

文章编号: 1671-7449(2004)04-0292-04

一种紫外光谱测量的微型光纤 光栅光谱仪设计

冯志庆, 李福田

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘 要: 介绍了用于太阳紫外光谱 250 nm~450 nm 测量微型光纤光栅光谱仪. 该谱仪采用 C-T 正交型结构, 采用滨松自扫描光电二极管阵列(SSPD)为探测元件. 介绍了谱仪的辐射定标和探测器驱动及数据采集电路设计, 讨论了积分时间与信噪比之间的关系.

关键词: 光谱学; 辐射定标; 光纤光栅光谱仪; 太阳紫外; 自扫描光电二极管阵列

中图分类号: TH744.1 **文献标识码:** A

Design of a Small Sized Fiber Grating Spectrograph Measuring Ultraviolet Spectrum

FENG Zhi-qing, LI Fu-tian

(State Key Lab of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics
and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: A small-sized fiber grating spectrograph which can measure solar ultraviolet spectrum from 250 nm to 450 nm is introduced. It is C-T structure, the detector is composed of self-scanning photodiode array of HAMAMATSU company. The radiance calibration is introduced. The detector driver circuit and sample circuit design is also introduced. The relation between detector integrating time and signal-noise ratio is discussed.

Key words: spectroscopy; radiance calibration; fiber grating spectrograph; solar ultraviolet spectrum; self-scanning photodiode array

0 引 言

探测器阵列的出现给光学仪器的发展带来了巨大的革命, 促进了空间光学, 等离子体物理, 地面和空间遥感, X 射线激光及时间分辨光谱学等前沿科学和高技术的发展. 在光谱仪器领域最具特色的是平焦场多通道光谱仪和成像光谱仪的诞生和高速发展, 同时, 探测器阵列的高度集成特点也使仪器的微型化成为可能. 目前, 用于医疗鉴别, 生物监测, 化学分析等领域的微型掌上多通道光谱分析仪成为光谱分析领域的热点^[1~3]. 在遥感领域, 小型化多通道光谱仪也将成为下一代光谱遥感仪器的重点研究目标, 采用线阵探测器阵列方式光谱仪为全固态安装, 没有机械传动, 延长了使用寿命; 减小传统倍增管探测方式仪器的体积, 提高了定位精度^[4]. 在弱光探测领域, 可采用光电阴极+微型多通道板(MCP)+荧光

* 收稿日期: 2004-03-09

作者简介: 冯志庆(1975-), 男, 博士生, 主要从事光谱仪器及光谱技术的研究.

粉+CCD 方式,即所谓的像增强器方式来弥补增益的不足.

本文设计了采用 C-T 正交方式的微型多通道光谱仪,为增加紫外波段的光谱响应,反射元件表面,平面衍射光栅表面镀 $AL+MgF_2$ 膜. 谱仪的任务是观测太阳紫外光谱的细节,探测器采用了日本滨松的光电二极管阵列. 该探测器有高的势阱深度,可达到 8 000 : 1 的信噪比. 适合强光条件下吸收光谱探测.

1 实验装置

1.1 仪器光路及结构

光线通过引导光纤,入射狭缝 S_1 进入仪器投射到准直镜 M_1 上,使光线投射到光栅 G 上,光栅衍射后的光线经过聚光镜 M_2 会聚到探测器光敏面上.

多色仪采用的是正交排列的 C-T 变形结构,这种结构比较容易通过内部光栏来抑制杂散光,避免从入缝看见第二反射镜面,而且便于光路装调. 聚物镜到谱面中心距离为 80 mm,光栅常数为 600 线/mm. 光栅和两反射镜均采用玻璃溅射铝膜后镀 MgF_2 膜而成. 对 200 nm~450 nm 太阳紫外/大气光谱有好于 90% 的反射率. 光纤采用美国 OCEANOPTICS 公司的 P-200 UV-VIS 光纤. 光纤芯径 0.2 mm,入射狭缝 0.1 mm,分辨率为 0.5 nm,色散为 0.3nm/pixel.

