

一种可同时实现振幅谱与相位谱测量的光声光谱系统

余 荣 江月松

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191)

摘要 设计了一套可同时测量光声振幅谱与相位谱的光声光谱系统。该系统优化了传统的气体-微音器光声光谱系统,增加了相位测量功能,实现了从紫外到近红外区(350~1000 nm)的连续波长扫描,测量的最小步进波长为 0.1 nm,频率调制范围为 10~2000 Hz。采用虚拟仪器软件 LabVIEW,可通过计算机实现仪器控制、实验参数设置、数据自动采集和处理。LabVIEW 程序的前面板能动态监控实验过程并实时显示光声振幅谱和相位谱。利用 HO_2O_3 对系统进行鉴定,测得的归一化光声振幅谱与文献结果一致。用该系统研究了喜树碱与羟丙基- β -环糊精的包合物,实验结果显示将光声相位谱与振幅谱相结合,可以获得样品更丰富的信息。

关键词 光谱学;吸收光谱;光声光谱仪;LabVIEW;光声相位;虚拟仪器

中图分类号 TH744.12 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0230001

Photoacoustic Spectroscopy System with Amplitude Spectrum and Phase Spectrum Measurement Functions

Yu Rong Jiang Yuesong

(School of Electronic Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract A photoacoustic spectroscopy system which can measure the photoacoustic amplitude spectrum and phase spectrum simultaneously is constructed. Based on the conventional gas-microphone system, the phase measurement function is added to the system. The hardware configuration of the system is also optimized. It can scan wavelengths continuously from ultraviolet (UV) to near-infrared (NIR) regions within the range of 350~1000 nm with the minimal step length of 0.1 nm and the modulation frequency range of 10~2000 Hz. Using the virtual instrument software LabVIEW, the computer in the system can control instruments, set the experimental parameters, acquire and process data automatically. The front panel of the LabVIEW program can monitor the experiment dynamically and obtain the real-time spectra of both photoacoustic amplitude and photoacoustic phase. The system is evaluated with HO_2O_3 , and the normalized photoacoustic amplitude spectrum is consistent with the photoacoustic spectra reported by the existing literatures. The inclusion of camptothecin and hydroxypropyl- β -cyclodextrin is studied by the system, and the experimental results show that more information of the same sample can be obtained when combines photoacoustic phase spectrum with photoacoustic amplitude spectrum.

Key words spectroscopy; absorption spectroscopy; photoacoustic spectrometer; LabVIEW; photoacoustic phase; virtual instrument

OCIS codes 120.6200; 110.5125; 300.6250; 300.6430

1 引 言

光声光谱技术是一种灵敏度高、普适性强,并已逐渐发展成熟的光吸收测量技术^[1-2]。从本质上讲,光声光谱技术是一种光热测量技术。与传统的

吸收光谱不同,光声光谱不是直接测量光子,而是测量试样吸收光能后,经无辐射退激发过程产生的周期性热流。试样产生的热流周期性地加热密闭在光声池中的空气,引起空气振动,因此可通过测量声信

收稿日期: 2013-08-22; 收到修改稿日期: 2013-09-29

基金项目: 国家自然科学基金(41140035)

作者简介: 余 荣(1976—),女,博士研究生,主要从事光声光谱及其应用方面的研究。E-mail: yurong@ee.buaa.edu.cn

导师简介: 江月松(1959—),男,教授,博士生导师,主要从事激光空间信息技术、高分辨率成像信息技术以及量子雷达等方面的研究。E-mail: yuesongjiang@buaa.edu.cn

号来检测试样产生的热。由于测量原理不同,光声谱能够分析一些传统吸收光谱难以分析的样品,如不透明或高散射的样品,是传统吸收光谱技术的有益补充^[3-4]。近年来光声光谱技术在物理、化学、生物、医学、食品、环境和无损检测等领域有广泛的应用^[5-6]。

商品化的光声光谱仪往往只能测量光声振幅谱,然而,光声光谱学的理论和实践都表明:光声相位谱可提供光声振幅谱所不能提供的丰富信息^[7-8]。20世纪80年代初,Thomas等^[9]指出,与光声振幅相比,光声相位检测可达试样内更深处,因此包含更多信息。苏庆德等^[10-11]研究了叶绿素和稀土化合物的光声相位谱,也得到了许多有意义的研究成果。若将试样的光声振幅谱和相位谱相结合,则可能对试样的光、热特性获得更全面、更准确的认识。

