

高灵敏度光学多通道分析仪的研究

宋宇, 周文远*, 叶青, 臧维平, 田建国

南开大学物理科学学院光子学中心, 天津 300071

摘要 分析了光学多通道分析仪的光电探测器件 CCD 的噪声产生原因, 讨论了抑制噪声、提高探测灵敏度的方法。成功地研制了高灵敏度光学多通道分析仪, 在常温常压下可清晰分辨氢和氘的第七条巴尔末线系谱线, 相比文献中报道过的光学多通道分析仪, 灵敏度提高了一个量级以上。该仪器具有高分辨率、高精度以及良好的可靠性。

关键词 光学多通道分析仪; CCD; 氢光谱

中图分类号: O433.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-0593(2006)04-0775-04

引言

光学多道分析仪相比传统的光谱测量技术可以同时记录多条谱线, 并且响应速度快, 灵敏度高, 因此已被广泛地用于几乎所有的光谱测量、分析及研究工作中^[1-3]。CCD 具有自扫描、分辨率高以及采样速度快等优点, 现在的光学多通道分析仪多采用 CCD 作为光电探测器件。但在弱光光谱测定、痕量分析以及长光路系统等对探测灵敏度要求较高的场合, CCD 的噪声问题变得十分突出, 甚至成为制约其应用的关键^[4]。因此为了获得高探测灵敏度, 必须设法降低光学多通道分析仪光电探测器件 CCD 的噪声。本文分析了 CCD 的各种噪声源, 并针对不同的噪声讨论了相应的抑制方法, 并将这些方法应用到基于 CCD 的高灵敏度光学多通道仪的研制中, 获得了满意的效果。

1 CCD 噪声分析

光电探测能力是影响光学多通道分析仪灵敏度的关键。为了提高 CCD 的探测能力, 需要最大限度地抑制噪声, 因此我们有必要深入地分析 CCD 的噪声产生原因以采用相应措施抑制噪声。

CCD 输出放大器把电荷转换为输出电压时会产生读出噪声。图 1 所示为一典型的 CCD 输出电路原理, 复位场效应管起开关作用, 它把感应电容预设为某一参考电压, 电荷包通过一个反向偏置的二极管注入感应电容, 输出信号即为源极跟随器上由电容放电引起的电压变化。在每个像素的光生

电荷包被检测之前, 感应电容会被复位到某个参考电平。由于复位场效应管沟道阻抗产生的热噪声的存在, 这个参考电平会有一些起伏, 因而产生了复位噪声。复位噪声属于读出噪声的一部分, 当信号电压通过源极跟随器输出时, 其输出阻抗的热噪声构成了读出噪声的另一部分。由于输出源极跟随器引起的热噪声一般远小于复位噪声, 且可通过滤波抑制, 所以我们主要讨论复位噪声。

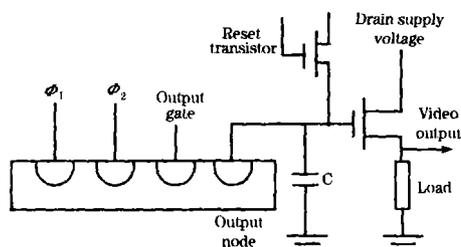


Fig 1 Schematic of CCD output circuit

复位噪声的大小以电子数计可表示为

$$n_r = \frac{\sqrt{kTC}}{q} \quad (1)$$

取电容 C 的典型值为 0.3 pF , 温度 T 为 300 K , q 为电子电量, 可以得出 n_r 为 220 电子。若 CCD 放大器灵敏度取 $5 \mu\text{V} \cdot (\text{电子})^{-1}$ (典型值), 则复位噪声的真实有效值可达 1.1 mV , 这对 CCD 在弱光探测领域应用的影响是非常大的。但是采用相关双采样 (CDS) 技术^[5], 可以有效地降低复位噪声。CDS 是指在每个像素的复位参考电压和信号电压处各采样一次, 利用复位场效应管截止时两次采样值的高度相关性, 求二者之差来削弱像素间复位电平不一致的影响。CDS

收稿日期: 2005-01-18, 修订日期: 2005-04-26

基金项目: 天津市科技攻关培育项目(033104311); 国家自然科学基金资助项目(60025512)

