

# PMI 泡沫的太赫兹无损检测研究

杨帆, 谢声益

(重庆大学电气工程学院, 重庆市 400044)

摘要: 聚甲基丙烯酸酯亚胺(Polyme thacry limide, PMI)泡沫是一种先进的泡沫芯材, 其具有诸多的优秀特性, 在多个高科技领域的重要部件都得到了广泛的应用。然而, 在生产、服役过程中, 泡沫芯材结构难免会出现各种缺陷。太赫兹时域光谱(THz-TDS)技术是利用太赫兹脉冲电磁波来反映物质性质的一种新型光谱技术, 太赫兹辐射对泡沫材料具有半透明性, 因而其在该类材料的检测当中具有巨大潜力。本文以 PMI 泡沫为检测对象, 组建了太赫兹时域光谱系统, 以太赫兹技术在 PMI 泡沫无损探测中的效果。本文的研究可以为先进泡沫芯材的无损检测提供一种新的方法。

关键词: 太赫兹; 太赫兹时域光谱; PMI 泡沫; 无损检测

中图分类号: TM931

## Nondestructive Testing of PMI Foam Based on Terahertz Imaging Technology

YANG Fan, XIE Shengyi

(School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044)

Abstract: Polyme thacry limide (PMI) foam is an advanced foam core. It has many excellent properties and has been widely used in many high-tech fields. However, in the course of production and service, there will inevitably be various defects in the structure of foam core. Terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS) is a new type of spectral technology which reflects terahertz pulse waves to reflect the properties of materials. Terahertz radiation has a translucency for foam materials, so it has great potential in the detection of such materials. In this paper, a terahertz time-domain spectroscopy system is built with PMI foam as the testing object, and the effect of terahertz technology in PMI foam nondestructive detection is established. The research in this paper can provide a new method for nondestructive testing of advanced foam core.

Key words: Terahertz; Terahertz Time-Domain Spectrum; PMI; Nondestructive testing

## 0 引言

聚甲基丙烯酸酯亚胺 (PMI) 泡沫复合材料具备轻质高强度、耐热性能良好等诸多的优良特性, 并且易于加工、可塑性强, 能够满足诸多实际应用环境的要求<sup>[1,2]</sup>。并已被广泛地运用于航空航天<sup>[3-5]</sup>、雷达天线外罩、CT 医疗床板、高速列车以及军工船舶等多个领域。PMI 泡沫作为目前同等密度条件下最硬的结构材料<sup>[6]</sup>, 具有极大的应用价值和研究意义。

随着 PMI 泡沫材料的广泛应用, 其质量控制与无损检测的需求也日渐增加<sup>[7]</sup>。太赫兹时域光谱技术是一种新型的成像检测技术, 与电磁波谱中的其他频段电磁波相比, 太赫兹波具有散射相对较小、分辨率较高、安全能量低以及对多数介电材料具有较大透明性等特点。因而其可以对泡沫芯材中的微小缺陷进行诊断检测, 评估泡沫材料的涂覆质量与工作状态。着使得 THz-TDS 技术在无损检测方面, 能够与傅里叶变换红外光谱技术和 X-Ray 射线检测技术互补。

太赫兹 (THz) 波一般是指频率范围在 0.1~10THz 内的电磁波<sup>[8,9]</sup>, 其介于微波和红外之间。近年来, 随着新材料和新技术的发展, 以及制造工艺的提升, 太赫兹技术也越发地完

作者简介: 杨帆(1980-), 男, 教授、博导, 主要研究方向: 电磁计算. E-mail: yangfan@cqu.edu.cn

45 善和成熟，现已应用于质量检测、公共安全等多个领域。太赫兹波对大多数绝缘介质材料都有较高的透过率，利用太赫兹技术可以较为方便地检测出材料中的杂质、空隙等缺陷。David Zimdars 和 J.A Valdmanis 等人在 2005 年对航天绝缘泡沫进行了太赫兹无损检测<sup>[10]</sup>，并取得较好的成像效果；Nishimura Nobuaki、Gorenflo Stefan 以及 Geunju Kim 等人使用太赫兹时域光谱仪对绝缘油进行质量检测<sup>[11]</sup>，分析了绝缘油中的氧化问题，并确定了油中的含水量。作为一种新型的无损检测手段，太赫兹时域光谱技术测量的是太赫兹电磁波随时间的变化规律，而不仅仅是单点的强度或者相位，在太赫兹时域信号数据中包含有丰富的光谱信息，因此太赫兹成像技术不仅能够对目标物体的轮廓进行分辨，而且基于太赫兹时域光谱信号，可以提取出物质的特性指纹谱，从而反映出物质本身的固有属性，进而可以对目标样品的组成成分进行分析。