在传统的气体-微音器光声光谱测量系统的基础上,优化了硬件配置,采用虚拟仪器软件LabVIEW提高了系统的自动化程度,设计了一套可同时测量光声振幅谱与相位谱的光声光谱系统。用 Ho_2O_3 对这套系统进行鉴定,其归一化光声振幅谱与文献结果一致。利用该光声光谱系统研究了喜树碱与羟丙基- β -环糊精的包合物,实验结果显示将光声相位谱与振幅谱相对照,可以获得试样更丰富的信息。

2 系统的检测原理

2.1 光声振幅的检测原理

根据固体光声信号的R-G理论,固体试样的光声振幅信号为

$$P(\lambda) = A\beta(\lambda)I_0, \quad (1)$$

式中 λ 为入射单色光的波长, I_0 为入射光的强度, β 为试样的光吸收系数, A 为与系统的光、热特性和几何性质有关的常数^[12]。

对强吸收体,如炭黑等,其光吸收系数 β 可看作

常数1。由(1)式可知,强吸收体的光声信号与入射光的功率 I_0 成正比,因此,人们常常用炭黑的光声振幅谱作为光源的相对功率谱。由于氙灯的强度和单色仪的衍射效率等是随波长而改变的,为了排除这些因素对试样光声振幅测量的影响,通常需对试样的光声振幅谱进行炭黑归一化处理,即将试样的光声振幅谱与炭黑的光声振幅谱相除,得到只取决于试样自身光吸收性质的归一化光声振幅谱^[13]。

2.2 光声相位的检测原理

R-G理论指出试样的光声相位信号也与其光吸收系数有关,然而该理论忽略了无辐射弛豫过程对光声相位的影响。伍荣护等结合R-G理论和Mandelis^[14]的研究成果对光声相位做出了更合理的解释:光声相位是从光照射样品到微音器检测到声信号这一过程所产生的时间延迟。除仪器因素外,相位来自两部分:一部分为物质吸收光能后,经无辐射跃迁产生热的过程(简称为光热转换过程)中引起的相位,即

$$\Psi_1 = \arctan\{\omega\tau/[1 + R(1 + \omega^2\tau^2)]\}, \quad (2)$$

式中角频率 $\omega = 2\pi f$ (f 为斩波器的调制频率), τ 是能级的最大寿命, $R = H/L$ 是快与慢无辐射弛豫产生的热量比;另一部分为试样内部的周期性热流扩散至固气界面导致气体压力的变化,从而使微音器检测到声信号这一过程(简称为热声转换过程)引起的相位,即

$$\Psi_2 = \pi/4 + \arctan[1 + 2/(\beta\mu_s)], \quad (3)$$

式中 μ_s 为试样的热扩散长度。由(3)式可知,当吸收系数很大 $[1/(\beta\mu_s) \rightarrow 0]$ 或很小 $[1/(\beta\mu_s) \rightarrow \infty]$ 时,相角均不随吸收系数变化,分别为 $\pi/2$ 和 $3\pi/4$ ^[15]。

3 系统的硬件优化

3.1 系统的基本结构

光声光谱系统的组成如图1所示。500 W氙灯发出的复色光经过单色仪后成为单色光,经斩波器

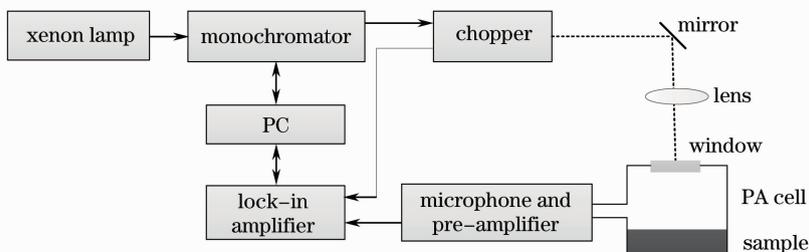


图1 系统的结构示意图

Fig. 1 Schematic of the system structure

进行振幅调制以后,穿过透明的石英窗,照射在密闭光声(PA)池中的试样上。试样将吸收的光能部分或全部转化为热能,周期性地加热池中的空气,引起声振动。产生的声信号被密封在光声池侧壁中的微音器检测。微音器检测到的声信号,经前置放大器放大后送锁相放大器,得到与参考频率(斩波器的调制频率)相同频率的光声振幅信号和相位信号。计算机(PC)借助 LabVIEW 软件,驱动单色仪改变波长,并从锁相放大器读取信号的振幅和相位,绘制光声振幅谱和相位谱,并存储数据。