作者简介: 宋宇, 1980年生, 南开大学物理科学学院光子学中心硕士研究生 * 通讯联系人

电路原理如图 2 所示。

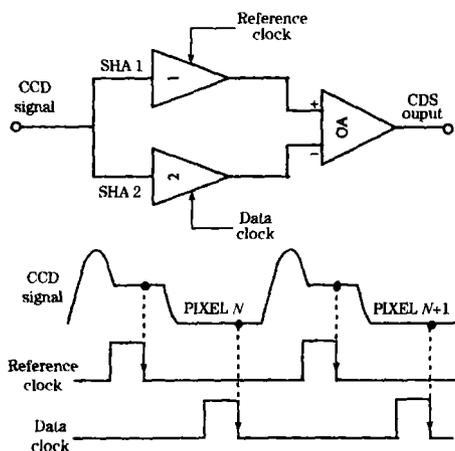


Fig 2 Schematic and timing diagram of CDS circuit (SHA 1 and SHA 2 are sample and hold amplifiers)

除了读出噪声, 由于 CCD 成像区域是由半导体材料制成的, 因此每个像素不可避免地会产生随机热噪声。热噪声与芯片的工作温度密切相关, 通常情况下, 温度每降低 5~9 °C, CCD 暗电流减半。因此降低工作温度可以有效抑制热噪声。

CCD 另一个噪声源是由光子探测本身的统计过程引起的。分析相同曝光时间的多次结果可以发现, 每次得到的光强分布存在着细微差别。实际上, 测得的光强偏移量是服从泊松分布的, 这个偏移量就是光子噪声。光子噪声大小等于信号值的平方根。由于光子噪声可以看成随机噪声, 可以利用多次采集取平均的方法来削弱它的影响。若平均次数为 N , 则光子噪声可下降为原来的 $1/\sqrt{N}$ 。

此外, CCD 还存在固定模式噪声和光子响应不一致引起的噪声。固定模式噪声是由于每个像素的势阱电势不同引起的; 光子响应不一致性是指每个像素在相同光辐射下会产生电荷数的细微差别。这两种噪声可以分别通过将输出信号减去零光照及均匀光照时的输出来补偿。

综上所述, 为了抑制 CCD 噪声及提高其探测灵敏度, 需要对其输出信号进行合理的处理, 包括采用滤波及相关双采样技术等, 这些处理可通过模拟电路设计实现。多次平均和去除背景等技术宜用于数字信号, 因此可利用计算机或 DSP 芯片对采集到的数据进行处理来实现, 这样可以获得更高的信噪比^[6], 但这仅适用于对实时性要求不严格的场合, 对光谱分析来说, 这是可行的。另外, 如果需要, 还可以降低 CCD 的工作温度。后文介绍的光学多通道分析仪正是基于这些思想设计的。通过上述模拟和数字信号处理技术的应用, 我们在常温常压的环境下, 显著提高了光谱探测的灵敏度。

2 光学多通道分析仪系统

我们研制的光学多通道分析仪系统由光子子系统、CCD 探测及模拟信号处理子系统、USB 数据采集子系统组成。为了降低电磁干扰对电子系统的影响, CCD 探测及信号处理子

系统与 USB 数据采集子系统被安装在大小为 11 cm × 11 cm × 6 cm 的铝质屏蔽盒中, 组成 OMA 模块, 系统框图如图 3 所示。

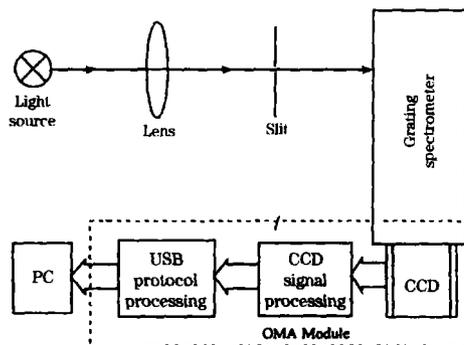


Fig 3 System schedule of the optical multichannel analyzer

2.1 光子子系统

光学系统由光源, 透镜组, WPG-100 型平面光栅光谱仪组成。WPG-100 型光栅光谱仪配有 1 200 线·mm⁻¹ 的平面反射式光栅, 焦距为 1 050 mm。