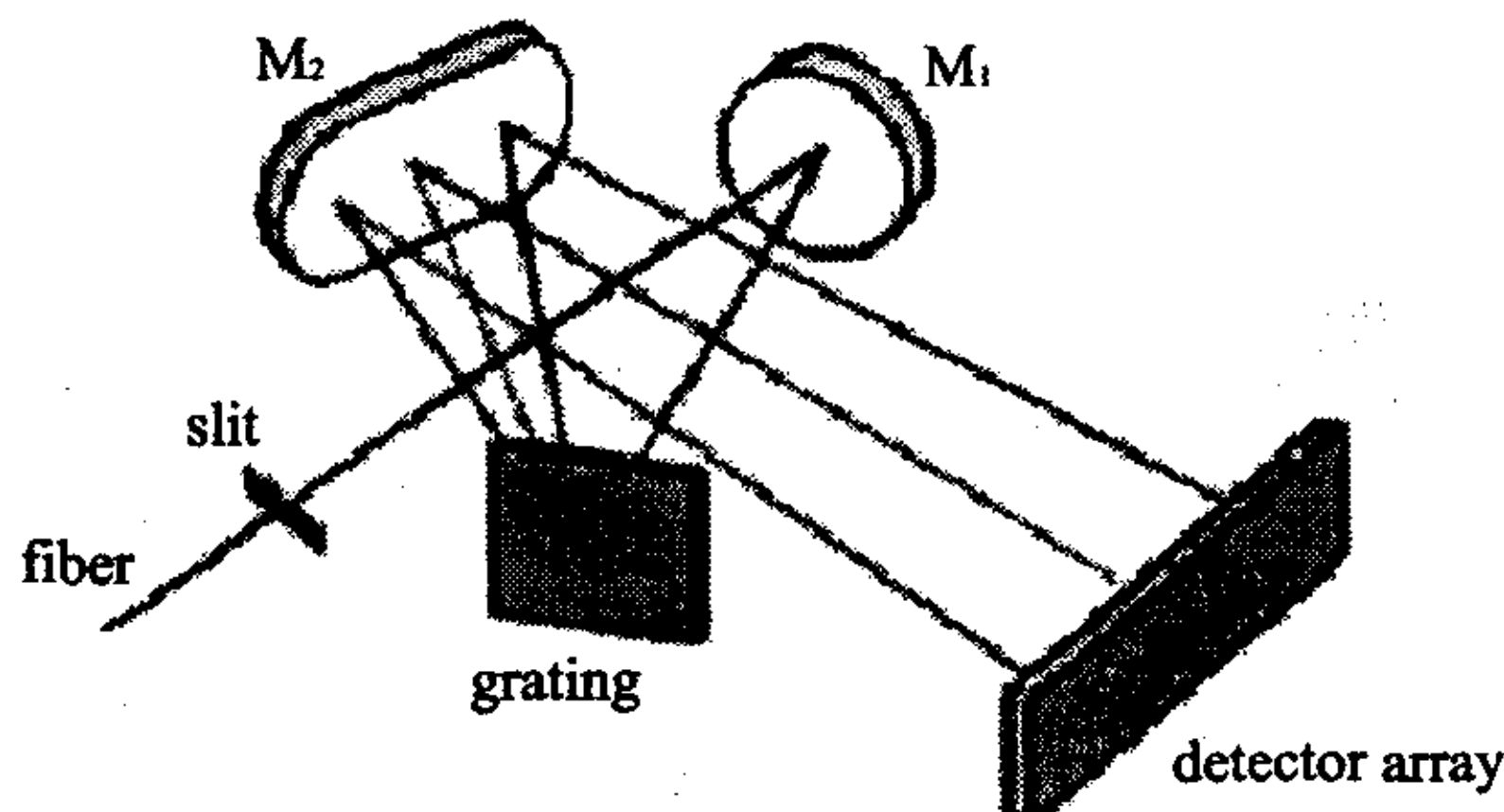


图 1 仪器光路图

Fig. 1 Schematic diagram of optical path

1.2 系统的软硬件设计

探测器采用日本滨松的 S3924-1024Q,为提高系统稳定性,适应外空间低温度,高辐射环境,探测器的驱动、信号放大、数据采集电路均自行设计,不再使用滨松的 C7885 驱动电路,根据外空间太阳光谱实际数据和探测器性能计算,积分时间可从 100 ms~60 s,而采样频率可最低降至 10 KB. 在积分时间允许范围内,低一些的信号读出速率可降低读出噪声(readout noise)^[5]. 电路分两部分:① 探测器驱动和数据采集;② MCU 控制,数据存储和通信.

探测器驱动电路原理图,如图 2 所示.

