

成像与成谱联动的太赫兹分析检测仪

杨旻蔚¹ 季海兵¹ 谭智勇² 张慧芳³ 王 球³ 彭宁嵩¹ 谷建强³ 朱亦鸣⁴ 曹俊诚^{2*}

¹上海高晶影像科技有限公司, 上海 200433

²中国科学院上海微系统与信息技术研究所中国科学院太赫兹固态技术重点实验室, 上海 200050

³天津大学精密仪器与光电子工程学院太赫兹研究中心光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072

⁴上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093

摘要 自制的太赫兹量子级联激光器性能良好且易于集成和实际应用。利用该激光器出射的太赫兹波对非金属物质的穿透性, 在该激光器中配以辅助光路与阵列接收模块, 设计出具有一定空间尺度和分辨率的透射式成像系统, 对该成像系统中的光束整形关键参数选择因素进行了分析。将此成像系统与基于光电导天线对收发的全光纤太赫兹时域光谱系统相结合, 实现了联动式太赫兹分析仪的设计。此联动式太赫兹分析仪可对非金属包装中的隐匿物品进行太赫兹波段成像与指纹谱的联动获取, 整机操作软件能在后台控制与监控内部各设备, 实现了对危险品的快速、直观、准确的定位以及对物品种类的无损分析。

关键词 成像系统; 太赫兹检测技术; 联动式太赫兹分析仪; 量子级联激光器; 光电导天线时域光谱

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0611004

Terahertz Joint Analyzer with Imaging and Spectrum Detection

Yang Minwei¹ Ji Haibing¹ Tan Zhiyong² Zhang Huifang³ Wang Qiu³

Peng Ningsong¹ Gu Jianqiang³ Zhu Yiming⁴ Cao Juncheng²

¹ Shanghai Gaojing Radiography Technology Co., Ltd, Shanghai 200433, China

² Key Laboratory of Terahertz Solid-State Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China

³ Key Laboratory of Optoelectronics Information and Technology, Ministry of Education, Center for Terahertz Waves, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

⁴ School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

Abstract A terahertz quantum cascade laser, which is made in-house, has excellent device performance and is easy for integration and application. Terahertz wave emitted from the laser device can penetrate non-metal materials with little loss. A transmission imaging system with certain spatial dimension and resolution is built with the terahertz quantum cascade laser together with peripheral supporting optics and an array receiving module. Key parameters in the beam shaping are studied. A terahertz joint analyzer is developed by using the imaging system together with an all fiber terahertz time domain spectrum system based on photoconductive antenna. The terahertz joint analyzer can detect both terahertz imaging and fingerprints of objects hidden in non-metal packaging. The operation software of the whole instrument can control and monitor all the devices inside. The terahertz joint analyzer system offers a method of fast, intuitive and accurate location and non-destructive analysis for the detecting objects.

Key words imaging systems; terahertz detection technique; terahertz joint analyzer; quantum cascade laser; photoconductive antenna time domain spectrum

OCIS codes 110.6795; 140.5965; 070.4790

收稿日期: 2015-10-08; **收到修改稿日期:** 2016-01-20

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ150021)、国家 973 计划(2014CB339803)、国家自然科学基金(61131006, 61321492, 61405233)

作者简介: 杨旻蔚(1983-), 男, 博士, 工程师, 主要从事太赫兹仪器方面的研究。E-mail: yangpound@163.com

* **通信联系人.** E-mail: jccao@mail.sim.ac.cn

1 引 言

利用太赫兹 (THz) 波对物质进行分析鉴别的技术近年来备受关注。太赫兹波具有适合公共安检领域危险品检测的诸多特性: 1) 对绝大部分非金属及非极性的包装材料具有良好的穿透性和相对的透明性, 适合对隐匿物品的检测; 2) 常见的危险品, 如爆炸物、毒品、生化病菌等, 在太赫兹波段具有明显的吸收特性, 可构建准确的指纹吸收谱数据库; 3) 电离能很小, 既不会引起检测物的电离破坏, 也不会危及到使用人员的健康。因此, 相比于传统的安检技术, 太赫兹波在危险物的科学分析上具有更大的优势^[1-4]。

