ICS 37.020
CCS N 33

中华人民共和国国家标准

GB/T XXXXX—XXXX

太赫兹时域光谱仪

Terahertz time-domain spectroscopy

（征求意见稿）

XXXX - XX - XX 发布　　XXXX - XX - XX 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会　发布

目　　次

前　　言 II
引　　言 III
1 范围 1
2 规范性引用文件 1
3 术语和定义 1
4 型式及分类 2
4.1 型式 2
4.2 分类 3
5 要求 4
5.1 外观 4
5.2 功能 4
5.3 技术性能 4
5.4 环境适应性 4
5.5 运输、运输贮存 4
6 试验方法 5
6.1 试验条件 5
6.2 外观 5
6.3 功能 5
6.4 技术性能 5
6.5 环境适应性试验 8
6.6 运输、运输贮存试验 8
7 检验规则 8
7.1 检验分类 8
7.2 出厂检验 8
7.3 型式检验 9
8 标志、包装 10
8.1 标志 10
8.2 包装 10
8.3 运输 10
8.4 贮存 10
附录 A 11
（资料性附录） 11
参考文献 [1] HITRAN 数据库. 美国大气与环境研究公司（AER）。 14

前　言

本文件按照GB/T 1.1-2020 《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国机械工业联合会提出。

本文件由全国光学和光子学标准化技术委员会（SAC/TC103）归口。

本文件起草单位：上海理工大学、中国计量科学研究院、南开大学、中国科学院上海微系统与信息技术研究所、军事科学院国防科技创新研究院、中国科学院微电子研究所、中国计量大学、首都师范大学、天津大学、博太赫兹信息科技（武汉）有限公司、太赫兹科技应用（广东）有限公司、华太极光光电技术有限公司、北京远大恒通科技发展有限公司、中国石油天然气股份有限公司西南油气田分公司安全环保与技术监督研究院、上海国际旅行卫生保健中心（上海海关口岸门诊部）、上海谱未科技有限公司、云南电网有限责任公司电力科学研究院、烟台大学、中国科学院重庆绿色智能技术研究院、上海光学仪器研究所、上海优施诺技术有限公司。

本文件主要起草人：彭滟、朱亦鸣、庄松林、邓玉强、常胜江、曹俊诚、常超、霍树春、方波、张存林、张亮亮、田震、袁英豪、李茜、杨旻蔚、吴玫晓、刘金鸽、封建欣、张锦涛、李鹏程、孙明楠、田桢干、王承良、邱方程、皇剑、吕军鸿、王化斌、刘炳伟、丁铭。

引　　言

太赫兹波通常指频率在0.1 THz～10 THz范围内的电磁波，介于微波与红外之间，具有光子能量低、对非极性材料穿透性强、瞬态宽带等特点。太赫兹时域光谱技术基于超快激光产生和相干探测太赫兹脉冲，能够同时获得被测对象的幅值和相位信息，具有光谱覆盖宽、灵敏度高、非接触无损测量等优点，已广泛应用于材料表征、无损检测、生物医药、半导体和质量控制等领域。

近年来，太赫兹时域光谱仪产业发展迅速，产品型式多样，但性能指标和试验方法尚缺乏统一规范，不同厂商、不同仪器之间的测量结果难以互认，制约了仪器的研制、质量评价和应用推广。

本文件旨在统一太赫兹时域光谱仪的术语和定义、型式及分类、技术要求、试验方法和检验规则，为仪器的设计、生产、检验和质量评价提供依据，促进太赫兹测量仪器产业的规范化、高质量发展。

太赫兹时域光谱仪

1 范围

本文件界定了太赫兹时域光谱仪的术语和定义，规定了型式及分类、要求，描述了相应的试验方法，规定了检验规则、标志、包装、运输及贮存。

本文件适用于采用光电导天线产生太赫兹脉冲的时域光谱仪。采用其他激发方式的太赫兹时域光谱仪可参照使用。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 11464 电子测量仪器术语