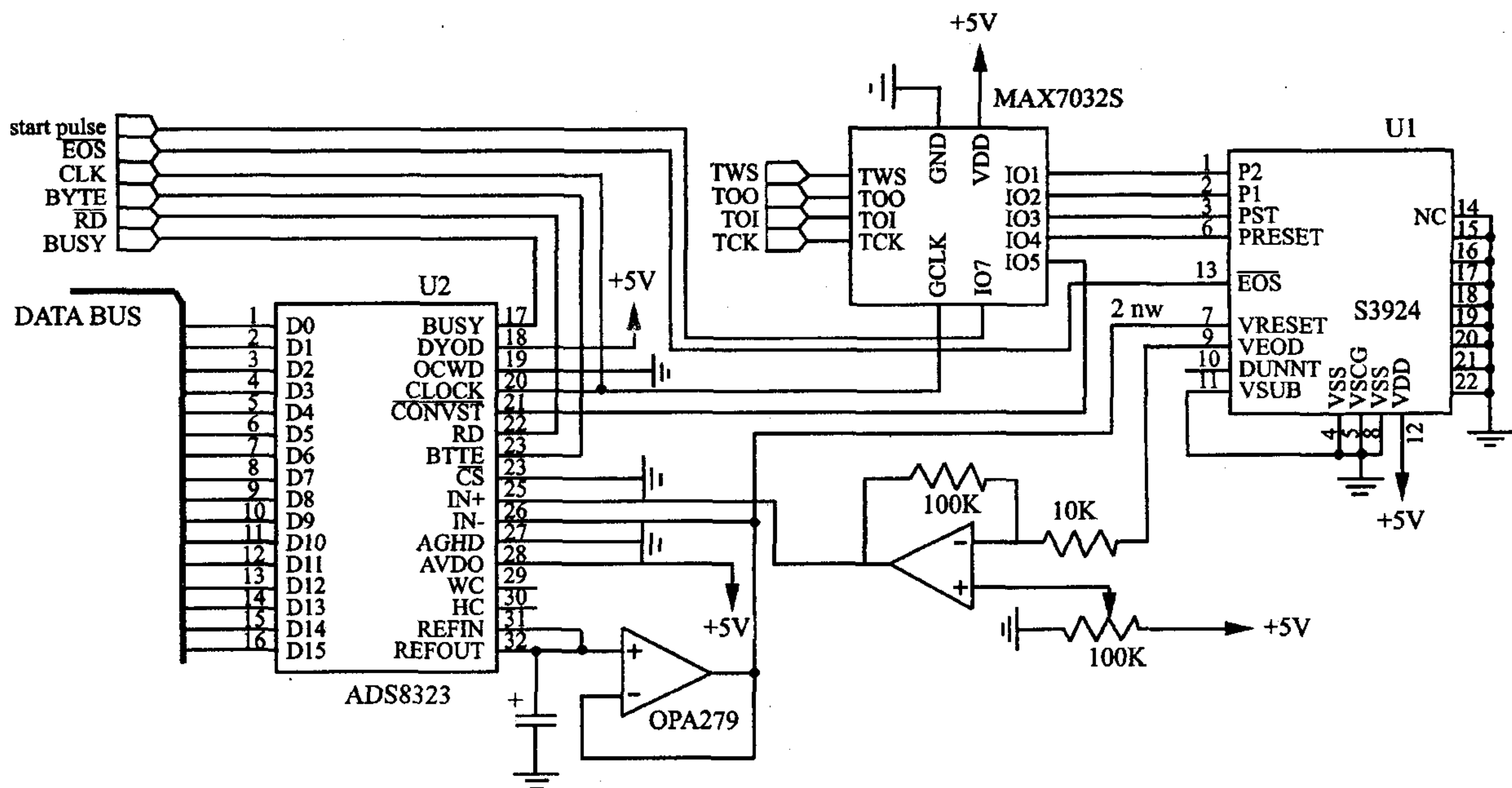


图 2 探测器驱动电路原理图

Fig. 2 The principle diagram of detector driver circuit

二极管阵列驱动的核心元件是一片 ALTERA 公司 MAX7000 系列的 CPLD(EPM7032), 通过其内部可编程逻辑电路实现阵列探测器的 P1, P2, RESET 等时序信号驱动(如图 3 所示), 驱动脉冲边沿与外部时钟信号(CLK)同步. 而积分脉冲通过 MCU 定时器定时改变特定引脚电平状态触发 CPLD, 使其输出与 CLK 时钟同步的开始信号积分的脉冲. 信号放大设计为正比例 10 倍放大. A/D 采用 TI 的 5 V 电源 16 b 分辨率 ADS7823. A/D 转换信号和 PRESET 同步, 由 CPLD 触发. 转换完成后 A/D 转换器通过 BUSY 脚引发 MCU 中断通知 MCU 接收数据.

MCU 单元采用 AT89S51 工业级芯片, 采用 CYPRESS CY7C199 存储数据. MCU 的主要功能为: ① 通过 RS232 与主机通信并向主机传输数据; ② 通过定时器中断定时发送积分脉冲至 CPLD; ③ 响应 ADS8323 中断, 并读取数据.