太赫兹波的两大核心应用是太赫兹成像与太赫兹成谱。太赫兹成像的关键技术是, 基于高性能的量子级联激光器 (QCL) 出射的位于太赫兹波段的某一单频点激光光束, 通过准直、扩束与匀质化之后, 直接照射至成像物体上, 透射过物体或被物体反射出的光束通过针对太赫兹波段的特定物镜与平面接收阵列, 形成具有高分辨率的成像物体空间分布图像^[5-8]。随着 QCL 器件以及对应的成像阵列器件的日益成熟, 该技术已经有了大量的应用实例且拥有更广泛的发展前景^[9-11]。太赫兹成谱以太赫兹时域光谱 (THz-TDS) 技术为主流, 通过超短脉冲飞秒激光入射至加载偏置电压的光电导天线 (PCA) 后产生瞬时光生电子运动, 辐射出宽带太赫兹信号并准直聚焦至被测物体上, 物品对信号的电场幅度和相位产生吸收与扰动, 其透射或反射的信号通过另一 PCA 或电光晶体, 通过光程的扫描获得时域信号并将之转化为频域信号, 从而获得相应的特征指纹吸收谱信息^[12-15]。近年来, 成谱系统在辐射源、探测接收端的快速采集以及谱线数据处理等方面获得了广泛的研究^[16-18]。如果将两者结合起来, 可开发出兼具成像与成谱功能的联动式太赫兹分析仪——既能获取被检物内部可疑物品的分布图像, 又可鉴别出可疑物品种类, 从而拓宽常规 X 光透视成像检测的局限。

虽然太赫兹 QCL 成像与 THz-TDS 有诸多共同特性, 但本质上二者属于两套分立系统。因此, 需要精密设计将两者集成于一体的机械、传动以及软件操控系统, 使得联动式太赫兹分析仪能够正常工作并获得优质的数据 (图像、谱线以及鉴别结果等)。本课题组设计的联动式分析仪采用对检测物先成像后成谱的工作方式, 其中, 高性能的 QCL 器件、合适的工作环境及成像系统辅助光路是决定图像效果的关键。本文介绍了系统整机所采用的成像与成谱系统及其工作流程, 着重介绍了系统中所使用的 QCL 器件设计及其性能参数; 介绍实现整机联动成像与成谱的操控软件及其测试流程; 给出系统获得的数据结果。

2 联动式太赫兹分析仪的结构与工作流程

2.1 太赫兹 QCL 成像系统

针对整机中太赫兹成像系统的应用, 设计了激射频率为 4.3 THz 的 QCL 器件, 器件有源区为共振声子结构^[19], 波导结构为半绝缘表面等离子体波导, 所用器件的尺寸为 $100 \mu\text{m} \times 2 \text{mm}$, 器件工作的电压为 15 V, 占空比为 25%。利用该自制的 QCL 器件组建的太赫兹 QCL 成像系统如图 1 所示。整个系统包含低温状态下工作的高功率太赫兹 QCL 激光光源、成像准直与波束均衡装置、成像扩束透镜与接收物镜、以及太赫兹激光焦平面接收阵列。此系统正常工作流程如下: 1) 斯特林制冷机提供 QCL 光源工作所需要的低温环境 (约为 48 K) (为使制冷机实现这样的低温, 事先需通过真空泵的抽运获得不超过 2.3 Pa 的真空度); 2) 开启 QCL 供电电源, 由脉冲电压驱动的 QCL 器件出射高功率太赫兹波段单频激光 (平均功率约 1 mW), 由对太赫兹波吸收较小的硅透镜扩束和准直之后, 入射到二维振镜, 通过三角波扫描方式光束均匀扩束; 3) 经准直和扩束后, 太赫兹光束通过高密度聚乙烯材质制成的成像准直透镜 (通光孔径为 50.8 mm, 物理尺寸约为 54 mm), 以近似平行的光照射到检测物, 透射光最终由焦平面接收阵列进行探测并转换为数字图像。在整个工作流程中, 需实时监控低温和真空度环境, 以免过高的温度导致 QCL 器件损坏。

从制冷机中出射的 QCL 光束发散全角约为 20° , 且具有明显的衍射特性, 需由振镜转化为平面均匀分布的光斑才可用于物体成像。图 2 给出了二维振镜在不同开关状态下探测到的光斑形状。其中, 振镜采用三角波扫描方式在最大偏转角之间往复摆动, 其驱动信号的频率 (频率较低则振镜振动的幅度可较大, 但会在匀质的光斑中遗留明显的扫描条纹) 和幅度 (幅度较大则可探测的区域也较大, 但同时会降低成像区域的激光功率密度) 均需根据实际光斑图像加以调整。成像结束后停振以免长时间工作损坏振动机构。