3.2 对系统硬件的改进

使用已有氙灯(畅拓科技,CHF-XM500)、单色仪(赛凡光电,7IMS1021)、斩波器(Stanford,SR540)和锁相放大器(Stanford,SR830),并参照有关文献设计加工黄铜光声池^[16],光声光谱系统如图2所示。为避免杂散光对测量的干扰,通常将微音器单独放在与样品室相连的一个小室中。在光声

池侧面开孔,将微音器密封在其中,样品室与微音器室通过一个直径为1 mm,长度为10 mm的小孔相连。国内自主研发的光声光谱仪的微音器往往由设计者自己制作,其稳定性和频率响应范围与专业传声器有较大差距,为此购买了性能稳定、价格适中的专业传声器及其前置放大器(声望公司,MPA251)来检测声信号。与自行研制的微音器相比,商品化的仪器缩短了研制周期,其频率响应范围宽(最低可达8 Hz),性能更稳定。为了保证气密性,用胶将微音器密封在光声池侧孔中。以往文献中进行光声相位分析,是通过示波器或锁相放大器首先获得同相信号 $P \cos \Psi$ 和交相信号 $P \sin \Psi$,再经 A/D 转换器由微机采集并进行处理而得到光声振幅 P 和相位 Ψ 信号的^[17]。采用斯坦福的 SR830 数字锁相放大器,可直接输出待测信号的振幅 P 和相位 Ψ 。后者是一体化的设计,其整体性能优于几个部件的组合效果。

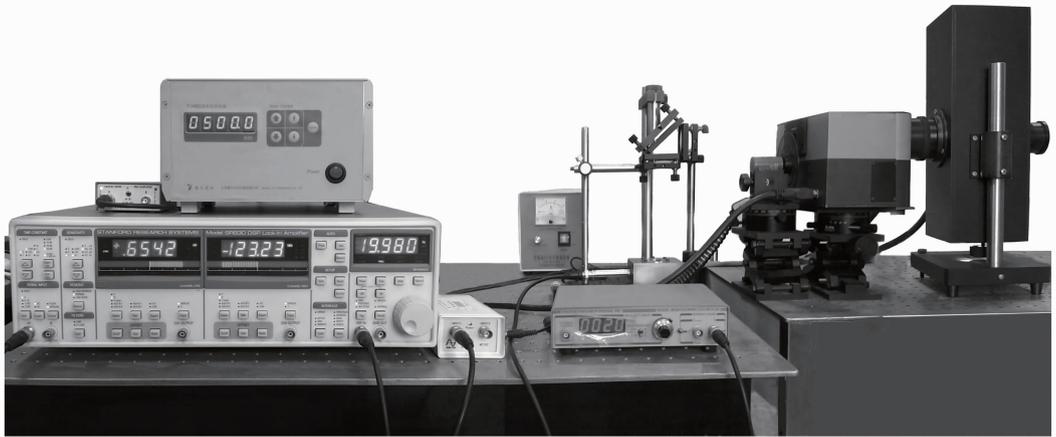


图2 带有相位谱测量功能的光声光谱系统实物图

Fig. 2 Picture of photoacoustic spectroscopy system with phase spectrum measurement function

4 系统的软件设计

传统的光声光谱仪使用单片机记录和存储数据,用 X-Y 记录仪绘制光声谱图^[17-18],现在这些功能都可以通过计算机软件加以实现。采用虚拟仪器软件 LabVIEW 来实现光声光谱仪中各部件的控制、测试、数据采集及处理,使测量更为方便,系统的自动化程度更高。

虚拟仪器(VI)这一概念最早由美国 NI 公司提出,它突破了以往传统仪器的特点,以通用计算机和标准总线技术为平台,将仪器硬件搭载到计算机上,利用相应的软件完成控制、测试及数据处理和显示等任务,实现了以计算机为基础的数字化采集测