55 本文以人工内置缺陷的 PMI 泡沫为研究对象，详细研究了太赫兹时域光谱成像技术在泡沫芯材无损检测当中的应用，并通过分析测试数据，计算了 PMI 泡沫的折射率、介电常数等物理参数。

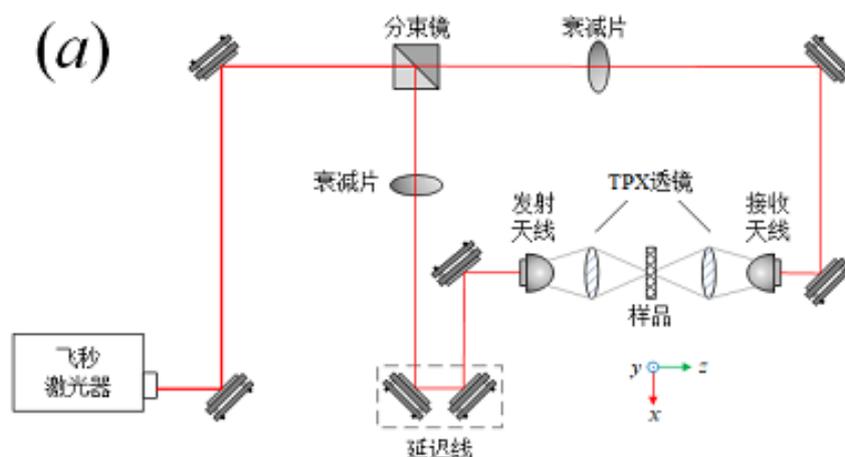
## 1 实验平台与检测原理

### 1.1 THz-TDS 系统原理

60 依据太赫兹时域光谱系统的工作原理，本课题结合实验样品的测试需求，搭建了自由空间下的透射模式太赫兹时域光谱系统。实验系统的光路图如图 1 所示。

该系统主要由飞秒激光器、光电导收发天线、机械延迟线、信号采集装置和多组反射镜以及衰减装置组成。太赫兹光电导天线由自由空间中波长为 780nm 的飞秒激光激发，相较于光纤耦合系统，本系统具有更高的系统信噪比，能够满足高质量的太赫兹时域光谱探测的要求。

