

文章编号: 1001-3806(2015)03-0295-05

## 基于锁相放大器和 LabVIEW 的激光功率测量系统

曾贤贵, 夏晶, 胡同欢, 杨青林

(湖南大学 物理与微电子科学学院, 长沙 410082)

**摘要:** 为了降低激光噪声对光学实验的影响, 采用了锁相放大器配合光学斩波器进行降噪。斩波器将激光调制成某一特定的频率, 并把该频率传送到锁相放大器作为参考信号, 锁相放大器再利用相干检测的方式提取出有用信号。为了减轻实验过程中操作员的劳动, 使用 LabVIEW 平台开发了一套自动化软件系统, 实现了实验操作和数据记录的自动化, 极大地简化了操作流程。结果表明, 与直接使用功率计测量激光强度的方法相比, 该方法测量噪声从 9.1% 降低到 4.7%; 与人工记录数据相比, 使用自动化软件系统节约了一半以上的实验时间。

**关键词:** 光电子学; 降噪; 锁相放大器; LabVIEW 软件; 激光功率

**中图分类号:** TN247

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.03.002

## Laser power measurement systems based on lock-in amplifiers and LabVIEW

ZENG Xiangui, XIA Jing, HU Tonghuan, YANG Qinglin

(School of Physics and Microelectronics Science, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** In order to reduce the impact of noise on laser optical experiments, a lock-in amplifier and an optical chopper were used. The laser was modulated at a specific frequency by the chopper and the frequency was sent to the lock-in amplifier as a reference signal. The useful signal was extracted with the lock-in amplifier based on the coherent detection method. In order to relieve the operator's labor during experiments, an automatic software system under LabVIEW software platform was developed to operate the experiments and record data automatically, which greatly simplified the operation process. The results show that measurement noise of this method reduced from 9.1% to 4.7% compared with laser intensity measurement with a power meter directly. The automatic software system saves more than 50% of time compared with manual recording of data.

**Key words:** optoelectronics; noise reduction; lock-in amplifier; LabVIEW software; laser power

### 引言

在  $z$  扫描和抽运探测等多个激光实验中, 常需测量激光的相对强度<sup>[1]</sup>。  $z$  扫描实验中, 将被测材料放在光路中, 移动被测材料, 测量其在不同位置时透射的激光强度占激光总强度的比例<sup>[2]</sup>。抽运探测则是改变探测光相对于抽运光的时间延迟, 通过测量探测光透射某材料后的激光相对强度来分析该材料的特性<sup>[3]</sup>。而由于温度和电压波动等噪声干扰, 激光源的输出功率存在较大抖动。这种抖动与光路、电路中的其它噪声叠加, 给实验结果带来较大误差。以抽运探测技术为例, 若探测光相对于抽运光的延时变化较小, 则透射率的变化也较小。若噪声的强度超过透射率的变化, 则探测信号就淹没在噪声之中。

因此, 需要采用一种方式降低噪声对实验结果的影响<sup>[4]</sup>。使用性能较好的光电探测模块<sup>[5]</sup> 能够有效地降低电路噪声。若要滤除激光源噪声, 一种可行的方案是在电路中加入窄带滤波器<sup>[6]</sup>。若信号的频率落在窄带滤波器的通频带中, 则可以滤除部分噪声。但此种方式在实际操作中有较大困难。首先, 滤波器  $Q$  值无法做到太高, 一般在 100 左右。对于 1kHz 的中心频率, 其通频带宽度大约为 10Hz; 其次, 窄带滤波器的中心频率难以调节, 且容易随着温度的变化而变化。而锁相放大器利用相干检测的原理, 将  $Q$  值提高到  $10^7$  量级。对于 1kHz 的中心频率, 其通频带宽度只有 0.1mHz; 且锁相放大器能自动锁定信号的频率<sup>[7]</sup>, 有效地解决窄带滤波器中心频率不易调节的问题。