GB/T 11606—2007 分析仪器环境试验方法

GB/T 13384 机电产品包装通用技术条件

GB/T 13962 光学仪器术语

GB/T 13966 分析仪器术语

3 术语和定义

GB/T 11464、GB/T 13966、GB/T 13962界定的以及下列术语和定义适用于本文件。选择一项。

3.1

太赫兹信号 terahertz signal

频率在0.1 THz至100.0 THz之间的特定电磁波频段。

3.2

太赫兹时域光谱 terahertz time-domain spectrum

通过超快激光激发产生并探测的太赫兹脉冲电场随时间变化的波形信号，该信号直接反映材料对太赫兹辐射的时域响应特性，包含振幅和相位信息。

3.3

太赫兹频域光谱 terahertz frequency-domain spectrum

对测得的太赫兹时域波形（包含空载信号和样品信号）进行傅里叶变换，得到频域的振幅谱和相位谱。

3.4

光谱分辨率 spectral resolution

仪器能够分辨的最小波长间隔或频率间隔，该指标反映了仪器对光谱细节的分辨能力，单位可以是纳米（nm）、吉赫兹（GHz）等，具体取决于所采用的波长或频率表示方式。

3.5

频率准确度 frequency accuracy

在不考虑随机误差的情况下，仪器显示频率值与标称频率值相一致的能力，即特征峰处实测峰位值与标称峰位值的差值。

注：单位为吉赫兹（GHz）。

3.6

频率重复性 frequency reproducibility

在不考虑频率准确度的情况下，对给定频率位置多次测量时，仪器给出的频率值间相互一致的能力，即特征峰处实测峰位值的最大值与最小值的差值。

注：单位为吉赫兹（GHz）。

3.7

扫描范围 scan range

仪器能够输出的时域信号数据的最大时间延迟范围。

注：单位为皮秒（ps）。

3.8

时域延迟精度 time-domain delay precision

在仪器正常工作条件下，对太赫兹时域光谱进行多次测量时，太赫兹时域光谱实际峰位值的最大值与最小值的差值。

注：单位为飞秒（fs）。

3.9

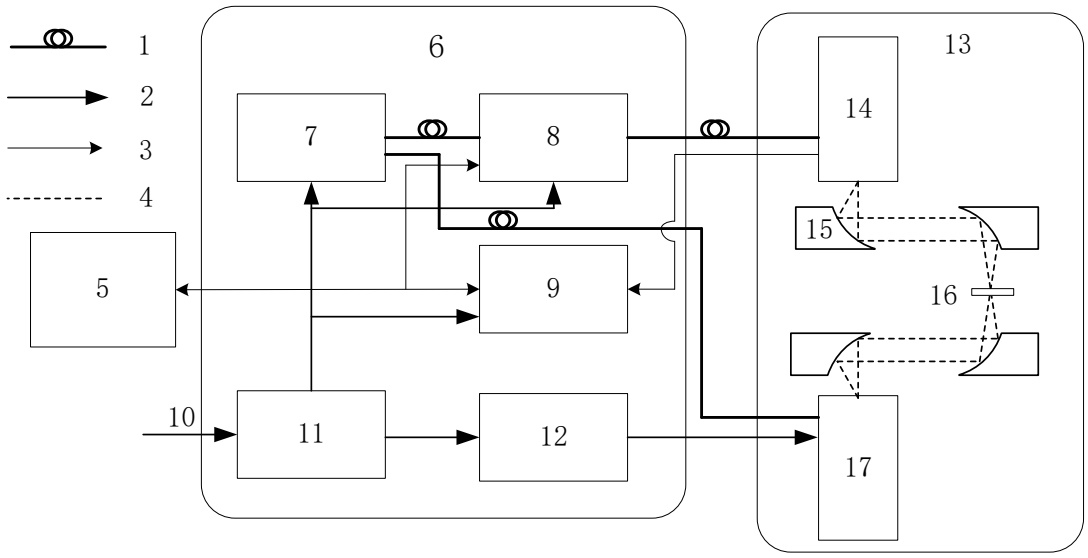
检测速度 testing speed

在仪器正常工作条件下，仪器进行光谱采集的速率。

4 型式及分类

4.1 型式

仪器按激发方式分为光电导天线型、光整流型、空气等离子体型等。光电导天线型的太赫兹时域光谱仪示意图如图1所示。



标引序号说明：

1——光纤；

2——电路；

3——信号；

4——太赫兹波束路径；

5——显控计算机；

6——主机；

7——飞秒激光器；

8——延迟线模块；

9——数据采集模块；

10——交流电源输入（示例为 220 V）；

11——电源模块；

12——高压模块；

13——探头；

14——发射天线；

15——抛物面镜或透镜组；

16——样品；

17——接收天线。

图 1 光电导天线型太赫兹时域光谱仪示意图

4.2 分类

仪器按测量模式可分为：

a) 透射式仪器；

b) 反射式仪器；

