

高灵敏度的光声功率监测器

吴际华 吴宏岳
(华南师范大学物理系)

提 要

本文描述了一种以光声效应为基础的新型激光功率监测器,其光谱响应范围可从紫外到红外区。在可见光波段,监测器的响应率为 $26 \mu\text{V}/\mu\text{W}$,最小可探测功率达 $0.2 \mu\text{W}$,线性响应范围大于四个数量级。

一、引 言

本世纪70年代初以来,随着激光器件和压力传感器的发展,古老的光声效应又引起人们高度的重视,理论研究和实际应用都获得了迅速的发展。目前,光声探测技术已广泛应用于吸收光谱测量、痕量分析、分子弛豫过程的研究、材料特性的检测以及环境污染监测等各个领域^[1]。

现代光声理论^[2,3]表明,在出现非线性吸收之前,对于任何样品和任意形状的光声池,光声信号总是线性地正比于入射光束的功率(对连续波辐射)或能量(对脉冲辐射)。因此,本文试图探索光声效应的另一种应用——光声功率监测器。我们研制了一个碳黑作为吸收样品的高灵敏度的固体光声池,用于监测辐射功率,它比其它的功率计具有更宽的光谱响应范围和线性动态范围。本文首先阐述光声信号产生和探测的基本原理以及光声池的设计,然后给出光声池作为功率监测器的基本性能的测试结果。

二、基本 原理

光声功率监测器是将固体样品放在一个装有气体(如空气)和微音器的密封池内,即所谓光声池,其结构如图1所示。样品吸收

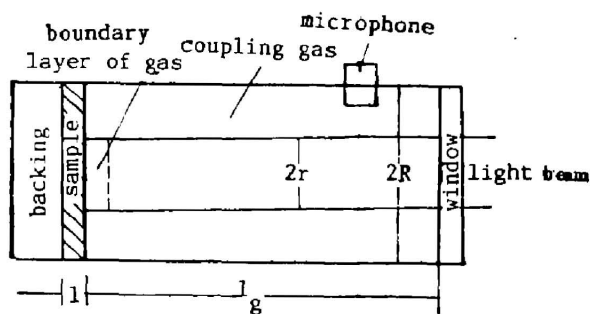


Fig. 1 Optoacoustic signal generation and detection for solid-state sample

调制的入射辐射将导致周期性加热,并传递给相邻的气体边界层(边界层的厚度约为气体的热扩散长度)。这一气体薄层由于受热周期性伸缩,相当于一个声活塞作用于气柱的其余部分而在池内形成声波,最后由微音器检测转换为电信号。

Rosenzwaig 等人^[2]用一维热流方程导出了池内压力响应的分析表达式。根据样品的几何长度 l 、热扩散长度 μ_s 和吸收

Table 1 The approximate expressions of O-A signal in various possible cases

No.	Case	Approximate expression for the O-A signal
1	$\mu_B > 1, \mu_s \gg 1, \mu_s > \mu_B$	$(1-i)\beta l(\mu_B/K_b)F$
2	$\mu_B > 1, \mu_s > 1, \mu_s < \mu_B$	$(1-i)\beta l(\mu_B/K_b)F$
3	$\mu_B > 1, \mu_s < 1, \mu_s \ll \mu_B$	$-i\beta\mu_s(\mu_s/K_s)F$
4	$\mu_B \ll 1, \mu_s \gg 1, \mu_s \gg \mu_B$	$(1-i)(\mu_B/K_b)F$
5	$\mu_B \ll 1, \mu_s < 1, \mu_s > \mu_B$	$(1-i)(\mu_s/K_s)F$
6	$\mu_B \ll 1, \mu_s \ll 1, \mu_s < \mu_B$	$-i\beta\mu_s(\mu_s/K_s)F$

长度 μ_B ($\mu_B = (1/\beta)$, β 为样品的吸收系数) 的相对大小, 表 1 给出了各种情况下的简化结果。其中热扩散长度 μ 和因子 F 定义为

$$\left. \begin{aligned} \mu &= \left(\frac{D}{\pi f} \right)^{1/2} = \left(\frac{K}{\pi f C \rho} \right)^{1/2}, \\ F &= \frac{\nu P I_0 \mu_g}{4\sqrt{2} T l_g} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 D 为热扩散率。 f 为斩波频率, K 为热传导率, C 和 ρ 分别为定容比热和密度, ν 为气体的绝热指数, I_0 为入射光的强度, P 和 T 分别为环境压力和温度, 脚标 s, b 和 g 分别表示样品、衬板和气体。 Tam^[1] 用简单直观的方法也给出类似的结果, 并指出考虑到光束未充满光声池和池中存在盲体积 V , 时, F 应修正为

$$\left. \begin{aligned} F &= \frac{\nu P I_0 S_g r^2}{T [R^2 l_g + (V_s/\pi)]}, \\ S_g &= \begin{cases} \mu_g, & \text{当 } l_g > \mu_g \\ l_g, & \text{当 } l_g < \mu_g \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