试分析系统^[19]。LabVIEW 作为 NI 公司开发的一款虚拟仪器软件,采用图形化的编程语言——G 语言,并提供了很多外观与传统仪器类似的控件,通用性强、兼容性好,已广泛地被工业界、学术界和研究实验室所接受^[20-21]。

本文设计的可同时测量光声振幅谱和相位谱的光声光谱系统采用 LabVIEW 8.5 软件作为虚拟仪器平台,利用串口总线实现对仪器的控制和通信。系统软件需实现的功能主要有:系统参数设置(包括单色仪和锁相放大器的接口设置、扫描的起止波长设置、步进波长设置等)、仪器的控制与数据采集(包括用计算机驱动单色仪改变波长,从锁相放大器采集光声振幅和相位信号)及功能处理(包括初始化数据,对光声

振幅谱进行炭黑归一化及存储数据等功能)等。相应地,主 VI 程序框图分为参数输入与设定、仪器控制与数据采集及功能处理三个模块,如图 3 所示。给程序中的变量赋初值,使系统初始化。单色仪和锁相放大器的端口、波特率、结束位和数据位等参数已事先设定好,无需用户自己设置,用户只需关注跟光声光谱测量相关的参数设置,如扫描起止波长、步进波长等。仪器控制与数据采集模块采用顺序结构、条件结构和 While 循环加以实现。以用户输入的参数和当前波长为局部变量在程序内部进行数据传递。功能处理模块根据用户需要判断是否需对光声振幅数据进行炭黑归一化处理,若需要,则导入相同实验条件下已测量的炭黑光声振幅谱,并与当前测量的光声振幅谱进行除法运算,以得到试样的炭黑归一化光声振幅谱。如果只是测量炭黑的光声谱,则可以省略这一步。波长扫描结束后,弹出对话框,让用户指定文件名及其保存路径,以便今后调用(软件默认的数据存储格式为 XLS 格式)。

前面板为用户提供人机交互界面,该光声光谱系统的主 VI 前面板如图 4 所示。前面板主要划分为两个功能区:谱图区和数据区。谱图区实时显示试样的归一化光声振幅谱和光声相位谱,数据区包括系统参数设置、当前数据显示及停止按钮。由于波长越短的单色光,其光子能量越大,为了避免前面的测量对后续测量造成干扰,通常波长扫描方向为从长波向短波方向扫描,因此客观上要求起始波长要大于终止波长。根据实验中选用的氙灯和单色仪,系统扫描范围设定在 350~1000 nm 之间,最小步进波长为 0.1 nm。斩波器的斩波频率在 0~2000 Hz 可调,考虑到所用传声器的频率响应特性,这套光声光谱系统的实际斩波频率在 10~2000 Hz 可调。计算机实时获取并显示当前波长、当前振幅和相位值。如果在测量过程中发现任何问题,可以随时点击停止按钮暂停程序。

5 系统性能的鉴定

5.1 炭黑的光声振幅谱与相位谱

设定其单色仪的波长扫描范围为 350~1000 nm,步进波长为 1 nm,斩波器的频率为 20 Hz,锁相放大器的时间常数为 1 s,测量了炭黑的光声振幅谱和相位谱,其结果如图 4 所示。炭黑是强吸收体,其光声振幅谱是光源(氙灯与单色仪组成的整体)的相对功率谱,而其相位接近为一常数。实验测得的炭黑光声振幅谱(左图)与文献报道^[22-23]一致。炭黑的光声相位(右图)