c) 正反射式仪器；

d) 衰减全反射式（ATR）仪器；

e) 多模式集成式仪器。

仪器说明及原理见附录A。

5 要求

5.1 外观

仪器符合下列规定：

a) 电镀表面不应有脱皮和斑点，漆面不应有磕碰伤和显著的颜色不均匀；零件表面不应有毛刺，外部零件锐边应倒棱，零件接合处应齐整；裸露金属面不应有锈蚀、碰伤和显著的划痕；

b) 所有铭牌及标志应清晰可见；

c) 所有紧固零件应保证紧固可靠，各锁紧机构应稳定可靠；所有支架应方便安装，并且稳定牢固；各活动部分的移动和转动应平稳舒适，不应有卡住和急跳现象；

d) 可直接观察的光学表面无明显擦痕、麻点、凝露或霉点，胶合面无可见气泡或脱胶。

5.2 功能

仪器应具有下列功能：

a) 显示太赫兹时域光谱、太赫兹频域光谱；

b) 显示光谱横坐标及强度示值或归一化示值；

c) 原始光谱数据导出功能，包含以下数据导出格式之一：*.txt、*.xls、*.xlsx 或*.csv。

5.3 技术性能

仪器技术性能要求应按照表 1 规定。

表 1 技术性能要求

序号	名称	要求
1	光谱范围	标准：0.1 THz～3.0 THz；扩展：0.1 THz～5.0 THz
2	动态范围（最大值）	≥70 dB
3	光谱分辨率	≤5 GHz
4	频率准确度	±20 GHz
5	频率重复性	±20 GHz
6	扫描范围及检测速度	扫描范围：≥100 ps（对应检测速度 30Hz 时），或≥300 ps（对应检测速度 10Hz 时）。具体参数组合应符合制造商明示的规格。
7	时域延迟精度	≤30 fs
试验的全过程仪器的相关设置条件应保持一致。		

5.4 环境适应性

按 GB/T 11606 的规定进行低温试验、高温试验、温度变化试验、恒定湿热试验和交变湿热试验。试验后，仪器应符合 5.3 中的技术性能要求。

5.5 运输、运输贮存

仪器按 6.6 进行运输贮存试验。试验后，包装应能保持对仪器的防护功能，仪器应无变形、松脱、涂覆层剥落等机械损伤；恢复至 6.1 的试验条件后，应符合 5.1、5.2 和 5.3 的规定。

6 试验方法

6.1 试验条件

试验条件如下：

a) 温度15℃～30℃，相对湿度20%～80%；
b) 仪器应放在平稳的工作台上，附近无强电磁场干扰源，电源接地良好；
c) 仪器工作环境应清洁、无腐蚀性气体；
d) 供电电源为直流供电或交流供电，供电误差值应不大于制造商标称供电电压的10%；
e) 样品室应具有放置待测样品的平稳、可靠支架；样品室可选配为封闭空间，仅预留快插接头以实现干燥空气/氮气吹入除湿；
f) 当更换各种附件时，应具有保持平衡与防擦碰的保护机构；
g) 系统在试验前应预热 30 分钟。

6.2 外观

用目视、手感和装卸模块方式对5.1的要求进行逐条检验。

6.3 功能

开启仪器，按照5.2的要求，用目视方式检验。

6.4 技术性能

6.4.1 光谱范围

6.4.1.1 试验工具

a) 除湿气体：干燥空气或纯度不低于 99.9%的氮气；
b) 金属片（尺寸须满足完全遮挡样品架通光孔径）；
c) 湿度计（湿度传感器可置于样品仓内，湿度显示范围 10%～99%）。

