归一化问题,文献[4]提出的中药材"阻尼振子模型"方法才能取得比较可靠的中药材指纹数据。

#### 1 样品厚度归一化方案

在中药材样品太赫兹光波电场强度采样实验中发现,透过中药样品的太赫兹光波强度随样品厚度呈指数衰减,透射光波时域波峰时间位置相对于入射光波时域波峰时间位置(或相位延迟)随厚度增加而线性增加。为了解决中药材样品太赫兹光谱实验数据归一化问题(即,每种中药材样品太赫兹光谱实验数据统一转换为 1 mm 等效 厚度样品的太赫兹光谱实验数据),提出了中药太赫兹光波实验数据归一化方案,其步骤如下:

1) 对每一种中药材至少制备 5 种等密度且不同厚度的样品,制备不同厚度样品时确保研磨的颗粒物粒径一致,加压力一致。

2)每一厚度的中药材样品太赫兹透射光波电场强度采样实验重复3次取其平均值,入射光波电场强度采样实验做1次。得到每种中药材的5个不同厚度样品的透射太赫兹光波电场强度采样实验数据与入射太赫兹光波电场强度采样实验数据。

3) 利用 5 种不同厚度药材样品的 *T*(*d*)数据拟合出太赫兹光波电场时域波峰位置随样品厚度增加而增加的延时规律 *t<sub>d</sub>*(*d*), 拟合计算出透过 1 mm 厚度样品对应的延迟时间 *t<sub>u</sub>*(以采样周期 *T<sub>s</sub>*为单位)。

4) 利用 5 种不同厚度药材样品的 K(d)数据拟合出太赫兹光波电场时域波峰值随样品厚度增加而衰减的规律 k<sub>d</sub>(d), 计算出透过 1 mm 厚度样品对应的波峰衰减比 k<sub>u</sub>。

5) 从实验采样数据中取出最接近 1 mm 厚度样品的太赫兹透射光波电场强度数据,记为"data",其数据格式为:{(t<sub>0</sub>,e<sub>0</sub>),(t<sub>1</sub>,e<sub>1</sub>),…(t<sub>351</sub>,e<sub>351</sub>)},t<sub>i</sub>为延迟时间,e<sub>i</sub>为该时刻的透射光波电场强度。设其时域波峰延迟时间为t<sub>m</sub>(以采样周期 T<sub>S</sub>为单位),透射光波(相对于入射光波)时域峰值衰减比为k<sub>m</sub>,计算出归一化数据平移量 n=t<sub>u</sub>-t<sub>m</sub>与归一化数据放大倍数 k=k<sub>u</sub>/k<sub>m</sub>。如果 n>0,将"data"中的光波电场强度采样数据{(t<sub>0</sub>,e<sub>0</sub>),(t<sub>1</sub>,e<sub>1</sub>),…(t<sub>351</sub>,e<sub>351</sub>)}沿时间轴正方向移动 n 个位置(即丢弃前n个时间采样数据与后n个电场强度采样数据),如果 n<0,则向时间轴负方向移动 |n| 个位置(即丢弃后 |n| 个时间采样数据与前 |n| 个电场强度采样数据)。移动结束产生的数据记为"datas"。再给"datas" 中的每一个光波电场强度采样数据乘 k,记为"datask"。把"datask"数据称为 1 mm 厚度中药样品的太赫兹光波电场强度归一化采样数据。

最后,每种中药材只保留归一化厚度样品(1 mm)的太赫兹入射光波电场强度采样点数据与透射光波电场强度 采样点数据。用它们来计算对应中药样品的阻尼谐振子型滤波器参数。

#### 2 实验

表1为秦巴山区所产的药材,实验室制备出4种中药 材不同厚度的样品。对半夏、党参、三七、猪苓4种中药 材烘干研磨后利用 300 目的筛网进行分选后的颗粒物作为 样品原料。然后,将定量的样品原料放入直径13 mm 的压 片机模具中,缓慢加压,最后利用 80 kN 的恒压力稳定一 段时间,确保药品充分压实。缓缓降低压力,取出样品压

1	長1 4种中药材实验样品的厚度(mm)
Table1 Samp	ple thickness of four kinds of Chinese herbs(mm)

			thickness		
sample	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$
pinellia ternata	0.994	1.223	1.311	2.077	2.999
codonopsis	0.941	1.517	1.977	2.925	3.887
pseudo-ginseng	0.851	1.054	1.292	1.945	2.882
grifola	0.847	1.115	1.507	2.122	3.081