2.2 CCD 探测及模拟信号处理子系统

我们采用 Sony 公司出品的 ILX554B 高灵敏度线阵 CCD 作为光探测器件。ILX554B 共有 2 048 个像素, 每个像素尺寸为 14 μm × 56 μm, 光敏区总长为 28 672 mm。在 WPG-100 型平面光栅光谱仪上, CCD 一次可测量的波长范围约为 23 nm, 两相邻像素对应的光谱波长差约为 0.01 nm。

CCD 探测及模拟信号处理子系统功能框图如图 4 所示。CCD 输出信号先经过一级前置滤波和放大电路, 这是为了抑制随机噪声并将信号放大至 AD 转换器的理想工作区域。为了抑制复位噪声, 我们采用了 CDS 技术处理输出信号。电路中采用了高速 16 位 AD 转换器将模拟信号转换为数字信号, 这可以满足 CCD 的高读出速度并且使系统具有良好的动态范围。本系统中 CCD 信号读出速度为 750 kHz, 因此 AD 转换器的采样速率也为 750 kHz, 数据输出速率为 1.5 M Byte · s⁻¹。电路的时序控制由复杂可编程逻辑器件(CPLD)完成, 其中包括 CCD 驱动脉冲产生, 相关双采样时序产生以及 AD 转换和数据输出控制。

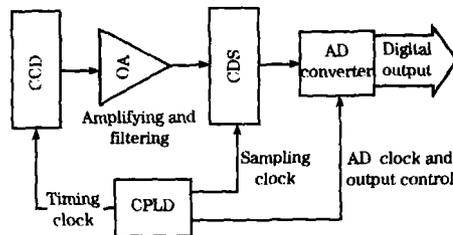


Fig 4 Function diagram of CCD detection and analog signal processing subsystem

2.3 USB 数据采集子系统

我们采用了基于 USB 的 DMA 方式实现 CCD 高速数据采集^[7], CPLD 控制数据采集时序。实验达到的数据传输速率在 8.8 M bit · s⁻¹ 以上, 功能框图如图 5 所示。计算机应

用程序将接收到光谱数据保存到硬盘上,并在计算机上显示出来,数据通过程序进行进一步的处理。

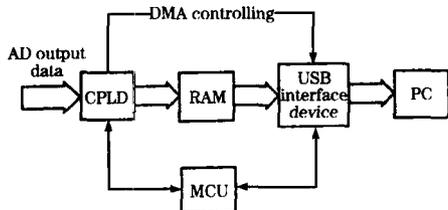


Fig 5 Function diagram of USB data acquisition subsystem

3 实验结果与讨论

为了检验光学多通道分析仪的实际应用性能,我们采用 GP10H 型氦氖灯高压放电产生待测光谱,对氢氘巴尔末线系光谱进行实验测定。

实验表明,该系统可在较短的积分时间内单次采集即可获得清晰的氢和氘 α , β , γ , δ 谱线。实际上对于强度较大的 H_α 和 D_α 线,得到具有足够信噪比的谱线只需 20 ms,并且这 20 ms 包括 CCD 复位、积分和数据采集整个过程。

采用稍长的积分时间、多次平均技术和去除背景噪声技术后,我们在同一次采集中得到了清晰的氢和氘巴尔末线系第 5, 6, 7 条谱线,即 ϵ , ζ , η 谱线,如图 6 所示。

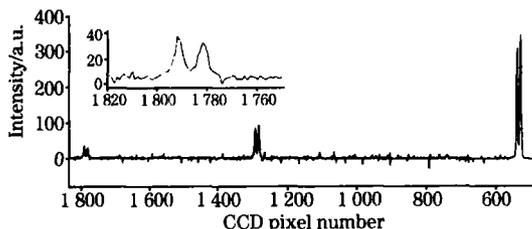


Fig 6 The ϵ , ζ , η spectrogram of hydrogen and deuterium (slit width of 0.04 mm, integration time of 8 s, average of 8 acquisitions, background noise removed)

在 0.04 mm 狭缝宽度下,氢和氘的第七条巴尔末线系谱线 H_η 和 D_η (图 6 中最左侧两条谱线,图 6 左上侧为局部放大后的 H_η 和 D_η 谱线图)可以被十分清晰地分辨出来,这两条谱线波长分别为 379.791 和 379.687 nm,这充分证明了该