系统采用外置看门狗 MAX813L, 系统使用了定时器中断, INT0 中断. 定时积分和数据获取保存均在中断内完成. 主程序接收上位机命令改变积分时间和向上位机发送测量数据, 上电后 MCU 启动 CPLD, 并定时 100 ms 通知 CPLD 发出积分脉冲. 采用双缓冲循环覆盖方式保存数据, MCU 接到发送数据命令后禁止 INT0 中断并将上帧数据发送到上位机, 发送完成后启动 INT0 中断. 每完成一次数据传送后要经过一个测量周期才能保证数据的准确性.

2 仪器辐射定标

光路中包括引导光纤、反射镜(两面)、光栅、线阵探测器共 5 个影响光谱传输的元件, 通过定标可修正因光学元件的光谱响应不同导致的测量光谱分布与真实分布的差异. 定标的原理和方法目前已经很成熟, 关键在于所用标准光源的稳定性, 准确性. 定标采用英国 CATHEDON 公司 30 W 氙灯(包含 1 m 处辐照度标准数据)作为 250 nm~300 nm 光谱辐照度传递标准光源, 中国计量院标准石英卤钨灯(包含 1 m 处辐照度标准数据), 作为 300 nm~450 nm 光谱辐照度传递标准光源, 如图 4 所示.

定标在无杂光的暗室内进行, 标准光源通过衰减板照射到光纤端面上, 进入谱仪. 通过光源光谱分布的测量值和实际值(标准数据)的比可得出仪器光谱响应度 $\kappa(\lambda)$.

加入 1% 衰减器可使积分时间加长, 提高信噪比. 氙灯定标原理相同, 由于氙灯信号较弱, 所以去掉衰减器, 在此不多叙述.