6.4.1.2 试验方法

采用透射测量模块，使用除湿气体，湿度控制在 20%RH 以内，进行测试：
a) 用一块金属片，完全遮挡住样品架通光孔径，由仪器测量一次时域信号，作为仪器的噪声 Tn；
b) 取出金属片，再由仪器测量一次时域信号，作为仪器的空载时域信号 Tr；
c) 仪器分别对 Tn 和 Tr 根据快速傅里叶变换计算其频谱功率信号Pf_n和Pf_r，以$Pf_r>Pf_n$的频率区间范围，作为仪器的频域光谱范围。

6.4.2 动态范围（最大值）

6.4.2.1 试验工具

a) 除湿气体：干燥空气（纯度≥99.9%）或氮气（纯度≥99.9%）；
b) 金属片（尺寸须满足完全遮挡样品架通光孔径）；
c) 湿度计（湿度传感器可置于样品仓内，湿度显示范围 10%～99%）。

6.4.2.2 试验方法

将 6.4.1.2 得到的Pf_n与Pf_r（线性坐标）代入公式（1）进行计算，得到仪器每个频率点的动态范围*DR*(*dB*)，取最大值，作为仪器的动态范围指标。

$$DR(dB)=10*log_{10}(Pf_r/Pf_n) \cdots\cdots (1)$$

式中：

DR(*dB*)——仪器的动态范围；

Pf_r——仪器空载时的频谱功率信号（线性坐标）；

Pf_n——仪器噪音的频谱功率信号（线性坐标）。

6.4.3 光谱分辨率

6.4.3.1 试验工具

太赫兹测量光路、湿度计和除湿气体。

6.4.3.2 试验方法

在水蒸气存在时（必要时可使用加湿器提升环境相对湿度），使用仪器测试空气中水蒸气的太赫兹吸收光谱，能够区分的最小频率差被认为是光谱分辨率。其中，“区分”的定义为：两个吸收峰中任意一个吸收峰的吸收强度应比两者之间吸收谷的吸收强度大 3dB 及以上。按照公式（2）计算光谱分辨率。

$$f=\frac{|A-B|}{2}\times 1000 \cdots\cdots (2)$$

式中：

f——光谱分辨率（GHz）；

A——相邻的两个水蒸气吸收峰的其中一个的峰位（THz）；

B——相邻的两个水蒸气吸收峰的另一个的峰位（THz）。

按照上述定义，可供参考的仪器的光谱分辨率与对应可区分的相邻水蒸气吸收峰如表 2 所示。

表 2 水蒸气候选峰对及参考峰间距

光谱分辨率（GHz）	标准峰位（THz）	吸收强度（$10^{-20}cm^{-1}/(molec\cdot cm^{-2})$）
1.0	2.9708	32.07
	2.9729	35.39
1.2	1.7960	3.69
	1.7984	4.82
2.1	2.8820	17.51
	2.8863	6.14
4.5	1.6622	18.13
	1.6711	43.14
8.0	1.0981	16.31
	1.1141	5.00

10.5	1.2085	5.54
	1.2296	4.79
17.0	2.0419	7.30
	2.0759	4.97
21.2	2.2232	21.41
	2.2657	29.67

6.4.4 频率准确度

6.4.4.1 试验工具

同 6.4.3.1。

6.4.4.2 试验方法

采集水蒸气吸收光谱，连续重复测量 3 次，记录 1.1637 THz 或 1.6711 THz 处特征峰的实际峰位值，按照公式（3）计算每次测量的频率准确度，取 3 次频率准确度中绝对值最大的一个为仪器的频率准确度。

