

高分辨率的飞秒激光自动测试系统及其应用*

朱德瑞 赖天树 林位株 莫党

(中山大学物理学系, 广州 510275)

摘 要 报导了 IBM 计算机控制下的高时间分辨率的飞秒激光自动测试系统. 其时间分辨率小于 1 fs (光程分辨率 $0.084 \mu\text{m}$), 信号测量相对灵敏度达 10^{-6} , 采用集成多功能程序控制, 重复性和稳定性高, 适用于飞秒激光脉宽的自相关测量和飞秒泵浦探测实验.

关键词 超快现象, 自相关器, 时间分辨谱

分类号 O 433.54

自 80 年代以来, 随着对脉冲锁模环形染料激光器 (CPM) 和掺钛蓝宝石激光器及脉冲压缩技术的飞速发展, 人们获得了越来越短的脉冲激光源^[1~3]. 并把这种超快激光光源作为一种重要手段应用于超导体、半导体量子阱、超晶格、纳米材料、有机高分子等材料的超快动力学特性研究^[4~7]. 作为飞秒级时间分辨率的探测方法, 成为了这一研究领域的一个重要问题, 因为原来用于纳秒量级的高速示波器和皮秒量级的条纹照相机, 对于飞秒量级都遇到了困难. 飞秒级自相关测量技术在这一领域得到了很快发展. 我们在原来工作的基础上^[8]经过改进, 发展了一种时间分辨率小于 1 fs 的改进型自动化测试系统, 并应用于飞秒脉宽测量以及泵浦探测实验方面的研究.

1 系统组成

1.1 硬件组成

系统由一 IBM 微机控制, 通过自行设计的 I/O 卡实现微机与系统的接口. 系统硬件方框图如图 1 所示, 其中步进马达把主机发出的电信号转变为光学系统中导轨的平移运动; 而光电探测器把光学系统的光信号转变为电信号传回主机.

1.2 光学系统

系统装置如图 2 所示, 超快激光光源被一分束镜 M1 一分为二, 分别进入迈克尔逊干涉仪的两臂. 其中全反镜组合 M2 是固定不动的, 全反镜组合 M3 是安放在一精密导轨上的, 可以在步进马达的驱动下运动, 改变两束光之间的光程差. 全反镜 M4 可以平移来控制两束光的平行间距. S 为斩波器, 它是锁相放大器的相位基准. 分束镜 M5 分出了一束参考光到光电探测器 D1 作为锁相放大器的差分信号. 两束平行光束经凸透镜 L 聚焦

* 国家自然科学基金资助项目

收稿日期: 1995-03-23 朱德瑞, 男, 29 岁, 讲师

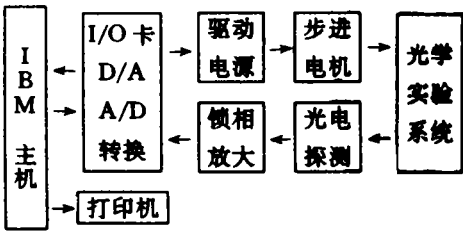


图 1 系统硬件方框图

Fig. 1 Architecture of hardware system

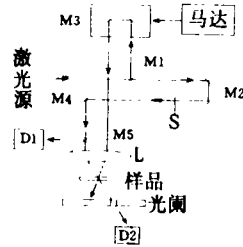


图 2 光学实验系统

Fig. 2 Optical experimental system

在样品（测量光源脉宽时用倍频晶体）上，在光阑后的 D2 测得透射光信号（有时需测样品的反射信号）。测得的信号被锁相放大器差分放大后经 I/O 卡 A/D 转换送入计算机处理。同时计算机信号经 I/O 卡的 D/A 转换后由驱动器送到步进马达驱动全反镜组合 M3 运动。