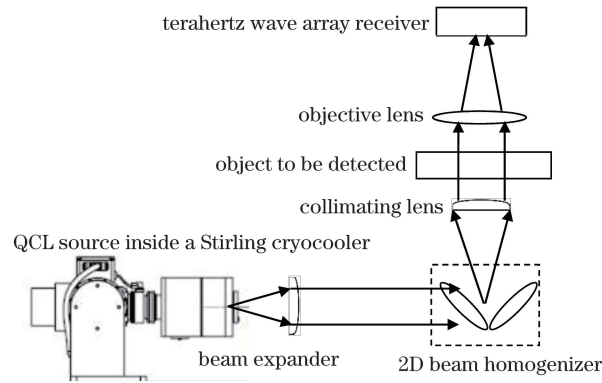


图 1 太赫兹 QCL 成像系统

Fig. 1 Terahertz QCL imaging system

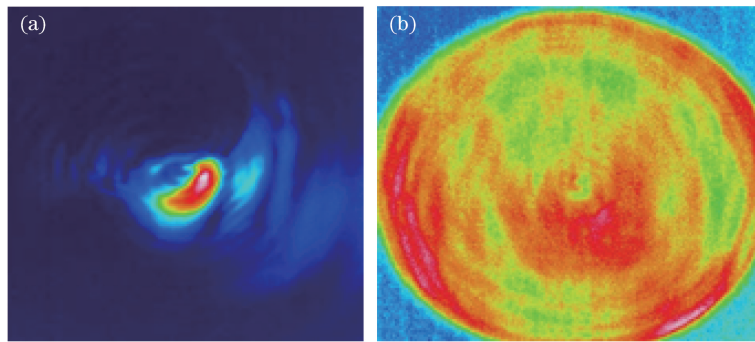


图 2 成像 QCL 光斑。(a)未匀质化的衍射光斑;(b)匀质化后的均匀光斑

Fig. 2 QCL laser spot pattern imaging. (a) Without homogenizer; (b) with homogenizer

2.2 全光纤太赫兹时域光谱系统

整机设计需兼顾仪器应用和运输时的稳定性要求,因此,选择使用全光纤 THz-TDS 系统,该系统的抽运源为工作在常规单模光纤工作波长(1560 nm)附近的光纤飞秒激光器(1 MHz 重复频率,100 fs 脉宽),工作模式为 InGaAs 衬底 PCA 发射接收对。相比传统的自由空间光路系统,基于电光晶体的信号探测模式以及基于空气电离产生太赫兹脉冲等系统具有更好的稳定性,且便于集成和调试。全光纤透射式 PCA 太赫兹时域光谱系统如图 3 所示。光纤飞秒激光器产生的脉冲经过分光与衰减,并通过一定方式控制脉宽色散,作为抽运光(平均功率约 20 mW)到达 PCA 发射端。发射端 PCA 将抽运光与周期性的脉冲电场驱动出射的太赫兹脉冲集成到 PCA 表面的超半球硅透镜后整形,构成虚焦点出射的发散太赫兹光束。需使用对称的离轴抛物面镜配合太赫兹聚焦透镜的 8F 工作方式以约束高斯光传播的太赫兹光束(各自太赫兹光束的束腰相互衔接)到达测试物处的光斑尺寸大小,从而保证测试结果既不会因光斑发散过大而丧失准确性,又能使机械结构的设计稳定紧凑。探测光(平均功率约 12 mW)在接收 PCA 处产生的光生电子对被收集到的太赫兹透射信号所调制,形成微弱电流,该微弱电流通过锁相(参考频率即为发射端驱动电脉冲的频率)放大的方式进行探测。软件控制光纤延迟线扫描的起始位置,得到不同光程差下对应的太赫兹时域信号,再通过快速傅里叶变换(FFT)获得固定频谱分辨率的频域信号。测试时,首先获取无样品时的参考信号(空气),再获取有样品时的透射信号,通过比较样品与参考信号,即可获得测试样品的太赫兹吸收谱。