$$\Delta\nu_i=(\nu_i-\nu)\times1000 \quad (3)$$

式中：

$\Delta\nu_i$——第 i 次测量水蒸气吸收峰处的频率准确度（GHz）；

ν_i——第 i 次测量水蒸气吸收峰处的实际峰位值（THz）；

ν——水蒸气吸收峰处的标准峰位值（THz）。

6.4.5 频率重复性

将**错误!未找到引用源。**记录的水蒸气 1.1637 THz 或 1.6711 THz 处特征峰的实际峰位值代入公式（4）计算频率重复性。

$$\delta_\nu=(\nu_{max}-\nu_{min})\times1000 \quad (4)$$

式中：

δ_ν——仪器的频率重复性（GHz）；

ν_{max}——3 次测量条件下，水蒸气特征峰处实际峰位值的最大值（THz）；

ν_{min}——3 次测量条件下，水蒸气特征峰处实际峰位值的最小值（THz）。

6.4.6 扫描范围及检测速度

6.4.6.1 扫描范围

仪器输出的时域信号数据最大时间延迟范围即为仪器扫描范围。

6.4.6.2 检测速度

6.4.6.2.1 试验工具

秒表。

6.4.6.2.2 试验方法

根据仪器可采用的设置方法，可选择以下两种方法中的任意一种计算仪器检测速度。

方法 1：在固定时间延迟范围 60ps 下，用秒表计时，连续采集 10 秒钟，获得 m 条谱线，按照公式（5）计算检测速度。

$$v_1=m/10 \quad \text{……（5）}$$

式中：

v_1——检测速度（Hz）；

m——谱线条数。

方法 2：在固定时间延迟范围 60ps 下，连续采集 600 条数据，用秒表计时获得采集时间 n，按照公式（6）计算检测速度。

$$v_2=600/n \quad \text{……（6）}$$

式中：

v_2——检测速度（Hz）；

n——采集时间（s）。

6.4.7 时域延迟精度

采集太赫兹时域光谱，连续重复测量 3 次，获得太赫兹时域光谱的实际峰位值，按照公式（7）计算时域延迟精度。

$$\delta_t=（A_{max}-A_{min}）\times 1000 \quad \text{……（7）}$$

式中：

δ_t——仪器的时域延迟精度（fs）；

A_{max}——太赫兹时域光谱实际峰位值的最大值（ps）；

A_{min}——太赫兹时域光谱实际峰位值的最小值（ps）。

6.5 环境适应性试验

按 GB/T 11606 的规定进行低温试验、高温试验、温度变化试验、恒定湿热试验和交变湿热试验。

6.6 运输、运输贮存试验

在运输包装状态下，按 GB/T 11606—2007 第 15 章至第 18 章进行低温贮存、高温贮存、跌落及碰撞试验。记录包装和仪器的初始检查结果。试验前应明确并记录适用的温度、持续时间、跌落条件及碰撞条件；跌落高度按完整包装件的质量选取。试验和恢复后，按 5.5 判定。

7 检验规则

7.1 检验分类

仪器的检验分为出厂检验和型式检验。

7.2 出厂检验

7.2.1 每台仪器均应进行出厂检验，检验合格后并附有产品合格证方可出厂。

7.2.2 出厂检验的项目类别见表 3。

7.2.3 出厂检验不合格或有不合格项目应返工然后复验。复验全部项目合格后，方可出厂。

7.3 型式检验

7.3.1 检验时机

在下列情况之一时，应进行型式检验：

a) 仪器设计定型或生产定型时；
b) 仪器转厂或转移生产地时；
c) 仪器正式生产后，如结构、材料、工艺有较大改变，可能影响仪器性能时；
d) 仪器长期停产，恢复生产时；
e) 仪器正常生产时，定期或积累一定产量后，应周期进行一次检验，一般为 3 年；
f) 质量监督管理部门依法提出要求时；
g) 检验结果与上次型式检验有较大差异时。

7.3.2 抽样方案

应从出厂检验合格的批中随机抽取。

7.3.3 判定规则

7.3.3.1 型式检验项目如表 3 所示。

7.3.3.2 型式检验的样品全部达到要求即为合格。

7.3.3.3 若型式检验合格，对进行抽样的该批产品可以提交鉴定、定型或出厂、入库。

7.3.3.4 若型式检验不合格，应分析原因，采取纠正措施，验证有效后，重新提交检验。若型式检验再次不合格，则对进行抽样的该批产品停止出厂，再重复上述分析、纠正、验证、重新提交的步骤，直至合格为止。