片,装袋保存并作好标记。

图 1 为首都师范大学太赫兹光电子学教育部重点实验 室购置的太赫兹光谱仪(TDS-1008, BATOP),利用该仪器 对表 1 中制备的中药材样品进行测试,对每一厚度的中药 材样品太赫兹透射光波电场强度采样实验重复 3 次,采集 3×352 个光波电场强度数据和 352 个时间数据。然后对每 一厚度的中药材样品太赫兹透射光波电场强度时域采样数 据取 3 次实验平均值。入射光波电场强度采样实验做 1 次, 得到 352 个入射太赫兹光波电场强度数据和 352 个时间数据。



Fig.1 Terahertz time domain spectrometer 图 1 太赫兹时域光谱仪

依据实验数据归一化处理方案步骤 3)~5),用 Mathematica 编程计算得到 4 种药材共计 20 个样品的波峰时间

延迟数据 T(d)与衰减比 K(d),分别在表 2 与表 3 中列出。其中,表 2 中前 5 行数据为 4 种中药材 样品的 20 个透射太赫兹光波电场强度时域波峰 位置相对入射光波的时间延迟 T(d),第 6 行数据 是拟合计算得到 1 mm 厚度样品的透射太赫兹 光波电场强度波峰位置(相对入射太赫兹光波) 的时间延迟 t<sub>u</sub>。表 3 中前 5 行数据为 4 种中药材 样品的 20 个对应透射太赫兹光波电场强度时域 波峰值相对入射太赫兹光波电场强度波峰值的 衰减比 K(d),第 6 行数据是拟合计算得到 1 mm 厚度样品的透射太赫兹光波电场强度波峰值(相 对入射太赫兹光波)衰减比 k<sub>u</sub>。

表2 4种不同厚度中药材样品的透射太赫兹光波电场强度时域波峰位置时 间延迟

Table2 Wave crest time delay between the incident and the transmitted Terahertz waves in four kinds of Chinese herbs with different thicknesses

pinellia ternata		codonopsis		pseudo-ginseng		grifola	
<i>d</i> /mm	T(d)/ps	d/mm	T(d)/ps	<i>d</i> /mm	T(d)/ps	<i>d</i> /mm	T(d)/ps
0.994	2.700	0.941	2.200	0.851	2.200	0.847	1.900
1.223	3.200	1.517	3.800	1.054	3.000	1.115	2.500
1.311	3.500	1.977	4.700	1.292	3.400	1.507	3.500
2.077	5.600	2.925	7.100	1.945	5.600	2.122	5.400
2.999	8.400	3.887	9.300	2.882	8.300	3.081	8.000
1.000	2.700	1.000	2.400	1.000	2.800	1.000	2.400

表34种不同厚度中药样品的透射太赫兹光波电场强度时域波峰值相对入射光波的衰减比

Table3 Wave crest attenuation rate between the incident and the transmitted Terahertz waves under different thicknesses of four kinds of Chinese herbs samples

pinellia	pinellia ternata codonopsis pseudo-ginseng		ginseng	grifola			
d/mm	K(d)	<i>d</i> /mm	T(d)/ps	<i>d</i> /mm	T(d)/ps	<i>d</i> /mm	T(d)/ps
0.994 000	0.512 425	0.941 000	0.634 957	0.851 000	0.593 022	0.847 000	0.572 590
1.223 000	0.456 263	1.517 000	0.488 110	1.054 000	0.532 744	1.115 000	0.486 980
1.311 000	0.416 398	1.977 000	0.400 474	1.292 000	0.487 575	1.507 000	0.405 343
2.077 000	0.251 118	2.925 000	0.276 213	1.945 000	0.323 854	2.122 000	0.258 221
2.999 000	0.159 429	3.887 000	0.182 936	2.882 000	0.217 305	3.081 000	0.163 781
1.000 000	0.519 134	1.000 000	0.629 891	1.000 000	0.562 026	1.000 000	0.533 749





Fig.2 Experimental data and fitting curve of wave crest time delay between the incident and the transmitted Terahertz waves under different thicknesses of four kinds of Chinese herbs samples

图 2 4 种中药材样品的透射太赫兹光波电场强度峰值位置延迟时间随厚度变化的实验数据点及拟合曲线

图 3 为根据表 3 的数据,对每一种中药的透射太赫兹光波电场强度峰值比随厚度衰减的实验数据点做数据拟 合,得到的实验数据点图与拟合曲线图。

依据厚度归一化方案步骤 6),分别对上述数据的波峰延迟、波峰值衰减比、归一化平移量及放大倍数进行数据处理,数据列于表 4。与此同时,每种中药材只保留归一化厚度样品(1 mm)的 320 个太赫兹入射光波电场