2.3 联动式检测仪的工作流程与软件设计

整机的联动检测需要在机械设计上协调成像与成谱两套系统的配合。被检物通过手动放置在样品池中,且为方便用户操作被检物,将系统设计成竖直方向的透射式结构,从而使得被检物水平放置并依靠重力自然稳定在样品池中。被检物处于开放环境中,由一台大行程的二维平移台实现成像与成谱两套系统之间的运动及精确定位。考虑到成像系统中制冷机工作时会产生较大的往复振动,因此在整机中将其与成谱系统的机械装置加以隔离,以免影响成谱系统中天线对、抛物面镜以及透镜的稳定性。

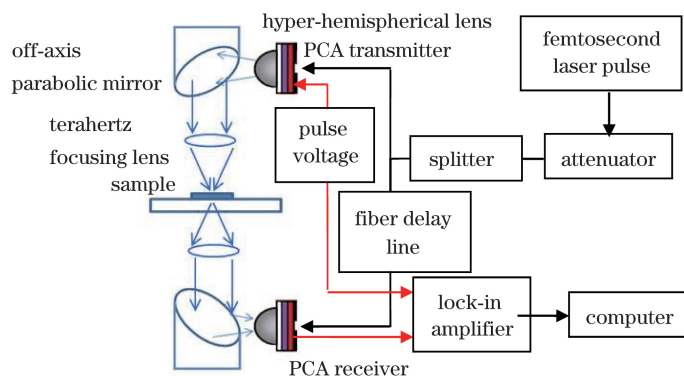


图 3 全光纤 THz-TDS 系统

Fig. 3 All fiber based THz-TDS system

仪器的运行状态以及所有成像与成谱数据和数据库比对结果,均可由集成于仪器内部的电脑软件实现。软件正确实现成像与成谱联动的关键在于:1)成像与成谱的中心点的相对位置关系;2)手选成谱点在原始成像数据中的实际位置折算成二维载物平台的相应移动行程。为此在前期调试中,须找出最佳成像(成像光斑位于图像数据中心,且像素分辨率对于被检物的轮廓最清晰)和最佳成谱(谱线时域幅值最大)点的平台位置相对于平台零位的绝对行程,再根据标准测试物(精确知悉直径的圆片)的大小,计算出图像中像素点的空间大小。根据上述工作流程,设计的操控软件主要包含以下几个部分:1)仪器硬件设备及软件运行环境初始化;2)设备状态的实时监控;3)二维平移台的精确定位;4)获取直观的检测图像与指纹谱结果;5)其他产品化的设计考虑,如人机交互、错误屏蔽等。

软件启动后,1)首先自检整机内部各个关键设备,如二维平台、制冷机、光束均衡二维振镜驱动控制器、QCL 驱动电源、成像数据接收模块、成谱扫描模块以及成谱数据采集模块等;2)自检成功后,程序对二维平台的运行状态(包括位置)以及制冷机的低温环境进行实时监控;3)联动检测前,控制并监测制冷机实现所需的低温环境,然后将被检物运行至成像中心后,开启 QCL 驱动电源与二维振镜,获取成像数据;4)对获取的图像数据手动选取成谱点;5)由软件控制平台依次移动各个标记的成谱点至已知的成谱中心位置,并按照相关成谱参数(时域谱的起始延时位置以及扫描速度)得到相应的时域谱之后,依照时域谱 Hanning 窗函数修正、按照统一的频率分辨点格式进行 FFT 变换、频谱进行均值滤波消除毛刺和降噪的过程,得到用于比对的谱线;6)谱线的识别采用测试吸收谱与预存的数据库谱线两者的相关系数作为主要的判断依据。以上流程即完成一次被检物成像与成谱的联动检测。

平台的运行须避免因为速度太快而引入的振动不稳定以及位置的不精确,经过测试后设置为 4 mm/s。成像系统的探测器对每次获取的图像进行 8 次平均(最终的成像速度为 1 frame/s),可以提高图像质量及降低振镜扫描引入的光斑内强度不均匀性。成谱的速度设置为约每 3 s 获得 1 条谱线,既能满足准实时测量的要求,也不至于因锁相放大探测的积分时间太小导致谱线信噪比变差。