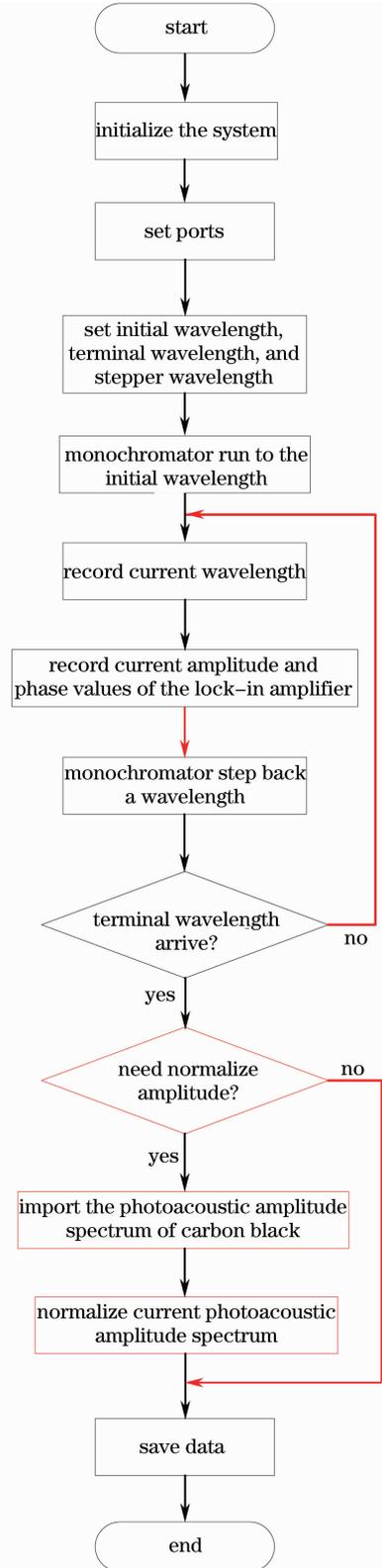


图 3 主 VI 程序流程图

Fig. 3 Flow diagram of the main VI program
在 $-131^{\circ} \pm 3^{\circ}$ 范围内,接近常数,这与本文第 2 节理论结论一致。但是,此处测量的炭黑相位不等于 $\pi/2$,这与系统的构造和组成有关。通常系统构造不同,光声相位的延迟也不一样。

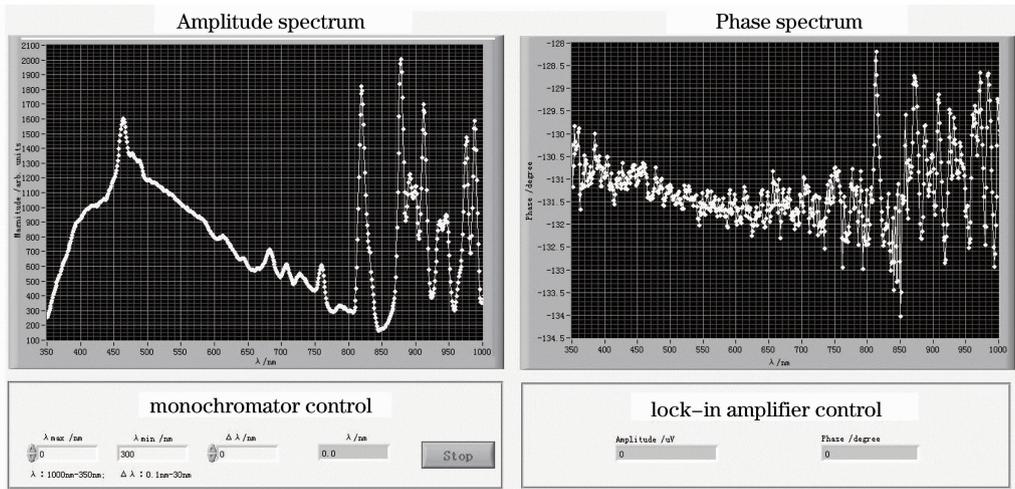
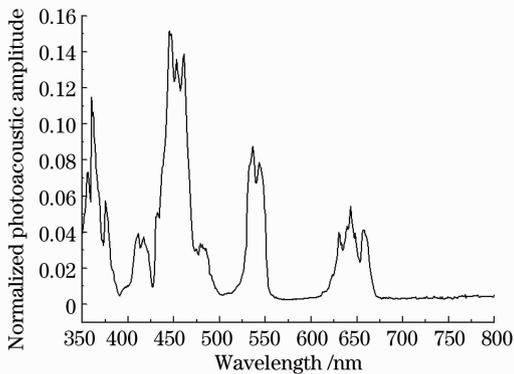


图 4 带有相位谱测量功能的光声光谱系统前面板

Fig. 4 Front panels of photoacoustic spectroscopy system with phase spectrum measurement function