强度采样点数据和 320 个太赫兹透射光波电场强度采 样点数据。用它们来计算对应中药样品的阻尼谐振子型 滤波器参数。如表 4 所示,从 20 组中药样品透射太赫 兹光波实验数据中,选择样品厚度接近于 1 mm 的 4 组 数据。

对中药材样品太赫兹光波实验数据归一化处理后, 得到4种中药的太赫兹光波实验数据,图4为入射光波 电场强度时域波形与透射太赫兹光波时域波形。从图4 可以看出 4种中药林太赫兹透射光波时域波形极其相 表4 最终选择的4种中药材样品太赫兹光谱实验数据 Table4 Selected experimental data of four kinds of Chinese herbs

samples					
sample	<i>d</i> /mm	T(d)/ps	K(d)	n	k
pinellia ternata	0.994	2.7	0.512 425	0	1.013 090
codonopsis	0.941	2.2	0.634 957	2	0.992 022
pseudo-ginseng	1.054	3.0	0.532 744	-2	1.054 96
grifola	1.115	2.5	0.486 980	-1	1.096 040

可以看出,4种中药材太赫兹透射光波时域波形极其相似,直接从时域波特征来区分中药种类几乎不可能。



Fig.3 Experimental data and fitting curve of wave crest attenuation rate between the incident and the transmitted Terahertz waves under different thicknesses of four kinds of Chinese herbs samples

图 34 种中药材样品的透射太赫兹光波电场强度峰值比随厚度衰减规律实验数据点及拟合曲线



Fig.4 Incident and the normalized transmitted terahertz time-domain waveforms for four kinds of Chinese herbs samples 图 4 4 种中药样品入射与归一化透射太赫兹光波波形

### 3 中药阻尼振子型太赫兹光波滤波器参数计算

图 5 为 4 种中药材样品入射及透射太赫兹光波幅频特性杆图,4 种中药样品透射太赫兹光波频谱相似度也很高,这意味着用中药样品透射太赫兹光波频谱来区分中药材种类也很困难。



图 54 种中药材样品入射及透射太赫兹光波幅频特性杆图

鉴于此,文献[4]提出了中药材太赫兹光波低通滤波器模型,可用 3 参数(α,β,γ)的二阶阻尼振子模型来描述每 一种中药材的太赫兹光波低通滤波器的特征,其二阶阻尼振子相应微分方程为:

 $y''(t) + 2\pi\alpha y'(t) + (2\pi\beta)^2 y(t) = 4\pi^2 \gamma u_s(t)$ (1)

式中: y(t)是振子系统(即中药材样品)的输出光波信号的电场强度(即从中药材样品透射出来的太赫兹光波电场强 度信号); u<sub>s</sub>(t)是振子系统的输入光波电场强度信号(即入射到中药材样品上的太赫兹光波电场强度信号)。不同中 药材滤波器对应的阻尼系数 α、固有频率 β、放大系数 γ 各不相同。依据式(1)导出中药材太赫兹光波低通滤波器 对应的频域系统函数(其中 i 为虚数单位)为:

$$H(f) = \frac{\gamma}{\beta^2 - f^2 - i\alpha f}$$
(2)  
$$H(f) = \frac{\gamma}{\sqrt{\gamma}}$$
(3)

$$|H(f)| = \frac{\gamma}{\sqrt{(\beta^2 - f^2)^2 + (\alpha f)^2}}$$
(

根据图 5 中 4 种中药材样品入射及透射太赫兹光波幅 频特性杆图数据,编程做阻尼振子模型拟合分析,得到 4 种中药材对应滤波曲线图。图 6 为 4 种中药材样品太赫兹 滤波器幅频特性曲线图。表 5 为 4 种中药材滤波器对应的

表5 4种中药材样品太赫兹滤波器参数 Table5 Terahertz filter parameters of four kinds of Chinese herbs samples

sample	α	β	γ
pinellia ternata	0.573 765	0.440 477	0.059 230 3
codonopsis	0.602 890	0.473 579	0.078 897 3
pseudo-ginseng	0.582 865	0.431 037	0.066 022 5
grifola	0.586 974	0.453 079	0.047 367 5