3 联动式太赫兹分析仪测试结果

图 4(a)给出了联动式太赫兹分析仪的成像效果。仪器设定第 1 级振镜频率为 80 Hz,第 2 级振镜频率为 260 Hz,两级振镜的振动幅度均为 $\pm 1.5^\circ$ 。获得的匀质化光斑直径为 40 mm,分辨率约 2 mm,同时,未遗留较明显的振动三角波扫描轨迹。图中标记 P2 的遮挡物为自行压制的样品测试片,其余为相同规格但有外形破损的异形片。测试片是通过将样品粉末和高密度聚乙烯(HDPE)粉末以质量比 1:2 均匀混合后用压片机制成,测试片的直径为 8 mm,通过调整混合粉末的质量控制测试片的厚度均为 2 mm。图中红色和蓝色分别代表透射光较强和较弱(被遮挡)的区域,并以暖色向冷色的伪彩色变化表征透射光强度的衰减(由于遮挡)。通过观察 P2 能明显分辨出测试片中样品含量较多时吸收较强的深蓝色区域以及吸收较小的浅蓝色区域,反映出制样时的混合均匀性不一。若进一步增大振动幅度,并同时改变成像准直透镜的焦距及平面接收阵列至成像透镜的像距,虽可获得较大的光斑,但会降低光斑区域内的激光功率密度(特别是光斑边缘

部分受影响比较严重),导致图像对比度不佳;同时,还会降低图像的分辨率,丢失细节部分信息(同样尺度的成像物体,在接收阵列中所占据的像素点数量变少),作为对比,结果显示在图 4(b)中,其中光斑在背景上有明显的圆形截断,这是受成像透镜通光口径的限制所致,光斑直径为 50.8 mm。图 4(b)中,光斑边缘的浅绿色遮挡即为同样直径 8 mm 的测试片,其伪彩色色差对比度(红色与浅绿色)明显小于图 4(a)中相同测试片的结果(红色与深蓝色)。

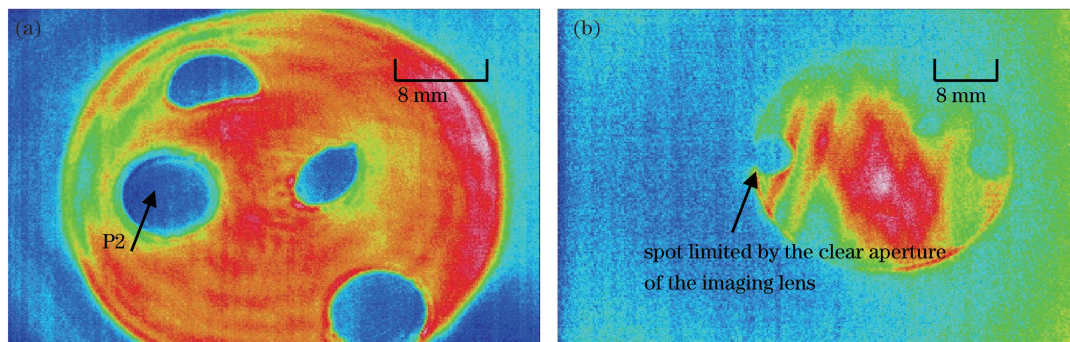


图 4 联动式太赫兹分析仪 QCL 成像原始效果。(a)实际使用的直径 40 mm 成像光斑;
(b)达到成像透镜通光口径限制的直径 50.8 mm 成像光斑

Fig. 4 Comparison between QCL raw images with samples. (a) Current spot pattern with 40 mm diameter;
(b) 50.8 mm diameter spot pattern limited by aperture of the imaging lens

通过屏蔽原始图像中光斑以外的背景噪声区域,可以提取出用户感兴趣的中心光斑区域,并进一步增强伪彩色图像显示的对比度,便于用户分辨细节信息。用户根据处理过的图像可以手动选取图像中希望探测的可疑点,交付 THz-TDS 系统进行成谱分析。对应图 4(a)中的软件端图像截取与手动选点,以及系统相应的成谱信息如图 5(a)~(d)所示。图 5(b)中,相比参考信号,各成谱点的样品信号在幅度上均有不同程度的降低,体现了该位置的样品对于太赫兹信号的吸收;各样品信号的极大值在时域位置上相对参考信号有延时,这是由于测试片的折射率大于空气(即参考信号通过的介质)导致太赫兹信号的光程变大;而各测试片谱线的极大值延时位置略有不同,则是因为制作测试片时用较高质量比例的 HDPE 末作为添加剂以增强机械强度,因此测试片中实际的测试样品组分较少,因而引入的光程改变量之间差异也较小。太赫兹信号在时域谱上通常都有一定程度的拖尾(包括振荡与表面反射等干扰),而其真正有意义的频谱分量组成的信号则集中在主脉冲之中。