在一次实验中往往需要多达上百次测量激光的相对强度。若手动记录每一次测量的结果, 在增加繁重枯燥劳动的同时还容易带来错误。因此, 计算机自动化数据采集显得十分必要。自动化数据采集软件可以使用 C++ 等程序语言, 但该语言学习难度较大, 不利

作者简介: 曾贤贵 (1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事光电技术的研究。

E-mail: zengxianguai90@163.com

收稿日期: 2014-04-15; 收到修改稿日期: 2014-05-06

于非计算机软件专业人士使用。VB 或 Delphi 对相应的硬件支持不够。LabVIEW 是美国国家仪器公司开发的一款图形化编程语言,程序源代码类似流程图,易于掌握和阅读。且美国国家仪器公司开发了大量的通讯或接口转换硬件,与 LabVIEW 相辅相成。本文中在 LabVIEW 平台下,开发了一套自动化控制软件,计算机与实验设备使用通用接口总线 (general-purpose interface bus, GPIB) 和串口完成通讯,这大大简化了锁相放大器的操作,并且自动记录实验数据,避免了人工抄写出错的可能。

## 1 降噪原理分析

### 1.1 噪声分析

本实验中使用脉冲激光源,理想情况下各个脉冲的强度相等。实际上,由于各种噪声的影响,脉冲间存在较大的抖动。经分析,噪声的来源<sup>[8]</sup>主要有以下几个方面:(1)光源噪声:机械振动、气压、温度以及电源电压的波动等因素,导致激光器输出的锁模脉冲序列发生波动,从而引起脉冲强度的变化;(2)光路噪声:激光经过较长的路径才从光源室引入到试验台,其中使用了多面反射镜、衰光镜和分光镜,多次反射相干效应和光束畸变以及环境中的噪光,都引入了新的噪声;(3)电路噪声:激光被探头探测接收,放大电路放大,

不可避免地引入了电路中的噪声。包括热噪声、 $1/f$  噪声、产生复合噪声、散粒噪声等<sup>[9]</sup>。

虽然存在各种噪声,但上述噪声随机产生,属于白噪声或者低频有色噪声。低频噪声一般与信号的频率相差较远,很容易被相敏检波器滤除。白噪声功率在各频谱均匀分布,因此在信号频率附近的噪声强度并不大。若只检测与信号频率相同的成分,则可滤除了大部分噪声。

### 1.2 理论分析

锁相放大器利用相干检测的原理,从强大的背景噪声中检测到微弱的信号<sup>[10]</sup>。它将带噪声的输入信号与参考信号相乘,只检测输入信号中与参考信号频率相同的成分,滤除其它频率<sup>[11]</sup>。本文中使用美国 Stanford Research Systems 公司的 SR850 锁相放大器,图 1 是其参考手册上提供的原理框图。输入信号可以从 A、B 双端口差分输入,也可单端输入。经过 50Hz/60Hz 带阻滤波器和 100Hz/120Hz 带阻滤波器,滤掉工频及其二次谐波。鉴相器和锁相环锁定外部输入参考信号的相位及频率(若使用外部参考频率,则内部振荡器不起作用),经过相移后送至两个相敏鉴波器。经过低通滤波器及其它相应运算输出处理结果。参考信号可以输出为正弦信号或者晶体管-晶体管逻辑电平 (transistor-transistor logic, TTL)。