65



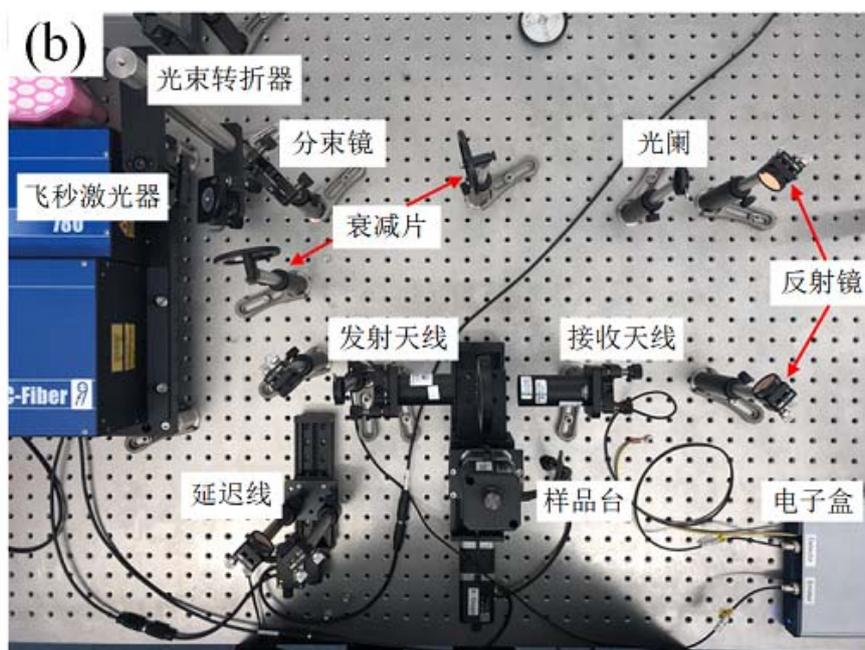


图 1 太赫兹时域光谱系统 (a)光路示意图 (b)系统实物图

70 Fig. 1 Terahertz time-domain spectroscopy system (a)Optical path layout(b)Equipment photos

如图 1(b)所示, 为本实验所采用系统的实物图片。其中激光发射源能够产生中心波长为 780nm 的飞秒激光脉冲。光束转折器用于提升激光的水平高度, 飞秒激光束在较低水平面上入射转折器之后经由两面平行的反射镜, 从较高的水平面出射, 同时不会改变飞秒激光脉冲光束的偏振态和物理光斑等性质。中性密度滤光片用于衰减飞秒激光脉冲的功率强度, 由于天线只能承受一定功率强度范围内的脉冲激光, 故需要使用中性密度滤光片来衰减由激光器出射的飞秒激光脉冲, 从而满足光电导天线的功率要求。该型号天线中的 GaAs 晶体在飞秒激光脉冲的激励下能够输出功率在  $\mu W$  级别的太赫兹辐射, 产生的太赫兹波经由 TPX (聚 4-甲基戊烯-1) 透镜聚焦到样品表面, 再被接收天线所接收。电子盒负责系统的信号采集工作, 同时可以对光电导天线施加偏压。本系统所采用的数字锁相技术可以用于提取太赫兹时域光谱系统中的微弱信号, 替代了传统的锁相放大技术, 从而免去了复杂的锁相放大硬件设备, 在结构组成上极大地降低了系统的复杂度。

80 如图 1(b)所示, 飞秒激光脉冲由激光器端口处发出, 经光束转折器的两面反射镜转折后将激光光路抬高至合适水平。再经由分束镜 (50: 50) 分为泵浦 (Excite) 和探测 (Detect) 两束光, 分别入射发射天线和接收天线。根据前述的太赫兹时域光谱探测原理, 需要保证泵浦光程与探测光程相同, 也就是产生的太赫兹光和激光同时到达接收光电导天线, 系统才能检测到信号。在本系统中也即是  $E1 + E2 + E3 + E4 + F = D1 + D2 + D3$ , 如图 2 所示。

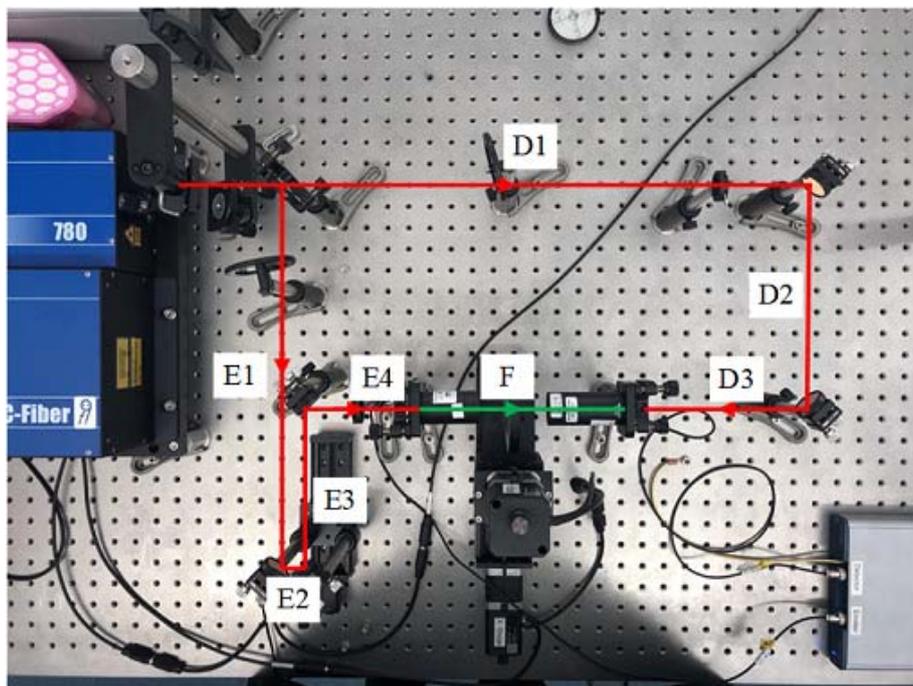


图 2 光程示意图

Fig. 2 Optical path diagram

90

另一方面，在本系统中存在多组反射镜与各类透镜，系统中的这些光学镜片对太赫兹波都具有一定的调制作用，其对光程的计算都有一定的影响，比如 TPX 透镜在 1THz 频率下的典型折射率为 1.45，使得其在光程的计算上会有略微的增加。因此，在尽量保证泵浦光与探测光的光路长度相等的前提条件下，还需要延迟线配合逐步扫描来对光程差进行微调。