5.2 Ho_2O_3 的归一化光声振幅谱

用这套光声光谱系统测量了 Ho_2O_3 (国药集团化学试剂有限公司) 的归一化光声振幅谱。实验中设定单色仪的波长扫描范围为 350~800 nm, 步进波长为 1 nm。设定斩波器的频率为 20 Hz, 锁相放大器的时间常数为 1 s。实验测得 Ho_2O_3 的归一化光声振幅谱如图 5 所示, 其形状和特征峰的位置均与文献报道的结果吻合^[24-25]。

图 5 Ho_2O_3 的归一化光声振幅谱Fig. 5 Normalized photoacoustic amplitude spectrum of Ho_2O_3

6 光声相位谱与振幅谱相结合的实例

用这套光声光谱系统分别测量了喜树碱(CPT)与羟丙基- β -环糊精(HP- β -CD)摩尔比为 1:1 的混合物和包合物样品的归一化光声振幅谱与相位谱。喜树碱、HP- β -CD 及二者的混合物和包合物样品均由兰州大学药学院提供。实验中设定单色仪的波长扫描范围为 350~1000 nm, 步进波长为 1 nm, 斩波器的频率为 20 Hz, 锁相放大器的时间常数为 1 s。

测量结果如图 6 所示, 其中图 6(a) 是混合物与包合物的归一化光声振幅谱, 图 6(b) 是混合物与包合物的相位谱。对比图 6(a)、(b) 可以看到: 图 6(a) 中两条曲线差异较小, 而图 6(b) 中两条曲线却有着显著的区别。

图 6(a) 显示混合物样品在 750 nm 处有吸收峰, 而包合物样品在 850 nm 有吸收峰。测量喜树碱和 HP- β -CD 的归一化光声光谱, 结果显示 HP- β -CD 在所测量波段没有特征吸收, 750 nm 处的吸收峰是喜树碱的特征吸收峰。喜树碱与包合物吸收波长不同, 反映出二者在电子能级跃迁上的差异, 预示着二者微观结构很可能存在差异。

图 6(b) 显示两种样品的相位谱有显著区别: 在 720~900 nm 之间两种样品的相位差异最为显著, 混合物的相位始终滞后于包合物的相位, 最大相位差接近 10° (在 840 nm 附近)。此外, 两种样品在 575、665、910 nm 附近相位也有明显不同。对比图 6(a) 所示两种样品在 720~900 nm 之间的归一化光声振幅谱可知, 这一波段是两种样品的特征吸收区, 在这一区域两种样品的吸收系数不同。由本文第 2 节光声系统检测原理可知, 吸收系数不同引起的相位差异, 是热声转换过程的特征。两种样品在 720~900 nm 之间相位的巨大差异反映出二者热学性质不同。而在 575、665、910 nm 三个波长附近两种样品的相对吸收系数并无显著变化, 因此可以推测这三个波长处相位的差异主要来自于光热转换过程。由(2)式可知, 两种样品相位的差异预示着二者在能级寿命和无辐射弛豫的快慢等方面存在差异。