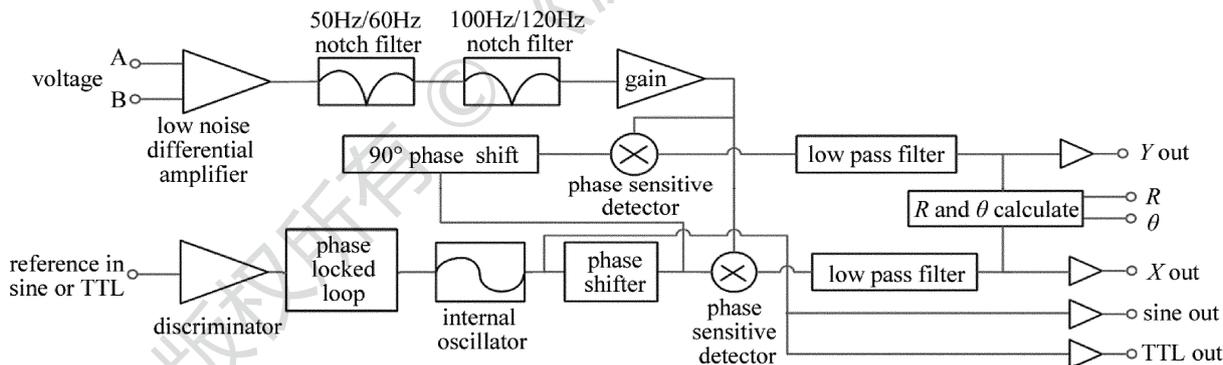


Fig. 1 Functional module of SR850 lock-in amplifier

输入电压信号为  $F_s(t) + F_n(t)$ , 其中  $F_s(t)$  为有用电压信号,  $F_n(t)$  为噪声电压, 参考电压信号为  $F_{ref}(t)$ 。设  $F_s(t) = V_s \sin(\omega_s t + \theta_s)$ ,  $F_{ref}(t) = V_{ref} \sin(\omega_{ref} + \theta_{ref})$ 。其中  $V_s$  和  $V_{ref}$  分别表示输入信号和参考信号的电压幅值。噪声频谱无限宽, 此处以一个频率为例, 设  $F_n(t) = V_n \sin(\omega_n + \theta_n)$ , 其中  $V_n$  表示噪声信号的电压幅值。

采用电压单端输入, 有用信号与参考频率相乘如下式所示:

$$F_s(t)F_{ref}(t) = V_s \sin(\omega_s t + \theta_s) V_{ref} \sin(\omega_{ref} + \theta_{ref}) = \frac{1}{2} V_s V_{ref} \cos[(\omega_s - \omega_{ref})t + (\theta_s - \theta_{ref})] -$$

$$\frac{1}{2} V_s V_{ref} \cos[(\omega_s + \omega_{ref})t + (\theta_s + \theta_{ref})] \quad (1)$$

噪声与参考频率相乘如下式所示:

$$F_n(t)F_{ref}(t) = V_n \sin(\omega_n t + \theta_n) V_{ref} \sin(\omega_{ref} + \theta_{ref}) = \frac{1}{2} V_n V_{ref} \cos[(\omega_n - \omega_{ref})t + (\theta_n - \theta_{ref})] - \frac{1}{2} V_n V_{ref} \cos[(\omega_n + \omega_{ref})t + (\theta_n + \theta_{ref})] \quad (2)$$

由于参考信号的频率与有用信号的频率严格一致(在下面会有叙述), 因此  $\omega_s = \omega_{ref}$ 。而一般的  $\omega_n \neq \omega_{ref}$ , 故(1)式和(2)式只有一项为直流信号, 即  $\frac{1}{2} V_s V_{ref} \times$

$\cos\theta$ (该式即为图 1 中的  $R$ , 而  $\theta = \theta_s - \theta_{ref}$ , 为有用信号与参考信号的相位差), 其余信号均为交流值。该直流信号与  $V_s$  成正比。低通滤波器一滤除交流信号, 并通过其它相关计算可得到  $V_s$ 。

两个相敏鉴相器输入的参考频率相差  $90^\circ$ , 因此得到的两个输出量正交, 它们分别为  $X = V_s \cos\theta, Y = V_s \sin\theta$ 。计算输入信号的大小  $R = \sqrt{X^2 + Y^2}$ , 该值不依赖锁相参考信号与有用信号之间的相位差, 若要求得相位差, 可通过公式  $\theta = \arctan \frac{Y}{X}$  计算<sup>[12]</sup>。

## 2 实验过程

### 2.1 光路搭建

传统上, 欲测量透射或者反射某一材料的激光强度, 常使用功率计<sup>[13]</sup>。图 2 是简化了的实验光路, 脉冲激光经过衰减后打在被测材料上。光电探头将激光转换为电信号<sup>[14]</sup>, 使用功率计测量激光的强度。