表 1 中相位因子 $(1-i)$ 或 $(-i)$ 表示光声信号相对于激励光束调制的时间滞后。从表 1 可见, 不管什么情况, 光声信号总是线性地正比于入射光束功率。特别是在表 1 中的情况 (4) 和 (5), 即对于非常黑的吸收体, 光声信号与样品的吸收系数无关, 这就表明据此原理制作的光声功率监测器将有宽广的光谱响应范围。

总之, 对于特定条件下运转的光声池, 光声信号 s 可简单地写为

$$s = kW, \quad (3)$$

式中 W 为入射光束的功率, k 是与池的几何结构、斩波频率、微音器灵敏度等有关的比例常数, 即光声功率监测器的响应率 ($\mu V/\mu W$), 它可通过定标确定。

三、光声池的设计

作为激光功率监测器的光声池, 设计原则是使之具有高的灵敏度和平坦的光谱响应。为此, 根据 (2) 式和表 1, 光声池的体积应尽可能小, 且应采用吸收系数很大的碳黑*作为样品, 以满足表 1 中的情况 4 或 5。

池的结构如图 2 所示。池体由黄铜制成, 样品室内径为 10 mm, 长度为 4 mm。样品室和微音器气室具有同样的体积, 二者由直径为 2 mm、长度为 30 mm 的小孔耦合。这种结

*本文中使用的碳黑样品是松香燃烧时熏在玻璃平板上的黑烟灰。

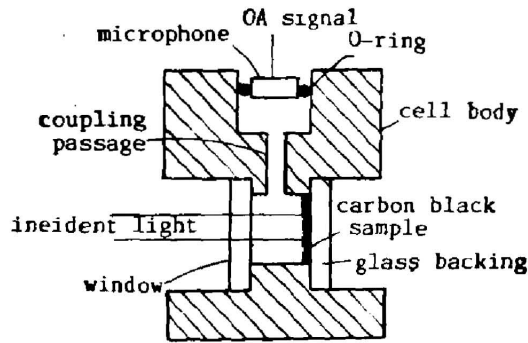


Fig 2 Schematic drawing of optoacoustic cell

构大大地减少到达微音器的散射光，同时可实现声共振运转[亥姆赫兹(Helmholtz)共振器]。为达到良好的隔声，池体应有适当的厚度。池的窗口用料由使用的波段而定，对于可见光可用 K₂O 玻璃，对 10.6 μm CO₂ 激光则用 ZnS。我们所用的微音器是国产 CRZ₂-15 型驻极体电容微音器，灵敏度为 20 mV/Pa。

四、性能试验结果

光声池作为功率监测器的基本性能用图 3 所示的实验装置作了测试。定标用的标准功

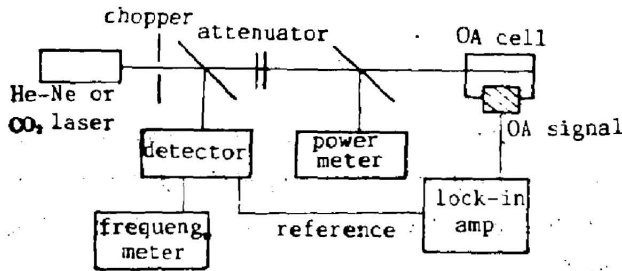


Fig. 3 Experimental arrangement for measuring properties of optoacoustic cell used as power monitor

率计是华南师范大学物理系无线电厂生产的 LPE-1 型功率/能量测试仪，光声信号由哈尔滨无线电六厂生产的 SBJ-1 型锁定比例计测量。

图 4 给出了光声池的频率响应曲线。斩波频率在 15~800 Hz 之间，它与理论预言的 f^{-1} 关系(见表 1 中情况(5))符合得很好。 $f < 15$ Hz 时，由于微音器灵敏度下降，曲线偏离 f^{-1} 关系。 $f \approx 1400$ Hz 时，出现共振峰是由于亥姆赫兹共振的缘故^[37]，这与预期结果($f_0 \approx 1420$ Hz)是一致的。从图 4 可见，光声池在低频运转时有较高的响应。当然，低频时电噪声和振动噪声也会相应增大。

图 5 是光声信号与入射光束功率(斩波前的光功率)的关系曲线。可见二者有很好的线性关系，动态范围大于四个数量级。从图 5 可求得 $f = 12$ Hz 时，0.6328 μm 和 10.6 μm 波长的响应率 k 分别为 $26.2 \mu\text{V}/\mu\text{W}$ 和 $9.2 \mu\text{V}/\mu\text{W}$ ，均方根误差小于 ±5%。在无光照情况下，测得背景噪声小于 5 μV，因此对波长为 0.6328 μm 的激光最小可探测功率(信噪比 1:1)可达 0.2 μW，而对波长为 10.6 μm 的激光可达 0.6 μW。可见后者比前者其最小探测功率要高三倍，除光声池窗口透射率有差别之外，其他原因尚未清楚，作者认为可能是样品对这两个波长的散射差别太大所致^[4]。