表 3 检验项目及检验类别

序号	检验项目及章条			检验分类	
	项目	要求章条号	试验方法章条号	出厂检验	型式检验
1	外观	5.1	6.2	•	•
2	功能	5.2	6.3	•	•
3	光谱范围	5.3	6.4.1	•	•
4	动态范围（最大值）		6.4.2	•	•
5	光谱分辨率		6.4.3	•	•
6	频率准确度		6.4.4	•	•
7	频率重复性		6.4.5	•	•
8	扫描范围及检测速度		6.4.6	•	•
9	时域延迟精度		6.4.7	•	•
10	环境适应性	5.4	6.5	—	•
11	运输、运输贮存	5.5	6.6	—	•
注：“•”为检验的项目；“—”为不检验的项目。					

8 标志、包装

8.1 标志

每台仪器应有如下标志：
a) 制造厂名称或商标；
b) 仪器型号；
c) 仪器名称；
d) 制造日期、出厂编号；
e) 仪器质量，单位为 kg；
f) 仪器体积为长×宽×高，单位为 mm×mm×mm；
g) 其他必要参数。

8.2 包装

产品包装应符合GB/T 13384中的规定。

8.3 运输

应用任何有遮蔽的运输工具运送。

8.4 贮存

应贮存在有遮蔽的场所，周围无酸性气体、碱、有机溶剂及其它有害物质。

附录 A

（资料性）