1.3 软件设计

为了接口方便，采用汇编语言与高级语言结合的混合编程方法设计程序。主程序用高级语言编写，方框图如图 3 所示。在“初始化”和“预处理”中，解决系统对硬件接口的识别及高级语言与汇编语言的接口问题，然后有一系列分支程序相应完成独立的任务。某些与接口有关的任务调用由相应的汇编语言子程序执行。

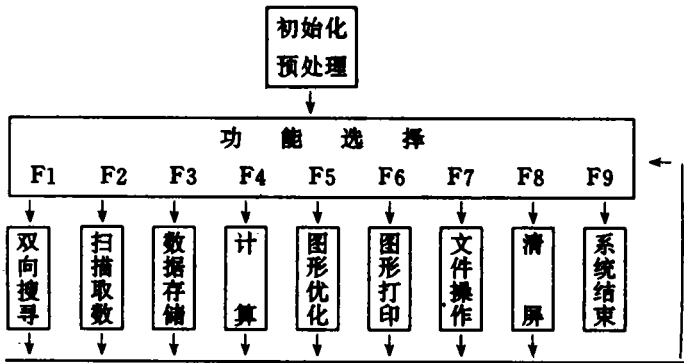


图 3 程序设计方框图

Fig. 3 Square diagram of program

1.4 系统分辨率及误差分析

系统的时间分辨率 δt 就是步进马达每转一步所产生的光学系统光程变化 δL 对应的时间变化量，即 $\delta t = \delta L / c$ ，其中 c 是真空中光速。我们所用精密导轨的马达每转 100 圈，导轨移动 1 mm。马达每步转动 1.5° ，即每转 240 步为一圈。有 $\delta L = 2 \times 1 \text{ mm} / (240 \times 100) \approx 0.084 \mu\text{m}$ ，其中系数 2 是因为光沿导轨往返实际走了双倍的距离。最后得到系统的时间分辨率 δt 约为 0.28 fs。

系统的误差主要来源于步进马达每步的随机误差和导轨螺距误差。所用的马达是国

产的，每步的相对误差为 1/3，即系统以最小分辨率工作时的相对误差是 1/3. 可以用马达细分方法和多次扫描平均来减小相对误差. 实际工作时可以在较大的分辨率下工作以便减小相对误差，如每 6 步测一数据时，分辨率为 1.67 fs 而相对误差为 1/18. 导轨螺距误差可以采用单向扫描来消除，而在双向扫描中通过软件补偿来消除.

1.5 系统灵敏度与系统测量速度

系统中采用了灵敏的光电探测器和锁相差分放大技术，极大地提高了信号放大倍数和信噪比，可以测到 10^{-6}W 量级的光信号变化.

系统的测量包括马达转动、暂停和计算机取数 3 个主要过程. 相对马达转动来说，取决于 A/D 转换时间和锁相放大器的时间常数的计算机取数几乎不花时间，所以测量速度主要取决于马达的转速. 马达的过快转动会产生振动，保证系统机械稳定条件下最快测量速度是每扫描 0.3~3 ps 一次花 46~127 s. 由于暂停占有一定的时间，扫描一次所花时间不随扫描宽度线性增加. 通过软件可以选择合适的测量速度和扫描宽度.

2 脉宽测量

CPM 激光器所产生的超短激光脉冲，中心在 620 nm. 对其脉宽测量，使用厚 0.3 mm 的 KDP 倍频晶体，采用非共线相位匹配设计，两束光聚焦后通过 KDP 晶体产生二次谐波信号，可在两基频光角平分线方向用光电倍增管探测. 由二次自相关函数

$$S(t_D) = \int_{-\infty}^{+\infty} I_1(t) I_2(t+t_D) dt \tag{1}$$

式中 t_D 是 I_2 相对于 I_1 的延迟时间，可以由实验测得 $S(t_D)$ 函数关系. 图 4 是实验结果，圆点是实验中系统计算机采集到的数据点，每 24 步取一个数据，一次扫描完成，其全半高宽度 $\Delta t_D = 28.8 \text{ fs}$. 采用激光脉冲光强的双曲正割分布函数近似（实验结果和理论拟合符合得很好）

$$I(t) \propto \text{sech}^2\left(\frac{1.76t}{\Delta t}\right) \tag{2}$$

其中 Δt 为激光脉冲的全半宽度，有 $\Delta t = \Delta t_D/1.55$. 最后，可以得到激光脉冲的全半宽度为 18 fs [3].