95

太赫兹信号被电子采集卡接收之后，与延迟线的坐标信息一起传输给计算机当中，通过对数据的整合处理，从而得到太赫兹时域光谱检测结果。

### 1.2 光学参数提取方法

实验检测的原理如图 3 所示，其中图 3(a)为未放置样品时的参考信号示意图，图 3(b)为放置样品后的测试信号示意图。

100

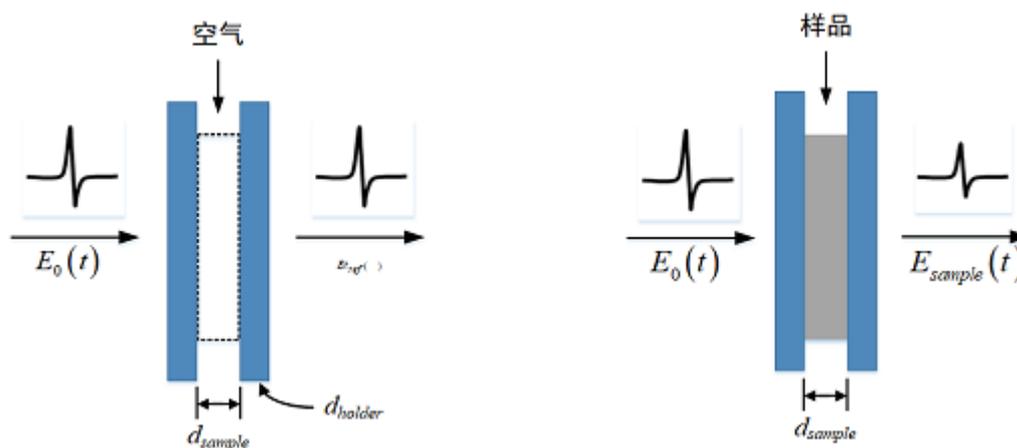


图 3 太赫兹信号测量示意图 (a)参考信号 (b)测试信号

Fig. 3 Terahertz signal measurement diagram (a)Reference signal (b)Measurement signal

105

假设太赫兹波在空间中传播的总光路长度为  $Z$ 。

当未放置样品时，太赫兹波在空间中的传播时间为：

$$t_{ref} = \frac{n_{air}(Z - 2d_{holder})}{c} + \frac{n_{holder} \cdot 2d_{holder}}{c} \quad (1)$$

当放置样品时，太赫兹的传播时间为：

$$t_{sam} = \frac{n_{air}(Z - 2d_{holder} - d_{sample})}{c} + \frac{n_{holder} \cdot 2d_{holder}}{c} + \frac{n_{sample} \cdot d_{sample}}{c} \quad (2)$$

110 于是得到太赫兹波通过样品时产生的时延：

$$\begin{aligned} \Delta t &= t_{sam} - t_{ref} \\ &= \frac{n_{sample}d_{sample}}{c} - \frac{n_{air}d_{sample}}{c} \end{aligned} \quad (3)$$

变换得：

$$n_{sample} = \frac{c\Delta t}{d_{sample}} + n_{air} \quad (4)$$

115 为了获得更好的成像质量，也即是让接收到的太赫兹信号尽量强，在本实验中样品被固定在样品平台上，而未让太赫兹波透过夹具。也即是在本文中，有  $n_{holder} = n_{air}$ 。

对于空气而言，在本文中将其折射率近似处理为 1，则有  $n_{sample} = \frac{c\Delta t}{d_{sample}} + 1$ 。

## 2 太赫兹检测实验

120 如图 4 所示为本实验所采用的 PMI 泡沫测试样品，样品的厚度为 15mm，为了验证太赫兹时域光谱技术在 PMI 泡沫无损探伤中的检测效果，本文在泡沫芯材中嵌入了金属回形针，以模拟泡沫芯材中常见的掺杂缺陷。