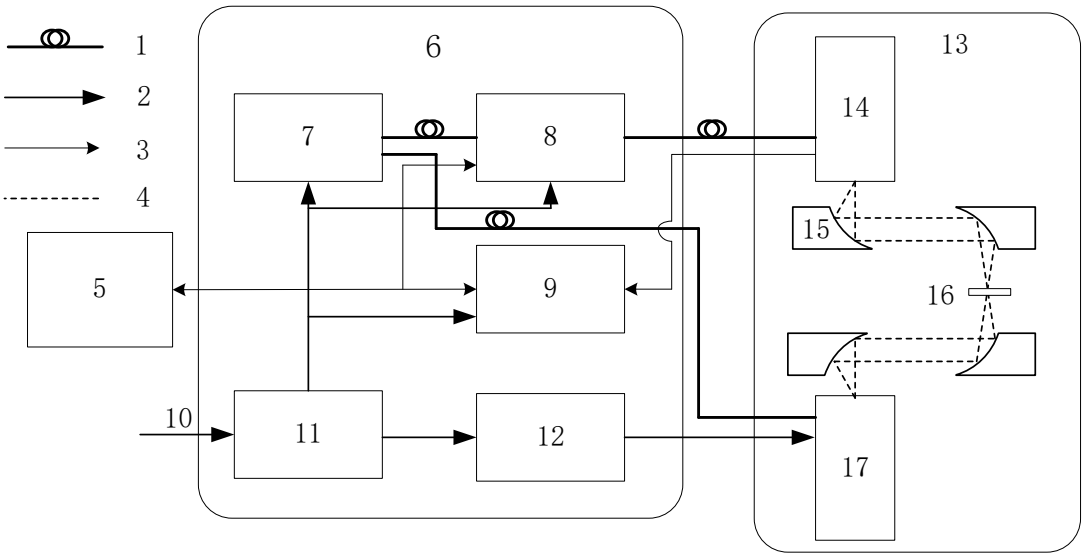
仪器说明与原理

A.1 仪器组成与工作原理

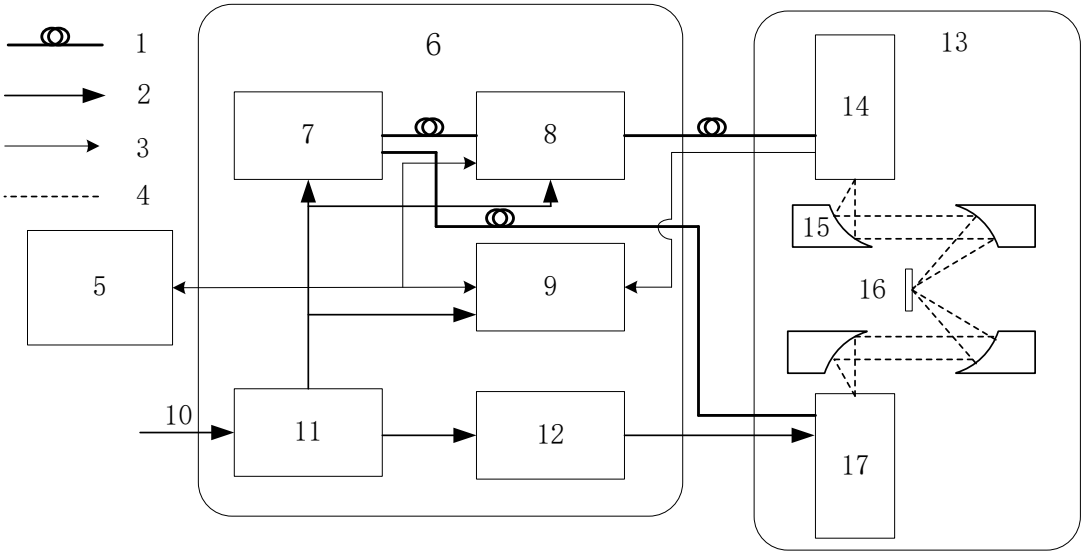
仪器由主机和探头模块组成，主机由飞秒激光器模块、延迟线模块、数据采集模块、电源系统、高压模块及显控计算机组成，探头模块由发射天线、接收天线、太赫兹聚焦或准直光学系统及可装载太赫兹样品测试的工装组成，探头模块应包含透射测量模块、反射测量模块、ATR测量模块中的一种或几种，仪器原理图如图A.1所示。

仪器工作时，飞秒激光器提供两路同频同相激光，分别作为太赫兹发射天线的泵浦光和接收天线的探测光；其中一路接到光纤耦合太赫兹发射天线，发射天线通过高压模块调制，和飞秒激光共同作用激发产生太赫兹脉冲波；太赫兹脉冲波辐射在被测样品上，与样品相互作用后进入接收天线；同时，另一路飞秒激光通过快速延迟线模块接入接收天线，快速延迟线产生一定速率和周期的光程延迟，实现在接收天线端对太赫兹信号的分时采样，采样后信号通过数据采集模块模数转换、信号处理、高速数据采集与扫描，并将处理的信号上传到主控计算机进行处理和显示；通过对采集到的太赫兹时域信号进行数据处理，获得太赫兹时域光谱、太赫兹频域光谱（亦可包括吸收系数谱、折射率谱）等光学参数。