阻尼系数 α、固有频率 β、放大系数 γ,即,4种中药材的指纹数据。



 Fig.6 Amplitude-frequency characteristic curves of terahertz filter for four kinds of Chinese herbs samples

 图 6 4 种中药材样品太赫兹滤波器幅频特性曲线

如表 5 实验数据所示,可以用中药材的阻尼振子型滤波器参数(α,β,γ)作为区分中药材种类的指纹数据。除此 之外,还可用中药材透射太赫兹光波电场强度衰减系数与时域波峰相对延迟时间来区分中药材种类。半夏、党参、 三七、猪苓的透射太赫兹光波电场强度随样品厚度增加而指数式衰减的函数关系 *A*(*d*)及透射波峰值相对延迟时间 函数关系 *T*(*d*)分别为:

samples

pinellia ternata

codonopsis

pseudo-ginseng

grifola

$$A(d) = A_0 e^{-\mu d}$$
(4)  

$$T(d) = T_0 + \sigma d$$
(5)

式中: *A*<sub>0</sub> 表示入射到样品的光波电场强度; μ 表示随厚度的衰减系数; *T*<sub>0</sub> 表示入射到样品时的参考时间; σ 表示随厚度的延时系数。由图 2 与图 3 实验数据,可以计算出式(4)与式(5)中的系数,经过数据拟合,表 6 给出了 4 种不同中药材样品的太赫兹光波衰减系数及延时系数。

如表 6 所示,不同种类的中药材有明显不同的衰减系数 与延时系数,用它们来区分中药材种类也是可行的。

图 7 为 4 种中药滤波器幅频特性曲线比较,4 种中药材 滤波器对应的频域系统函数 H(f)存在明显差别,这4 种中药 材对应的太赫兹光波低通滤波器曲线明显可以区分,尽管它 们的透射光波频谱十分相似,这说明用低通滤波器模型作为 中药指纹数据是可行的。

#### 4 结论

原始中药材成份极为复杂,且实验上无法观测到明显的

太赫兹频谱吸收谱特征。研究发现太赫兹光波与中药大分子的电偶极矩体系间存在能量交换,透过中药材样品的 太赫兹光波携带了中药样品的电偶极矩强度及分布信息,因此,通过测量中药样品的透射太赫兹波电场强度,有 可能鉴别与分析中药材样品中有机物质的分子组成特征。实验发现,透过中药样品的太赫兹光波强度随样品厚度 呈指数衰减,透射光波时域波峰时间位置相对于入射光波时域波峰时间位置(或相位延迟)随厚度增加而线性增 加,但由于实验技术的限制,很难制备出标准厚度的中药样品,依赖中药样品厚度的滤波器3参数来区分中药品 种是没有意义的。这给利用太赫兹光波电场强度采样实验与"阻尼振子模型"参数来区分中药材品种带来了困难。 深入研究后,提出了中药太赫兹光波实验数据归一化方案,利用该方法对每种中药材样品的厚度进行归一化

0.35 0.25 0.15 0.05

 $T_0$ 

-0.107 081

0.0141 688

-0.141 510

-0.256 149

σ

2.794 340

2.401 970

2,909,900

2.633 400

2.0

表6 4种中药材样品对太赫兹光波随厚度的衰减系数及延时系数 Table6 Attenuation coefficient and delay coefficient of terahertz wave in the

μ

0.652 250

0.453 117

0 566 199

0.620 981

four kinds of Chinese herbs samples

 $A_0$ 

0.996 662

0.990 950

0 990 042

0.993 176



1.0

∬THz

0.5

处理,得到归一化厚度样品(1 mm)的 320 个太赫兹入射光波电场强度采样点数据和 320 个太赫兹透射光波电场强 度采样点数据。根据归一化数据计算出每种中药材标准厚度样品对应的中药材低通滤波器的 3 参数(α,β,γ)。数据 分析发现,每种中药材都有唯一确定的滤波器参数(α,β,γ),这 3 个参数(也即中药指纹数据)可以用来区分不同种 类的中药材。同时,表 6 中的数据显示,不同种类的中药材有明显不同的衰减系数与延时系数,用它们来区分中 药材种类也是可行的。此外,图 7 数据表明,4 种中药材的中药材滤波器对应的频域系统函数*H*(*f*)存在明显差别。

综上结果表明,通过实验归一化数据处理后,用低通滤波器模型作为中药指纹数据有更可靠的可比性与区分 度,该研究工作可以为中药材的标准认证及中药材标准化寻找一种新的途径与方法。