光谱仪的光谱辐照度

$$\kappa(\lambda) = \frac{\Phi(\lambda)}{\Phi_s(\lambda) - \Phi_B(\lambda)} \times T_0,$$

式中: $\Phi(\lambda)$ 为标准光源在引导光纤端面处的光谱辐照度(实际值); $\Phi_s(\lambda)$ 为探测器光谱测量值; $\Phi_B(\lambda)$ 为背景测量值; T_0 为积分时间(若加入 1% 衰减板则为实际的 1%).

3 测量与数据处理

由于探测器采用前向照明非制冷的线性二极管阵列, 环境温度对暗电流和暗噪声的影响很大, 一般温度每升高 5 °C~6 °C, 暗电流要增加 1 倍, 因而在测量时除了保证较低的环境温度, 同时还要采用实

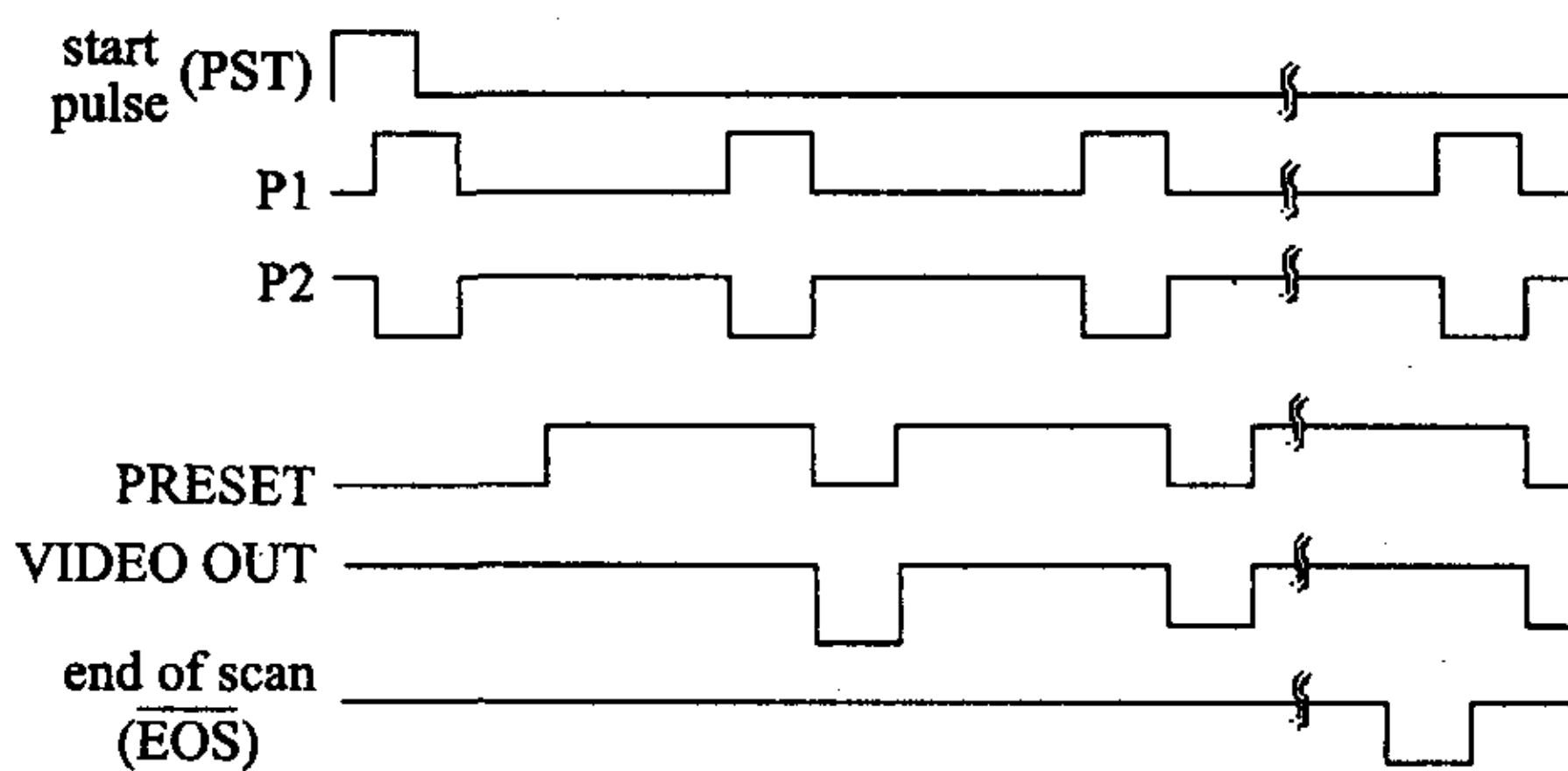


图 3 S3924 驱动时序图

Fig. 3 The timing chart for driver circuit of S3924

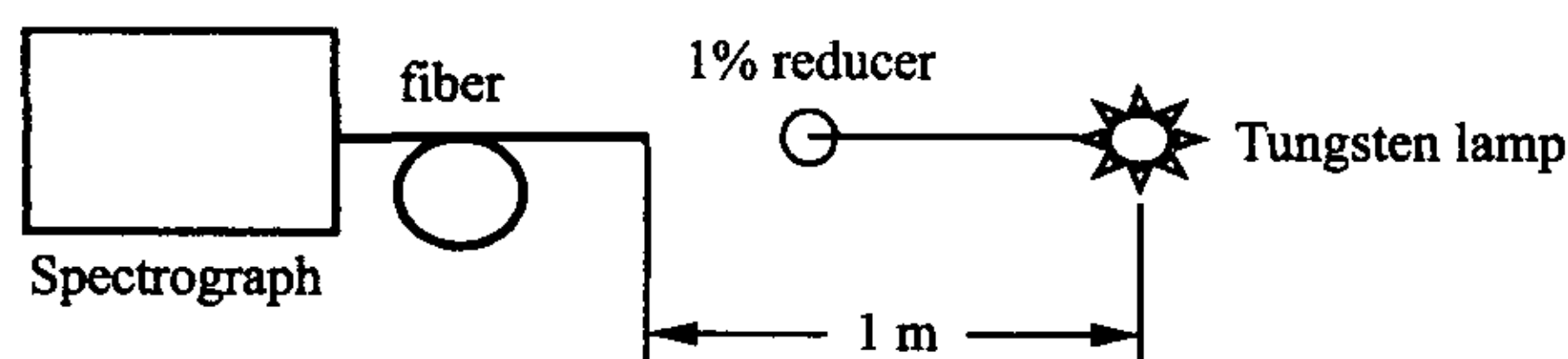


图 4 300 nm~450 nm 光谱辐照度定标示意图

Fig. 4 Schematic diagram of 300 nm~450 nm spectral irradiance calibration