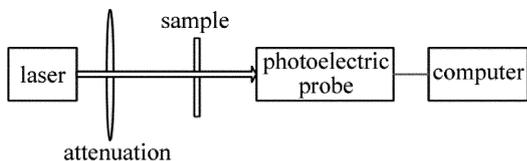


Fig. 2 Light path of traditional laser power measurement

功率计本身的精度可以不断提高, 可是却无法消除光源、光路以及电路中的噪声对测量结果带来的影响。若激光功率的抖动比较大, 实验中对测量精度要求较高, 传统的方法则显得无能为力。

本实验中使用 Coherent 公司的飞秒激光器, 实际测量发现其噪声高达 10%。图 3 是将光电探头输出的模拟信号直接输入示波器观察到的波形, 肉眼即可观察到脉冲高度的参差不齐。光电探头的频率响应远低于飞秒量级, 因此可以看到拖尾效应。

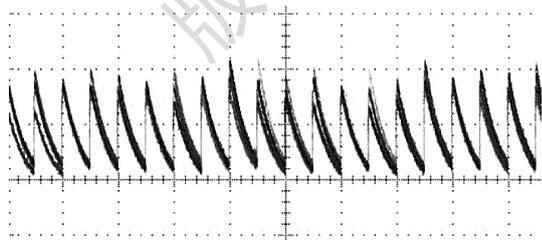


Fig. 3 Laser pulse observed with an oscilloscope

为了提高精度, 本实验中在传统光路的基础上增加光学斩波器, 改功率计为锁相放大器检测激光强度, 并使用计算机自动控制实验平台, 如图 4 所示。光学斩波器相当于一个光开关, 将激光按照一定频率调制, 同时输出该调制频率作为参考信号, 保证有用信号与参考信号的频率严格一致。

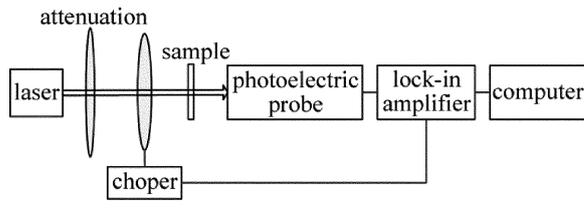


Fig. 4 Light path access of a lock-in amplifier

### 2.2 数据自动化采集

LabVIEW 软件的作用是控制锁相放大器等电子设备、测量激光的强度、记录数据并保存到硬盘的指定位置<sup>[15]</sup>。当用户点击软件前面板“开始测量”, 软件才运行, 否则处于空闲状态。这种处理方式大大降低了计算机系统的资源消耗率。测量前首先通过锁相放大器前面板简单设置“**AUTO PHASE**”, “**AUTO SCALE**”, “**AUTO GAIN**”, “**AUTO RESERVE**”等。其它复杂的设置由软件以指令的形式完成, 如图 5 所示。

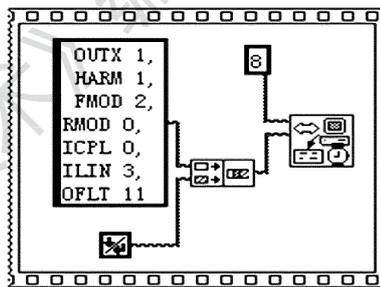


Fig. 5 Basic setting of a lock-in amplifier

计算机与锁相放大器通过 GPIB 接口通讯, 地址为 8。软件中指令的解释如下: **OUTX 1**: 将数据输出端口设置为 GPIB; **HARM 1**: 将检测频率设置为参考信号的一次谐波; **FMOD 2**: 将参考频率设置为外部输入; **RMOD 0**: 将动态存储设置为最大; **ICPL 0**: 将耦合方式设置为交流电 (alternating current, AC) 模式; **ILIN 3**: 开启 50Hz 和 100Hz 带通滤波器; **OFLT 11**: 将低通滤波器时间常数设置为 3s。