#### 参考文献:

- [1] ZHANG Xicheng, XU Jingzhou. Introduction to THz wave photonics [M]. New York: Springer-Verlag, 2009.
- [2] 孙雅茹,史同璐,刘建军,等.太赫兹超材料类 EIT 谐振无标记生物传感[J]. 光学学报, 2016,36(3):261-266. (SUN Yaru, SHI Tonglu,LIU Jianjun, et al. Terahertz label-free bio-sensing with EIT-like metamaterials[J]. Acta Optica Sinica, 2016,36(3): 261-266.)
- [3] 张文涛,王思远,占平平,等. 基于太赫兹时域光谱技术的红木检测方法[J]. 光学学报, 2017,37(2):341-347. (ZHANG Wentao, WANG Siyuan, ZHAN Pingping, et al. Method of identifying red wood based on THz time-domain spectroscopy[J]. Acta Optica Sinica, 2017,37(2):341-347.)
- [4] 赵峰,龙姝明,张圆圆,等. 太赫兹电磁波低通滤波器与中药材指纹数据提取[J]. 物理学报, 2015,64(2):119-125. (ZHAO Feng,LONG Shuming,ZHANG Yuanyuan, et al. Fingerprint data extraction from Chinese herbal medicines with terahertz spectrum based on second-order harmonic oscillator model[J]. Acta Physics Sinica, 2015,64(2):119-125.)
- [5] 钟毅伟,沈韬,毛存礼,等.核优化相关向量机太赫兹频谱特征提取方法[J].光谱学与光谱分析, 2016,36(12):3857-3862.
   (ZHONG Yiwei,SHEN Tao,MAO Cunli, et al. Terahertz spectrum features extraction based on kernel optimization relevance vector machine[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016,36(12):3857-3862.)
- [6] 汪景荣,张卓勇,张振伟,等. 偏最小二乘法和 THz-TDS 在正品大黄鉴别中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2016,36(2):
   316-321. (WANG Jingrong, ZHANG Zhuoyong, ZHANG Zhenwei, et al. Identification of official rhubrab samples by using PLS and terahertz time-domain spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016,36(2):316-321.)
- [7] 代秀松,赵振宇,何晓勇,等. CaCu\_3Ti\_40\_(12)陶瓷在太赫兹频段的介电特性研究[J]. 光学学报, 2015,35(5):279-284.
   (DAI Xiusong,ZHAO Zhenyu,HE Xiaoyong,et al. Terahertz dielectric properties of CaCu\_3Ti\_40\_(12) ceramics[J]. Acta Optica Sinica, 2015,35(5):279-284.)
- [8] 邓玉强,孙青,于靖,等. 太赫兹辐射功率计量研究进展与国际比对[J]. 中国激光, 2017,44(3):270-278. (DENG Yuqiang, SUN Qing,YU Jing,et al. Progress of terahertz radiomentry and international comparison[J]. Chinese Journal of Laser, 2017,44(3):270-278.)
- [9] 王文爱,刘维,杨茜,等. 无水葡萄糖的太赫兹时域光谱特性[J]. 中国激光, 2016,43(11):235-242. (WANG Wenai,LIU Wei,YANG Xi,et al.Terahertz time-domain spectroscopy of anhydrous clucose[J]. Chinese Journal of Laser, 2016,43(11): 235-242.)
- [10] 马品,杨玉平.运用太赫兹光谱技术检测天麻中的水分含量[J].太赫兹科学与电子信息学报, 2017,15(1):26-29. (MA Ping, YANG Yuping. Determination of moisture content of Gastrodia elata BI by terahertz spectroscopy[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017,15(1):26-29.)

#### 作者简介:



**赵** 峰(1979-),男,陕西省安康市人,主要研究方向为光学信号传输与处理.email: hfengzhao@126.com.

**叶佳声**(1979-),男,安徽省太湖县人,博士,教授,主 要研究方向为微纳光电子学、超材料与器件. **李静玲**(1979-),女,陕西省安康市人,硕士, 讲师,主要研究方向为光通信与信息处理.

**袁敏杰**(1991-),女,四川省绵阳市人,硕士, 讲师,主要研究方向为太赫兹波谱成像.

张 岩(1979-),男,陕西省韩城市人,博士, 教授,主要研究方向为太赫兹波谱成像、微纳光学 器件设计、光学数字全息等.

**忻向军**(1969-),男,河北省张家口市人,博士,教授,主要研究方向为光通信.