针对太赫兹频谱较宽的特点,选用 Hanning 窗函数对时域信号以极大值为中心进行修正,既能剔除时域信号中的干扰,也能降低栅栏效应和频谱泄露对于 FFT 变换的影响。同时,为了适应谱线比对的需要,所有的频谱均根据统一的频谱分辨格式(本仪器设定为 0.01 THz)调整相应的 FFT 变换点数。此外,由于仪器设计成像与成谱联动的需要,图 3 所示的 THz-TDS 系统两个聚焦透镜之间的太赫兹光路是暴露在环境空气中的,可能容易受到空气中水汽吸收的影响,为此,采用了 FFT 变换得到的频谱进行均值滤波的数据处理方法,将部分水汽的吸收毛刺弱化,从而改善用于数据库识别时的准确率。根据以上步骤,得到的对应频谱谱线如图 5(c)所示。其中,参考信号的噪声线定义为高频段的均方值,频谱的最大动态范围超过 60 dB(定义为频谱最大值与噪声线的比值),以噪声线与参考信号的交点定义的系统谱宽达到 3.0 THz,能有效进行谱分析的谱宽(定义为噪声线以上 40 dB 信噪比)达到 1.5 THz。最后,将参考谱线与样品谱线的频谱幅度相除并进行自然对数运算,再除以样品厚度,即可得到某样品的吸收率^[13],如图 5(d)所示。

部分危险品的太赫兹波段吸收谱缺乏明显的特征吸收峰,如图 5(d)中 P3 与 P4 所示。因此软件中集成了以相关系数、最大误差和均方误差作为联立的鉴别依据的数据库比对方法:1)将吸收谱视为频率点作为变量的吸收幅度函数,将测试得到的被检点吸收谱的吸收率和样品数据库中的各条吸收谱的吸收率进行线性相关系数的计算,以判断二者之间的相似程度;2)比较二者在设定的太赫兹波段中某一频点处最大吸收率的差别,以及比较在整个有效太赫兹波段中各点吸收率差异的均方误差。如果二者比较结果的 3 个参数均小于设置的门限值,则可判定为属于数据库中的物品种类。而参数的门限值和样品数据库的建立须通过大量

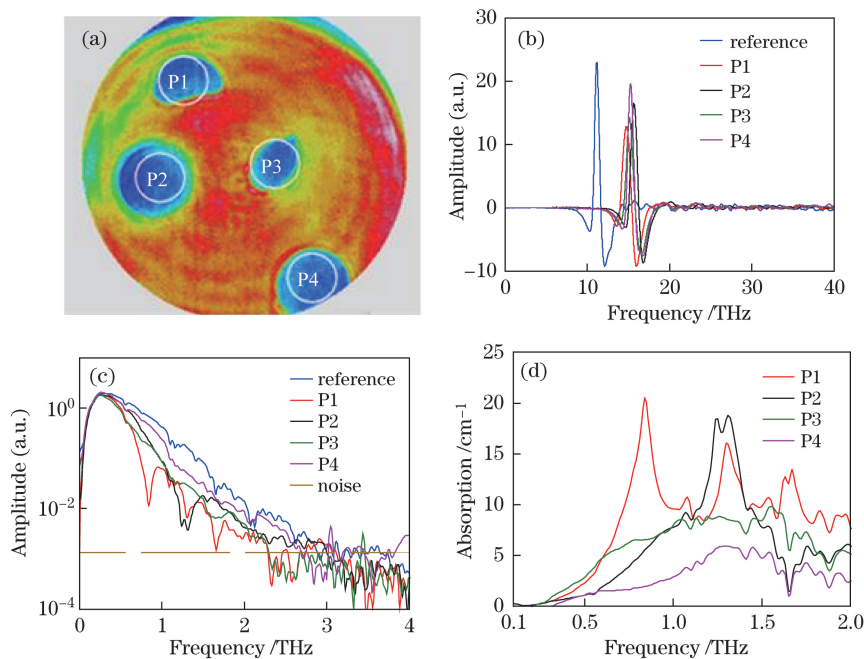


图 5 (a)屏蔽背景的图像及选点;(b)各点时域信号;(c)各点频谱信号;(d)各点吸收谱

Fig. 5 (a) Manual selecting points on the QCL image with background blocked; (b) time-domain signals of all selected points;