测试开始后, 便需要把测量的数据读取到计算机, 如图 6 所示。首先将指令“**OUTP? 3**”发送到锁相放大器, 查询测量数据是否有效。若有效则通过 GPIB 端口读取到计算机。数据是字符串格式, 转换为数值格式可以显示在软件前面板的波形图表以及数值控件上。

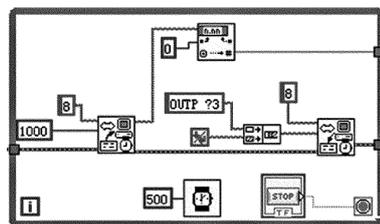


Fig. 6 Data recording and format conversion

读取到的数据需要保存到磁盘。图 7 为数据保存的程序片段,可以指定文件保存位置,自由设置文件名,默认保存为 txt 格式。软件在实验一开始便要求实验者指定数据的保存位置,与试验结束后选择保存位置的方式相比,该方式的优点在于可以避免由于试验时间过长而使实验员忘记保存数据。

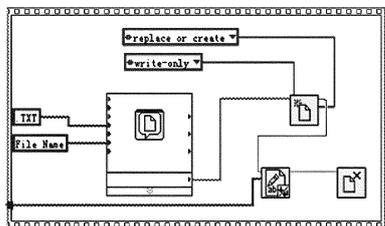


Fig. 7 Data saving

### 3 实验结果

激光经过衰减后,照射在光电探头上。多次旋转衰光镜,分别使用功率计和锁相放大器测量激光相对强度。结果表明,两种方法测量激光的相对强度一致。以下着重分析锁相放大器的降噪效果。固定衰光镜,分别使用两种方式测量激光相对强度各 60 次,测量结果由软件自动记录。为了使两组数据具有可比性,将原始数据等比例化归到 1 附近。表 1 和表 2 中分别是使用功率计和锁相放大器测量的结果。

Table 1 Measurement data with a power meter

intensity of laser measured for 60 times with a power meter					
1.030439	0.992703	0.996557	0.950289	1.007086	1.041128
1.037374	0.988599	1.004234	0.963013	1.019962	1.023288
1.041399	0.983621	0.998424	0.970517	1.007978	1.002397
1.034007	0.986840	0.975548	0.974296	0.985784	1.032231
1.016296	0.985934	0.981651	0.968423	0.988822	1.041089
0.997856	0.979244	0.985111	0.964702	1.010039	1.039149
0.993145	0.979162	0.991013	0.988314	1.024922	0.997879
0.997113	0.989679	0.991023	0.998728	1.036479	0.987995
0.999067	0.975941	0.985243	1.002661	1.033130	1.002868
0.999837	1.004550	0.969125	1.014724	1.036190	0.995184

Table 2 Measurement data with a lock-in amplifier

intensity of laser measured for 60 times with a lock-in amplifier					
1.023317	0.989519	0.996383	0.988824	1.028182	0.995688
1.020536	0.991517	0.995688	0.994298	1.026097	0.992212
1.015758	0.993602	0.994298	1.001943	1.024012	0.990127
1.008807	0.994298	0.991517	1.007417	1.019841	0.988824
0.999858	0.994298	0.988824	1.013673	1.014368	0.986739
0.992212	0.995688	0.986739	1.019841	1.010197	0.986044
0.988129	0.996383	0.984653	1.024012	1.006027	0.986044
0.986044	0.996383	0.982568	1.026792	1.003247	0.986044
0.986044	0.996383	0.983263	1.028790	1.001248	0.988824
0.987434	0.996383	0.985349	1.029485	0.999163	0.990127

衰光镜没有旋转,激光的功率保持不变。如果处于没有噪声的理想状态,两个表中的每一个数据都将一样。由于噪声的干扰,实际的测量值会在一定范围内波动。为了比较两种方法的降噪效果,需要计算这两种方法各自的波动情况,最大值和最小值以及方差能够较好地体现测量结果波动的情况。表 3 中给出了数据的分析指标。