上面对两种样品的光声振幅谱和相位谱的对比分析结果显示:光声振幅谱提供了两种样品在电子能级跃迁上的信息,而光声相位谱则提供了两种样

品在热学性质、能级寿命和无辐射弛豫等方面的信息。因此,将光声相位谱与振幅谱相结合,可以获得试样更丰富的信息。

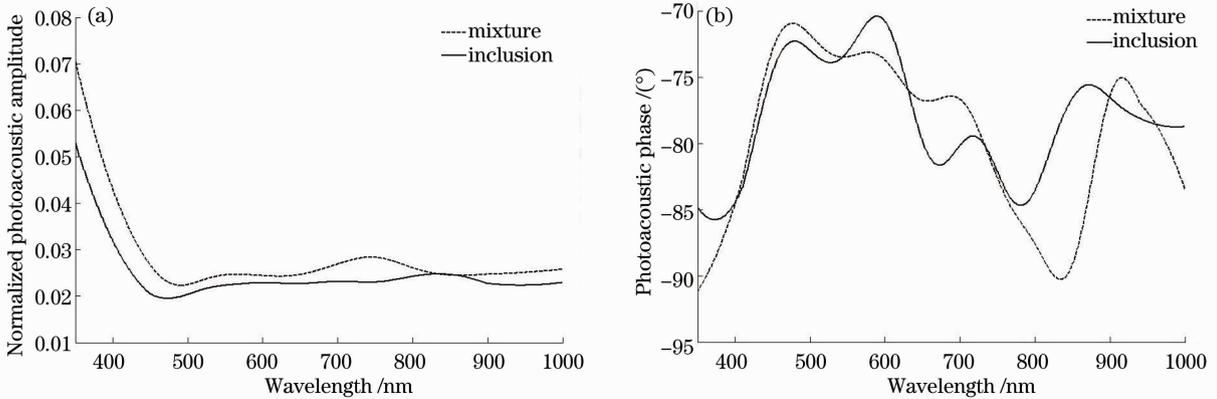


图 6 喜树碱与羟丙基- β -环糊精的包合物样品和混合物(摩尔比 1:1)样品的归一化光声振幅谱和相位谱。

(a)归一化光声振幅谱; (b)光声相位谱

Fig. 6 Normalized photoacoustic amplitude spectra and phase spectra of the mixture sample (molar ratio of 1:1) and inclusion sample of CPT and HP- β -CD. (a) Normalized amplitude spectra; (b) photoacoustic phase spectra

7 结 论

搭建了一套可同时测量光声振幅谱与相位谱的光声光谱测量系统。该系统增加了相位测量功能,优化了传统的气体-微音器光声光谱测量系统的硬件配置,实现了 350~1000 nm 范围的连续波长扫描,测量的最小步进波长为 0.1 nm,调制频率的范围为 10~2000 Hz。该系统自动化程度高、人机界面友好,可通过仪器的前面板动态监控实验过程,并实时观察实验结果。用 $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$ 鉴定这套系统,测得的归一化光声振幅谱与文献结果一致。测量了喜树碱与羟丙基- β -环糊精的混合物样品与包合物样品的光声相位谱与归一化振幅谱,结果显示将光声相位谱与振幅谱相结合,可以获得试样更丰富的信息。

致谢 感谢兰州大学药学院提供喜树碱、羟丙基- β -环糊精、以及喜树碱与羟丙基- β -环糊精的包合物样品。

参 考 文 献

- 1 A Rosencwaig. Photoacoustics and Photoacoustic Spectroscopy [M]. New York: Wiley, 1980.
- 2 L Wang. Photoacoustic Imaging and Spectroscopy [M]. Boca Raton: CRC Press, 2009.
- 3 J Ryczkowski. Infrared photoacoustic spectroscopy in catalysis and surface science [J]. Applied Surface Science, 2010, 256(17): 5545-5550.
- 4 Zhang Yu, Tang Zhilie, Wu Yongbo, *et al.*. Study of various photoacoustic imaging methods [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(2): 020004.

张 宇,唐志列,吴泳波,等.多种光声成像方法研究[J].激光与光电子学进展,2012,49(2):020004.

- 5 C Haisch. Photoacoustic spectroscopy for analytical measurements [J]. Measurement Science and Technology, 2011, 23(1): 012001.
- 6 Li Li, Xie Wenming, Li Hui. Applications of photoacoustic spectroscopy in the field of modern biomedicine [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(10): 100008.
李 莉,谢文明,李 晖.光声光谱技术在现代生物医学领域的应用[J].激光与光电子学进展,2012,49(10):100008.
- 7 Su Qingde, Wu Ronghu. Progress in theories and applications on the chemistry of photoacoustic phase [J]. Progress in Chemistry, 2001, 13(2): 87-93.
苏庆德,伍荣护.光声相位理论及其在化学中的应用研究进展[J].化学进展,2001,13(2):87-93.
- 8 Y Yang, H Yang, H Wang, *et al.*. Study on the phase transition of lanthanide-doped titania nanoparticles by photoacoustic spectroscopy [J]. International Journal of Thermophysics, 2012, 33(10-11): 2173-2178.
- 9 R Thomas, J Pouch, Y Wong, *et al.*. Subsurface flaw detection in metals by photoacoustic microscopy [J]. J Appl Phys, 1980, 51(2): 1152-1156.
- 10 Su Qingde, Wang Qin, Yang Yuetao, *et al.*. Photoacoustic spectroscopy and relaxation processes of chlorophyll a [J]. Chemical J Chinese Universities, 1996, 17(3): 373-376.
苏庆德,王 勤,杨跃涛,等.叶绿素 a 的光声光谱及弛豫过程[J].高等学校化学学报,1996,17(3):373-376.
- 11 S Qingde, M Qinglu, P Long, *et al.*. An overview of the photoacoustic phase spectra of rare earth complexes [J]. Spectroscopy Letters, 1996, 29(8): 1685-1695.
- 12 A Rosencwaig, A Gersho. Theory of the photoacoustic effect with solids [J]. J Appl Phys, 1976, 47(1): 64-69.
- 13 W R Harshbarger, M B Robin. Opto-acoustic effect: revival of an old technique for molecular spectroscopy [J]. Accounts of Chemical Research, 1973, 6(10): 329-334.
- 14 A Mandelis, Y Teng, B Royce. Phase measurements in the frequency domain photoacoustic spectroscopy of solids [J]. J Appl Phys, 1979, 50(11): 7138-7146.