(c) frequency spectra of all selected points; (d) absorption of all selected points

谱线的测试、平均和优化后获得,既避免了不同样品吸收谱变化趋势相同时引入的相关性误判,也避免了因样品主要吸收峰相近导致的误判。

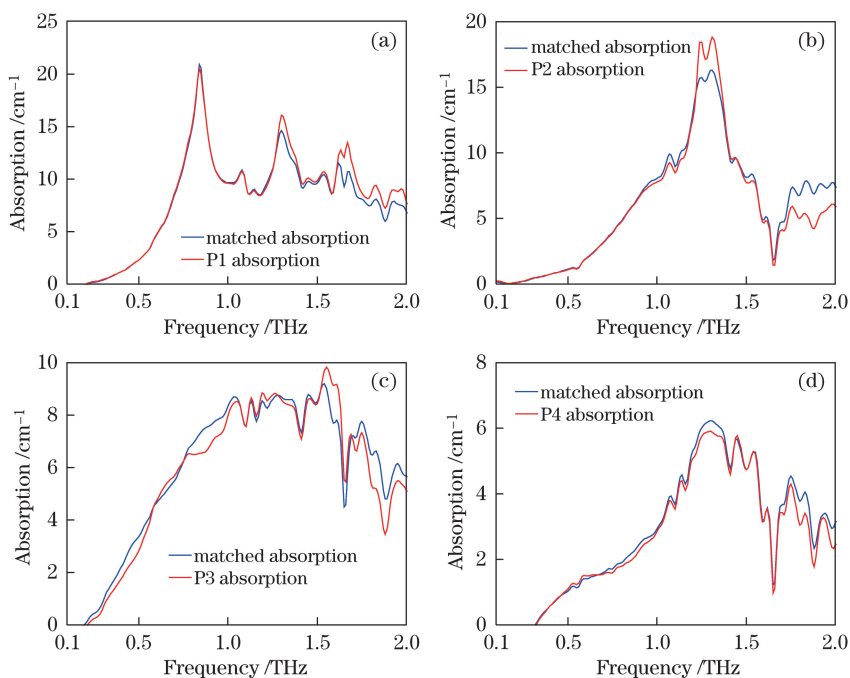


图 6 危险品数据库识别结果示例。(a)P1;(b)P2;(c)P3;(d)P4

Fig. 6 Database matching results demonstration. (a) P1; (b) P2; (c) P3; (d) P4

例如,图 5(a)中各点的数据库匹配识别结果如图 6(a)~(d)所示。观察各个成谱点的吸收谱与最接近的数据库中样品吸收谱线的比对结果可见,在能有效进行谱分析的太赫兹波段(0.1~1.5 THz)内,测试谱线与样品库谱线能够较好的吻合(体现在软件端,即为较大的相关系数和较小的误差);而当超过有效谱分析频率段后,误差明显增大,这是因为在该波段测试片对太赫兹信号吸收后,信噪比不足导致实际

的吸收率计算容易受到噪声的干扰而产生较大误差。此外,软件亦可按照前述 3 种指标的任意 1 种寻找数据库中最接近的谱线,有助于对不同(掺 HDPE)质量比例、不同厚度或者不同杂质样品测试时的辅助判别。

4 结 论

利用高性能 QCL 器件,结合必要的斯特林制冷机、静态外围透镜光路以及动态二维光束匀质机构,通过关键参数的优化,设计了一套具有一定成像区域和一定分辨率的太赫兹 QCL 成像系统。将此系统与基于全光纤 PCA 的 THz-TDS 系统集成,实现了兼具成像与成谱功能的联动式太赫兹分析检测仪的设计。通过软件设计实现了仪器联动成像与成谱的操控、数据的图形化显示以及高效自动的危险品数据库的比对等功能。