图 4 泡沫样品

Fig. 4 PMI Foam Sample

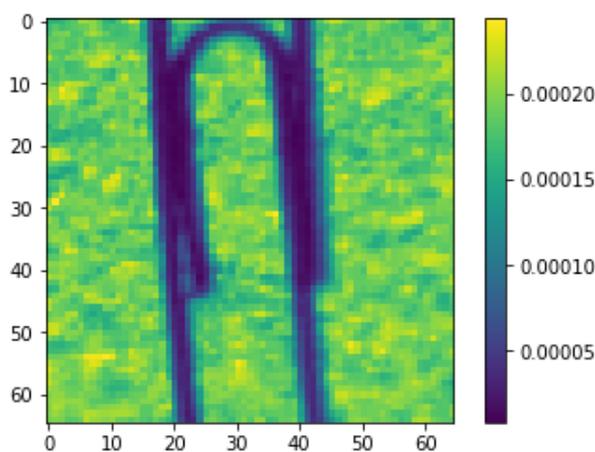
125 采用上文所述透射式太赫兹时域光谱系统进行检测试验，设置实验参数如表 1 所示：

表 1 系统（环境）参数设置

Tab. 1 Setting of experimental parameters

| 系统（环境）参数    | 设置值    |
|-------------|--------|
| 环境温度        | 25C°   |
| 环境湿度        | 45%    |
| 光谱扫描起点      | 240ps  |
| 光谱扫描终点      | 250ps  |
| 光谱扫描宽度      | 10ps   |
| 光谱扫描精度      | 0.02ps |
| 积分时长        | 0.05s  |
| 成像扫描精度      | 0.30mm |
| 成像扫描宽度（X 轴） | 19.2mm |
| 成像扫描宽度（Y 轴） | 19.2mm |

130 利用逐点扫描成像方式对待检测目标物进行成像，得到成像的结果如图 5 所示。其中深蓝色部分显示了实验事先预置的金属回形针，依据太赫兹波的传播理论可知，金属对太赫兹波具有强反射作用，太赫兹辐射无法透过，故此处的接收信号较弱。绿色及黄色部分代表了 PMI 泡沫，泡沫的密度较低，故整体对于太赫兹波而言具有高透过率，但由于泡沫芯材的颗粒较大，存在散射等现象，故检测图像中呈现出不均匀的信号强度分布。



135

图 5 太赫兹时域光谱成像

Fig. 5 Terahertz Time-Domain Imaging

### 3 PMI 泡沫芯材的光学参数提取

140 利用实验搭建的太赫兹时域光谱系统对 PMI 泡沫芯材进行光谱测量，得到其太赫兹时域光谱曲线如图 6 所示。

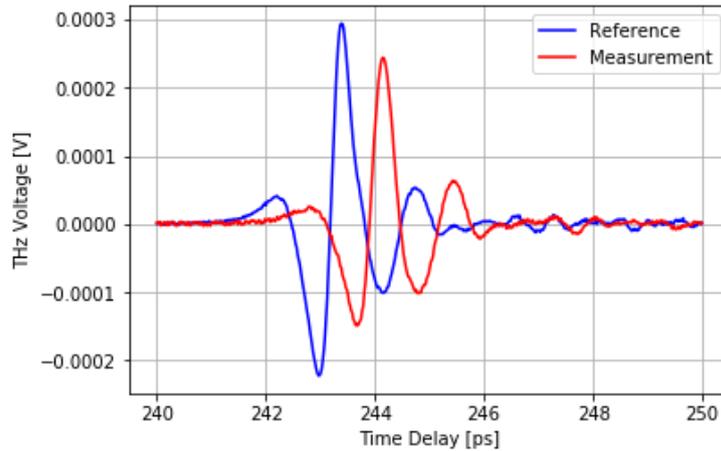


图 6 太赫兹时域光谱

Fig. 6 Terahertz time-domain spectroscopy measurement

145

其中曲线“Reference”代表了未放置样品时的太赫兹信号，“Measurement”代表了 PMI 的测试信号。通过傅里叶变换得到其频谱信息，如图 7 所示。