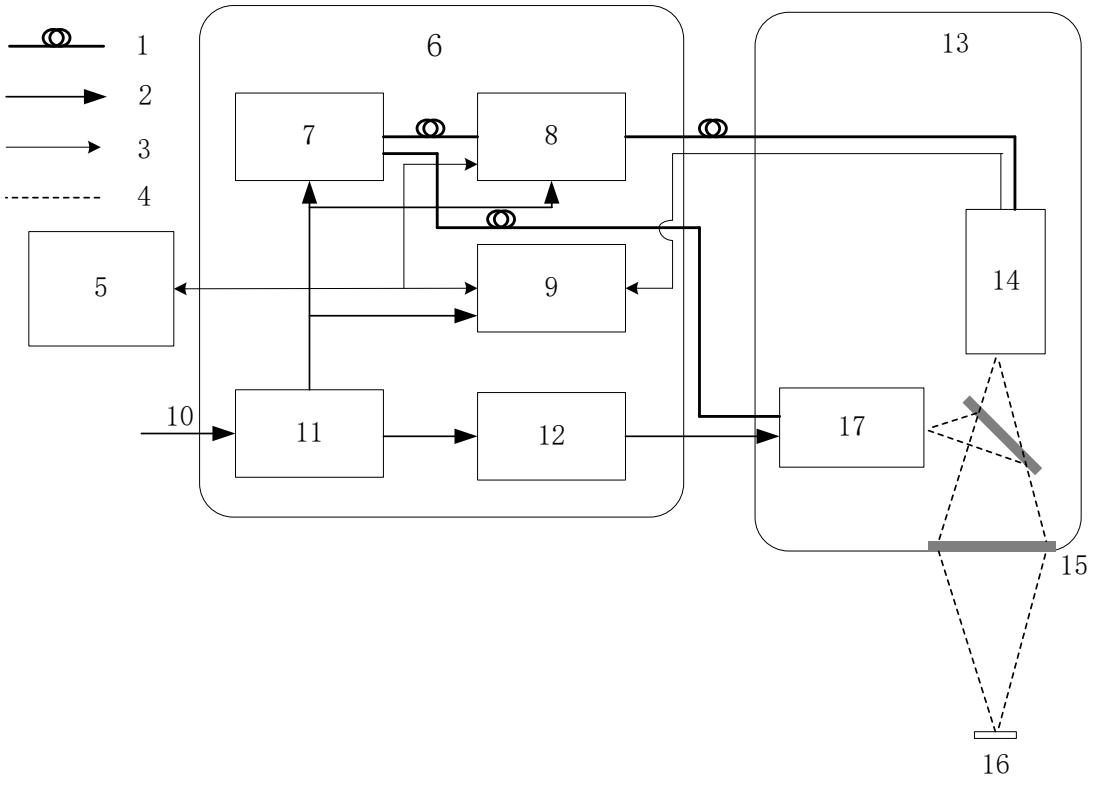
A.2 仪器原理图



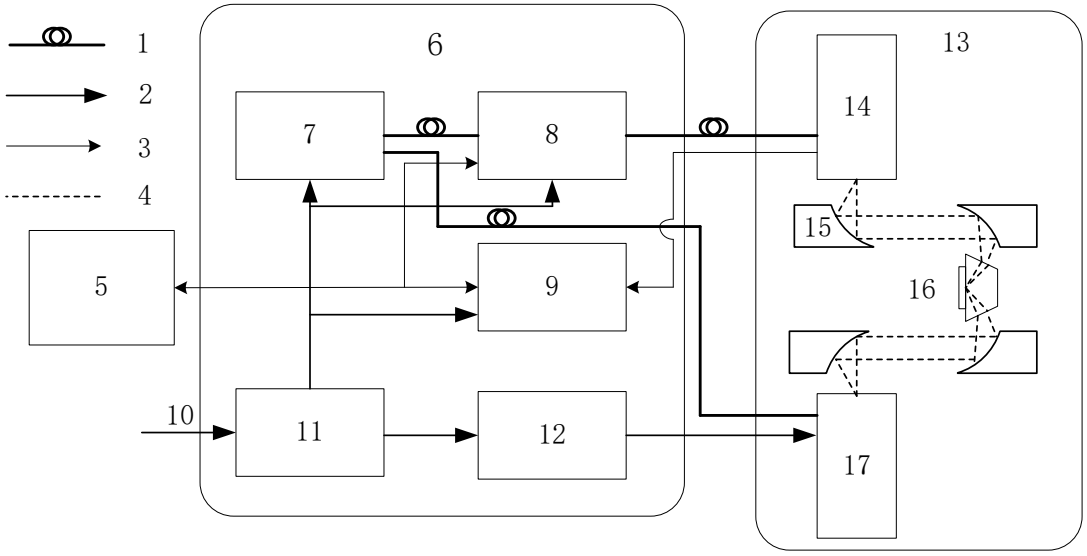
（a）


1
2
3
4
6
13
7
8
14
15
5
9
16
10
11
12
17

（b）


1
2
3
4
6
13
7
8
14
5
9
10
11
12
17
15
16

（c）



（d）

标引序号说明：

1——光纤；

2——电路；

3——信号；

4——太赫兹波束路径；

5——显控计算机；

6——主机；

7——飞秒激光器；

8——延迟线模块；

9——数据采集模块；

10——交流电源输入（示例为 220 V）；

11——电源模块；

12——高压模块；

13——探头；

14——发射天线；

15——抛物面镜或透镜组；

16——样品；

17——接收天线。

图 A.1 太赫兹时域光谱仪原理示意图

模式分类：a) 透射测量模式；b) 反射测量模式；c) 正反射测量模式；d) ATR 测量模式。

参考文献

[1] HITRAN 数据库. 美国大气与环境研究公司（AER）。