参 考 文 献

- Xu Jingzhou, Zhang Xicheng. Terahertz science technology and application[M]. Beijing: Peking University Press, 2007: 177-212.
许景周, 张希成. 太赫兹科学技术和应用[M]. 北京: 北京大学出版社, 2007: 177-212.
- He Ting, Zhang Bo, Zhang Cunlin, *et al.*. Research on illicit drugs and explosive based on terahertz spectroscopy detection [C]. The 2nd Seminar on Hazardous Materials & Security Emergency Technology, 2013: 193-200.
和 挺, 张 波, 张存林, 等. 危险品的太赫兹光谱研究[C]. 第二届全国危险物质与安全应急技术研讨会论文集, 2013: 193-200.
- Du Yu, Zhang Weibin, Xiao Li. Application of terahertz wave technology in explosive analysis [J]. Information and Electronic Engineering, 2011, 9(3): 287-290.
杜 宇, 张伟斌, 肖 丽. 太赫兹检测技术在炸药检测中的应用[J]. 信息与电子工程, 2011, 9(3): 287-290.
- Lu Shuhua. Detection of explosives by terahertz spectroscopic techniques[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(4): 040006.
卢树华. 基于太赫兹光谱技术的爆炸物类危险品检测[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(4): 040006.
- Tan Zhiyong, Zhang Zhenzhen, Zhou Tao, *et al.*. Study of terahertz quantum device and its application in image experiments[J]. Modern Scientific Instruments, 2012, 6: 18-19.
谭志勇, 张真真, 周 涛, 等. 太赫兹量子器件及其成像实验研究[J]. 现代科学仪器, 2012, 6: 18-19.
- Liang Baowen, Ye Limin, Lü Zhaoshun, *et al.*. Design of two-dimensional THz imaging optical system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(5): 053103.
梁宝雯, 叶利民, 吕照顾, 等. 二维太赫兹探测成像光学系统设计[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(5): 053103.
- Tan Z Y, Zhou T, Cao J C, *et al.*. Terahertz imaging with quantum-cascade laser and quantum-well photodetector[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(14): 1344-1346.
- Tan Z Y, Zhou T, Fu Z L, *et al.*. Reflection imaging with terahertz quantum-cascade laser and quantum-well photodetector[J]. Electronics Letters, 2014, 50(5): 389-391.
- Guo Xuguang, Gu Liangliang, Fu Zhanglong, *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.
- Oda N, Ishi T, Morimoto T, *et al.*. Real-time transmission-type terahertz microscope, with palm size terahertz camera and compact quantum cascade laser[C]. SPIE, 2012, 8496: 84960Q.
- Oda N, Lee A W M, Ishi T, *et al.*. Proposal for real-time terahertz imaging system, with palm-size terahertz camera and compact quantum cascade laser[C]. SPIE, 2012, 8363: 83630A.
- Zhao Ziran, Wang Yingxin. Development of portable terahertz time-domain spectrometer[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013, 11(1): 57-61.
赵自然, 王迎新. 便携式太赫兹时域光谱仪的研制[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(1): 57-61.
- Zhu Yiming. Testing of drug using terahertz time-domain spectroscopy[J]. Modern Scientific Instruments, 2012, 6: 30-32.
朱亦鸣. 太赫兹技术在药物检测中的应用[J]. 现代科学仪器, 2012, 6: 30-32.
- Jan Martin R, Georg V F. A terahertz time-domain spectroscopy-based network analyzer[J]. IEEE Journal of Lightwave

- Technology, 2015, 33(2): 403-407.
- 15 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 Physica Sinica, 2015, 64(2): 024202.
赵 峰, 龙妹明, 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): 024202.
- 16 Li Xinghuo, Zhuo Hongbin, Zou Debin. Study of ultra-intense laser driven solid line emitting terahertz wave[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0314003.
李星火, 卓红斌, 邹德滨. 超强激光驱动天线靶的太赫兹辐射物理特性研究[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0314003.
- 17 Huang Zhanhua, Hu Zixiao, He Mingxia, *et al.*. Terahertz time-domain spectroscopy rapid data acquisition based on closed-loop control[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(4): 040401.
黄战华, 胡子晓, 何明霞, 等. 基于闭环控制的太赫兹时域光谱快速采集[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(4): 040401.
- 18 Kou Kuan, Zhao Guozhong, Liu Ying, *et al.*. Simultaneously determinations of sample thickness and refractive index by terahertz time-domain spectroscopy[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(8): 0815001.
寇 宽, 赵国忠, 刘 英, 等. 利用太赫兹时域光谱同时确定样品厚度和折射率[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0815001.
- 19 Li H, Cao J C, Liu H C. Effects of design parameters on the performance of terahertz quantum-cascade lasers [J]. Semiconductor Science and Technology, 2008, 23(12): 125040.