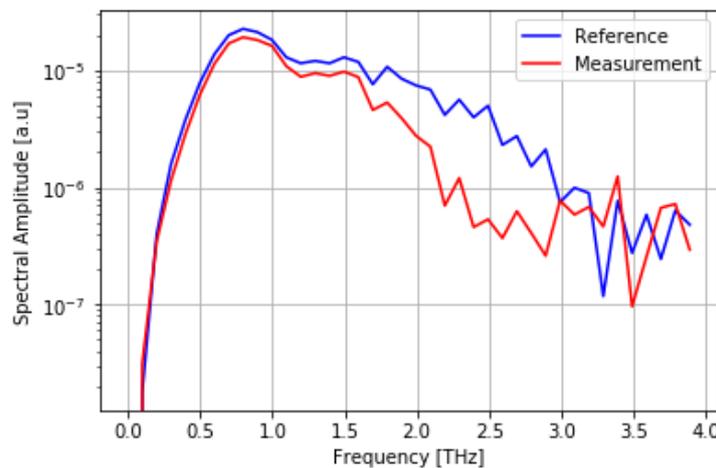


图 7 太赫兹频谱

Fig. 7 Terahertz spectrum

150

其中 1.7THz 左右的吸收代表了空气中水分子的吸收峰。可以看出 PMI 泡沫芯材在太赫兹频段内吸收较低，并且不存在强烈的吸收峰。

根据式 4，结合图 6，可以计算泡沫芯材在太赫兹频段下的折射率及介电常数等参数。

155 由 PMI 的光谱曲线可以得到  $t_{ref} = 243.4 ps$ ， $t_{sam} = 244.1 ps$ 。故  $\Delta t = 0.7 ps$ ，进而得到：

$$n_{sample} = \frac{c\Delta t}{d_{sample}} + 1 \approx 1.014 \quad (5)$$

对于非导磁材料而言，一般有  $\mu_r = 1$ ，故由电磁波的传播理论  $\frac{c}{n} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \epsilon_0 \mu_r \mu_0}}$ ，可以进一步得到 PMI 的相对介电常数为：

$$\epsilon_r = n^2 = 1.028 \quad (6)$$

## 160 4 结论

本文利用太赫兹时域光谱系统对 PMI 先进泡沫芯材进行了检测研究。实验结果表明，太赫兹时域光谱成像技术能够对 PMI 泡沫芯材进行清晰的成像，可以检测出其中的金属含杂缺陷。并且成像清晰，分辨率高，通过太赫兹时域光谱的检测信号，可以计算出 PMI 材料的折射率以及相对介电常数等参数。研究结果表明太赫兹时域光谱成像技术能够对 PMI 泡沫芯材中微小缺陷进行检测。

## [参考文献] (References)

- [1] 赵飞明, 安思彤, 穆晗. 聚甲基丙烯酰亚胺(PMI)泡沫研制现状[J]. 宇航材料工艺, 2008, 38(1).
- [2] 曲春艳, 谢克磊, 马瑛剑, et al. 聚甲基丙烯酰亚胺(PMI)泡沫塑料的制备与表征[J]. 材料工程, 2008(11):19-23.
- [3] 赵锐霞, 尹亮, 潘玲英, 等. PMI 泡沫夹层结构性能研究[J]. 宇航材料工艺, 2012, 05:34-37
- [4] 马立, 刘芑, 胡培. PMI 泡沫材料在航天器结构中应用的可行性研究[J]. 航天器环境工程, 2010, 27(2):164-168.
- [5] 赵秀芬, 纪双英, 史湘宁, 等. PMI 泡沫发展现状及其在直升机上的应用[J]. 宇航材料工艺, 2018.
- [6] 高申燊. PMI 泡沫夹层结构动态力学性能研究[D]. 2018.
- [7] 胡培. PMI 泡沫复合材料夹层结构的无损检测方法[J]. 材料工程, 2009(S2):354-358.
- [8] Siegel P H . Terahertz technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(3):910-928.
- [9] Gorenflo S , Tauer U , Hinkov I , et al. Dielectric properties of oil-water complexes using terahertz transmission spectroscopy[J]. Chemical Physics Letters, 2006, 421(4-6):494-498.
- [10] Zimdars D , Valdmanis J A , White J S , et al. Technology and Applications of Terahertz Imaging Non - Destructive Examination: Inspection of Space Shuttle Sprayed On Foam Insulation[C]// Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation: Volume. American Institute of Physics, 2005.
- [11] Nishimura N , Ogura R , Matsumoto S , et al. Study of molecular behavior in oxidation of insulating oil using terahertz spectroscopy[J]. Electrical Engineering in Japan, 2013, 183(1):9-15.