Table 3 Comparison of measurement effect

	maximum	minimum	variance	error
power meter	1.041399	0.950289	0.000515	9.1%
lock-in amplifier	1.029485	0.982568	0.000199	4.7%

从表 3 可以看出,使用功率计测量激光的强度,噪声为 9.1%;使用锁相放大器测量激光的强度,噪声为 4.7%。这说明使用锁相放大器测量有明显的降噪效果;使用功率计测量激光强度,实验数据的方差为 0.000515,使用锁相放大器测量的数据方差为 0.000199,说明测量的稳定性有明显的提高,这避免了测量数据的偶然性给实验结果带来的误差,有效地提高了实验精度。

### 4 结 论

采用锁相放大器,明显提高了激光强度的测量精度,使得实验数据更具可信度,对 z 扫描和抽运探测等光学实验的降噪具有较大的参考价值;利用 LabVIEW 平台开发自动控制与数据采集软件,极大地简化了实验的操作、提高了实验效率、避免了手动记录数据可能出现的错误。

#### 参 考 文 献

- [1] GOPINATH J T. Studies of third-order nonlinearities in materials and devices for ultrafast lasers [D]. Cambridge, Massachusetts, USA: Massachusetts Institute of Technology, 2005: 71-128.
- [2] SMEKTALA F, QUEMARD C, COUDERC V, et al. Non-linear optical properties of chalcogenide glasses measured by z-scan[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2000, 274(9): 232-237.
- [3] BORRI P, LANGBEIN W, MØRK J, et al. Heterodyne pump-probe and four-wave mixing in semiconductor optical amplifiers using balanced lock-in detection [J]. Optics Communications, 1999, 169(10): 317-324.
- [4] TANG J H. Theoretical analysis and experimental study on laser pulses noise[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2007: 5-33 (in Chinese).
- [5] JIANG H, WU H J, WU Y F. A novel ultra-broadband photoelectric detection module[J]. Laser Technology, 2013, 37(1): 16-19 (in Chinese).
- [6] ZHOU B, GAO Y, HE Y. Design of a narrow band FBAR band-pass filter[J]. Micronanoelectronic Technology, 2013, 50(8): 487-493 (in Chinese).
- [7] ZHANG D, LIU X H, ZHANG J L. Design of lock-in amplifier circuit and developed for weak signal detection[J]. Computer Engineering and Applications, 2013, 49(15): 210-214 (in Chinese).

- [8] YU H, JIAN T Ch, WANG H J. Noise analysis of photoelectric detection circuit and research on error compensation methods[J]. Modern Electronics Technique, 2011, 34(2): 195-201(in Chinese).
- [9] LI W H, ZHUANG Y Q, DU L, *et al.* Quantitative analysis of noise's linearity and Gaussianity in electronic devices[J]. Journal of Xidian University, 2009, 36(6): 1059-1062(in Chinese).
- [10] HAN X E, LI Zh, LIU L Y, *et al.* Application of SR850 lock-in amplifier in measurement of laser scattering intensity[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(12): 1059-1062 (in Chinese).
- [11] KANG Y T, HU X Y, WANG B W. Weak signal detection circuit based on lock-in amplifier [J]. Electronic Design Engineering, 2013, 21(6): 162-164 (in Chinese).
- [12] WANG Q. Application of controlling lock in amplifier is in the target laser scattering experiment on LabVIEW[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2006: 39-48(in Chinese).
- [13] ZHENG Zh W, ZHAO Ch J, LU Sh B, *et al.* Microwave and optical saturable absorption in graphene [J]. Optics Express, 2012, 20(21): 23201-23214.
- [14] ZHAO Zh W, ZHANG Y J, SHEN Ch. Design of a photoelectric conversion system for pulse laser fuze[J]. Laser Technology, 2012, 36(3): 326-329(in Chinese).
- [15] BI X L, ZHAO W L, ZHANG X G. Design of laser beam z-scan system based on LabVIEW[J]. Electro-Optic Technology Application, 2011, 26(1): 8-11 (in Chinese).

《激光技术》编辑部

版权所有 ©