- 15 Wu Ronghu, Yuan Shoukang, Su Qingde. Studies on the theory and application of the photoacoustic phase of solid sample [J]. Chemical J Chinese Universities, 2000, 21(5): 698-701.
伍荣护, 宛寿康, 苏庆德. 固体样品的光声位相理论及应用研究[J]. 高等学校化学学报, 2000, 21(5): 698-701.
- 16 A Rosencwaig. Photo-acoustic spectroscopy of solids [J]. Review of Scientific Instruments, 1977, 48(9): 1133-1137.
- 17 Zhao Qingge, Qi Yongwu, Zou Zhongyu, *et al.*. Manufacture of the GS-1 photoacoustic spectrometer [J]. Analytical Chemistry, 1985, 13(9): 711-714.
赵清阁, 齐永武, 邹仲玉, 等. GS-1 型光声光谱仪的研制[J]. 分析化学, 1985, 13(9): 711-714.
- 18 Qiu Shuye, Zhang Shuyi, Hu Chunlian, *et al.*. Single-beam photoacoustic spectrometer [J]. Journal of Applied Sciences, 1986, 4(3): 207-212.
邱树业, 张淑仪, 胡春年, 等. 单光束光声光谱仪[J]. 应用科学学报, 1986, 4(3): 207-212.
- 19 Liao Kaijun, Liu Zhifei. Survey on virtual instrument technology [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2006, 25(2): 6-8.
廖开俊, 刘志飞. 虚拟仪器技术综述[J]. 国外电子测量技术, 2006, 25(2): 6-8.
- 20 Wang Shuiyu, Wang Xiaojuan. Seamless integration of LabVIEW and Matlab in the virtual instrument [J]. Computer Systems & Applications, 2012, 21(11): 123-126.
王水鱼, 王小娟. 在虚拟仪器中实现 LabVIEW 与 Matlab 的无缝链接[J]. 计算机系统应用, 2012, 21(11): 123-126.
- 21 Long Jingming, Zhou Weidong, Wu Zhiwei. A high sensitive spectral detection system of gaseous measurement based on LabVIEW [J]. Chinese J Lasers, 2012, 40(1): 0115003.
龙精明, 周卫东, 吴志伟. 基于 LabVIEW 的气体高分辨率光谱探测系统[J]. 中国激光, 2012, 40(1): 0115003.
- 22 A Rosencwaig. Photoacoustic spectroscopy of solids [J]. Opt Commun, 1973, 7(4): 305-308.
- 23 Wang Xidong, Huang Zuohua, Tang Zhilie, *et al.*. A practical photoacoustic spectroscopy experiment system [J]. Optical Instruments, 2006, 28(5): 52-56.
王习东, 黄佐华, 唐志列, 等. 实用光声光谱实验系统[J]. 光学仪器, 2006, 28(5): 52-56.
- 24 A Rosencwaig. Photoacoustic spectroscopy: new tool for investigation of solids [J]. Analytical Chemistry, 1975, 47(6): 592-604.
- 25 R E Blank, T Wakefield. Double-beam photoacoustic spectrometer for use in the ultraviolet, visible, and near-infrared spectral regions [J]. Analytical Chemistry, 1979, 51(1): 50-54.

栏目编辑: 史 敏