为进一步审查光声池响应率与波长的关系，我们用白炽灯光源与单色仪组合取代图 3

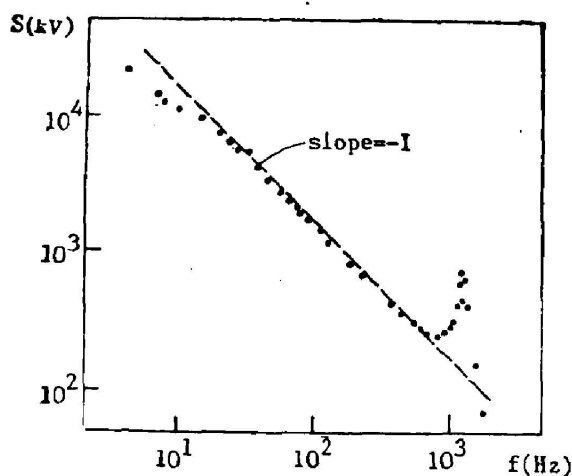


Fig. 4 Dependence of optoacoustic signal on chopping frequency

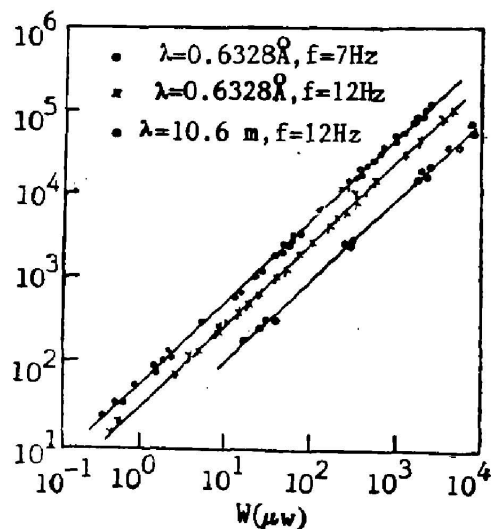


Fig. 5 Measured optoacoustic signal vs incident laser power characteristics

中的激光光源。其结果列于表 2。可见在所测量的波长范围内,池的响应率极为一致,均方根误差小于 $\pm 2\%$ 。

Table 2 Measured results of responsibility of O-A power monitor at various wavelengths ($f=12$ Hz)

Wavelengths (\AA)	3820	4100	4605	4800	5200	5500	6000	6500	7200
Responsibility ($\mu\text{V}/\mu\text{W}$)	27.0	26.9	26.4	26.6	26.5	26.1	26.5	27.4	27.2

五、讨 论

上述结果表明,光声功率监测器不仅具有较高的灵敏度、宽广的光谱响应范围和线性动态范围,而且具有结构简单、造价低、响应快、敏感面大以及在常温下运转等突出优点。因此,它在很多应用中(例如白光光源功率谱的测量,吸收测量等),用作监测光辐射的相对变化是十分方便的。若经严格定标,也可以用于光功率的绝对测量。

光声探测的主要噪声来源是外界声振动和地面的机械振动噪声。因此只有采用相位同步检测,才能获得较高的探测灵敏度。不过作为功率监测器使用,可采用较简单的单频锁相放大器,以降低其成本。当然,适当的防震和隔声措施,对于提高探测灵敏度是必要的。

最后顺便指出,对于脉冲光源,由于光声信号正比于入射脉冲能量,因此光声池也可用于监测脉冲激光的能量。

本工作承蒙周笛声、黄秀琼和解庭红等同志的帮助,在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] A. C. Tam; *Rev. Mod. Phys.*, 1986, **58**, No. 2 (Apr), 381~.
- [2] A. Rosenwaig, A. Gersho; *J. Appl. Phys.*, 1976, **47**, No. 1 (Jan), 64~.
- [3] A. 罗森威格[美];《光声学 and 光声谱学》, (科学出版社, 北京, 1986), 37.
- [4] Z. A. Yasa *et al.*; *Appl. Opt.*, 1982, **21**, No. 1 (Jan), 21~.

Opto-acoustic power monitor with high sensitivity

WU JIHUA AND WU HONGYUE

(Department of Physics, South China Normal University, Guangzhou)

(Received 23 March 1987; revised 19 June 1987)

Abstract

A new type of laser power monitor based on opto-acoustic effect is described in this paper. The spectral response ranges from UV to IR. In visible spectral region, the responsibility of the monitor is about $26 \mu\text{V}/\mu\text{W}$, the minimum detectable power is $0.2 \mu\text{V}/\mu\text{W}$, and the linear dynamic range is over 10^4 .