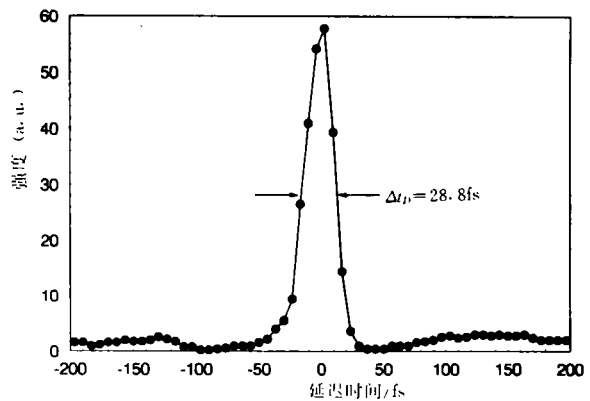


图 4 超快激光脉冲的强度自相关曲线

Fig. 4 Intensity autocorrelation trace of a 18-fs pulse

高时间分辨率的飞秒激光自动测试系统是研究物质超快动力学特性的有用工具. 它具有相对激光脉冲极限宽度(可见光波段大约为 2 fs)非常高的分辨率, 和较高的灵敏度, 广泛适用于凝聚态物质中各种弛豫过程的动力学研究. 我们用它在超导体、半导体量子阱、超晶格、有机聚合物等样品超快响应研究中取得了许多有意义的结果.

参 考 文 献

- 1 Fork R L. Generation of pulses shorter than 0.1 psec by colliding pulse modelocking. Appl Phys Lett, 1981, 38(9):671~672
- 2 Valchnanis J A. Generation of optical pulses as short as 27 femtoseconds directly from a laser balancing self-phase modulation, group velocity dispersion, saturable absorpton, and saturable gain. Opt Lett, 1985, 10(3):131~133
- 3 林位株,朱德瑞,曾文生,等. CPM 激光器的新进展——18 飞秒. 科学通报,1993,38(19):1737~1740
- 4 Brorson S D. Femtosecond room temperature measurement of the electron-phonon coupling constant λ in metallic superconductors. Phys Rev Lett, 1990, 64(18):2172~2174
- 5 皮飞鹏,曾文生,朱德瑞,等. 高温超导氧化物中受激载流子的飞秒驰豫过程. 科学通报,1995, 40(1):30~33
- 6 Lin W Z. Femtosecond absorption saturation studies of hot carriers in GaAs and AlGaAs. IEEE JQE, 1988, 24(2):267~275
- 7 林位株,丘志仁,徐文成. AlGaAs/GaAs 多量子阱结构中受激载流子的飞秒驰豫特性. 光学学报,1992,12(5):390~395
- 8 林位株,丘志仁,徐文成,等. 微机控制精密自相关器和实验数据获取与处理系统. 应用激光, 1990,10(3):114~117

High Temporal Resolution Automatic Measurement System Used in Ultrafast Phenomena and Applications

Zhu Derui Lai Tianshu Lin Weizhu Mo Dang*

Abstract A micro computer controlled high temporal resolution automatic measurement system used in ultrafast phenomena is reported. The temporal resolution is better than 1 fs (the optical path resolution is 0.084 μm), and the relative detection sensitivity is 10^{-6} . It has high stability and repeat ability, applied in the measurements of ultra-short pulses. The applications of this system in the measurements of femtosecond pulses and in the ultrafast dynamics of semiconductors are also discribed.

Keywords ultrafast phenomana, autocorrletor, time-resolved spectroscopy

* Department of Physics, Zhongshan University, Guangzhou 510275