系统具有优异的灵敏度和分辨能力。

该系统还有很高的精度。为了衡量测量精度,多通道光学分析仪测得的谱线波长可以表示为

$$\lambda = \alpha C + b \quad (2)$$

式中 α 为光谱线对应的 CCD 通道数, C , b 为系统的校正系数。利用 H_ϵ 与 H_η 给系统定标,再通过上式计算可得出 H_ζ 的实测值。通过与标准值的比较,即可衡量系统精度。由此可得测得的 H_ζ 波长值为 λ_{H_ζ} 388.902 nm。与标准值 388.906 nm 相比较,该系统误差仅为 1.03×10^{-5} ,即十万分之一精度。

以上实验结果均为在常温常压普通环境中得到的,因此该系统具有很高的实用价值和潜力。相比我们以前使用和文献[8]中的光学多通道分析仪,该光学多通道分析仪灵敏度提高了一个数量级以上。如果实际应用中需要更高的探测灵敏度,可以考虑对 CCD 进行降温。这是由于在小信号长时间积分条件下,光敏区暗电流引起的热噪声将成为 CCD 主要噪声源,降低 CCD 工作温度可以有效地抑制暗电流热噪声。采用多级半导体制冷可以实现 200 K 左右的温度,液氮则可以达到更低的温度。制冷时需要注意低温水汽凝结对电子系统及成像造成的影响。另外,对于硅基 CCD 器件,其光谱响应范围在 200 至 1100 nm 左右,但 CCD 通常带有玻璃窗或石英窗,因此其短波的光谱响应将受到一定影响。必要时可以去除玻璃窗以达到更好的效果(本实验结果均为带玻璃窗测得的)。对于其他波段的光谱测量,可以考虑采用其他材料的 CCD 器件来实现。

4 结论

通过对 CCD 噪声产生原因的分析,采用抑制噪声的信号处理电路,利用基于 USB 的 DMA 数据采集方式构建了高性能光学多通道分析系统。实验结果表明,该系统具有优异的灵敏度、分辨率、精度、高速度和良好的可靠性。系统可以清晰分辨氢和氘的第七条巴尔末线系谱线,且具有高达十万分之一的精度。另外利用 USB 总线实现了高速数据采集,支持即插即用;采用计算机程序控制系统参数和数据处理,使用灵活方便,可以方便的移植到多种传统光栅光谱仪中,具有很高的实用价值。

参 考 文 献

- [1] Wang Z H, McKenzie D R. Appl. Optics, 1988, 27(23): 4960.
- [2] Cole J W, Hendler R W, Smith P D, et al. J. Biochem. Biophys. Methods, 1997, 35: 161.
- [3] YANG Can zhu, LIN Yu, XU Hui, et al(杨灿珠, 林宇, 徐慧, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 1997, 17(5): 94.
- [4] CHEN Li jiang, GUO Jir sheng, YANG Jing guo(陈鲤江, 郭金生, 杨经国). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 1999, 19(3): 286.
- [5] White M H, Lampe R D, Blaha F C, et al. IEEE J. Solid State Circuits, 1974, SG 9(1): 1.
- [6] Zadnik J A, Beletic J W. Appl. Optics, 1998, 37(2): 361.
- [7] SONG Yu, ZHOU Wei yuan, CHEN Lei, et al(宋宇, 周文远, 陈磊, 等). Journal of Optoelectronics • Laser(光电子 • 激光), 2004, 15(10): 1181.
- [8] HUANG Guang ming, LI Gao xiang, SHI Li hua, et al(黄光明, 李高翔, 石丽华, 等). Journal of Central China Normal University(华中师范大学学报), 2002, 36(2): 161.

A High Sensitivity Optical Multichannel Analyzer

SONG Yu, ZHOU Wei yuan*, YE Qing, ZANG Wei ping, TIAN Jiar guo

Photonics Center, College of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China

Abstract Noise sources of the CCD as the photoelectric detection device in an optical multichannel analyzer (OMA) were analyzed, and noise suppression methods were discussed. A high sensitivity OMA was developed successfully on the basis of the noise suppression techniques, and the 7th spectral lines of Balmer series of hydrogen and deuterium were resolved clearly by the OMA. Its sensitivity was enhanced by one order of magnitude, compared with those reported in the literatures. This OMA also showed high resolution, high precision and good reliability in the authors' experiments.

Keywords OMA; CCD; Hydrogen spectrum

(Received Jan. 18, 2005; accepted Apr. 26, 2005)

* Corresponding author