时暗背景扣除的方法来消除温度影响, 本文将未使用的部分像元用机械方法挡住作为暗背景扣除参考。

背景为 $\Phi_b(\lambda)$, 测量值为 $\Phi(\lambda)$, 仪器光谱辐亮度响应度为 $\kappa(\lambda)$ (从定标获得), 则测量结果为

$$R(\lambda) = (\Phi(\lambda) - \Phi_b(\lambda)) \times \frac{\kappa(\lambda)}{t},$$

式中: t 为测量积分时间。

暗背景 $\Phi_b(\lambda)$ 是和波长弱相关的量, 主要成分是暗电流和暗噪声, 可认为

$$\Phi_b(\lambda) = A_i.$$

式中: A_i 为探测器挡住像元信号输出的平均值。

作者研制的光谱仪计划用于气球搭载实验, 但由于没有脱离臭氧层, 290 nm 以下光谱还是非常微弱的。250 nm~450 nm 太阳紫外光谱变化范围达到 4 个量级, 为提高测量精度, 拟在进行空间测量时在谱面上增加一个滤光片压缩动态范围, 滤光片的设计则是另外的研究课题。

250 nm~450 nm 太阳紫外光谱的地面测量曲线示例(290 nm 以下测量不到, 略去), 如图 5 所示。

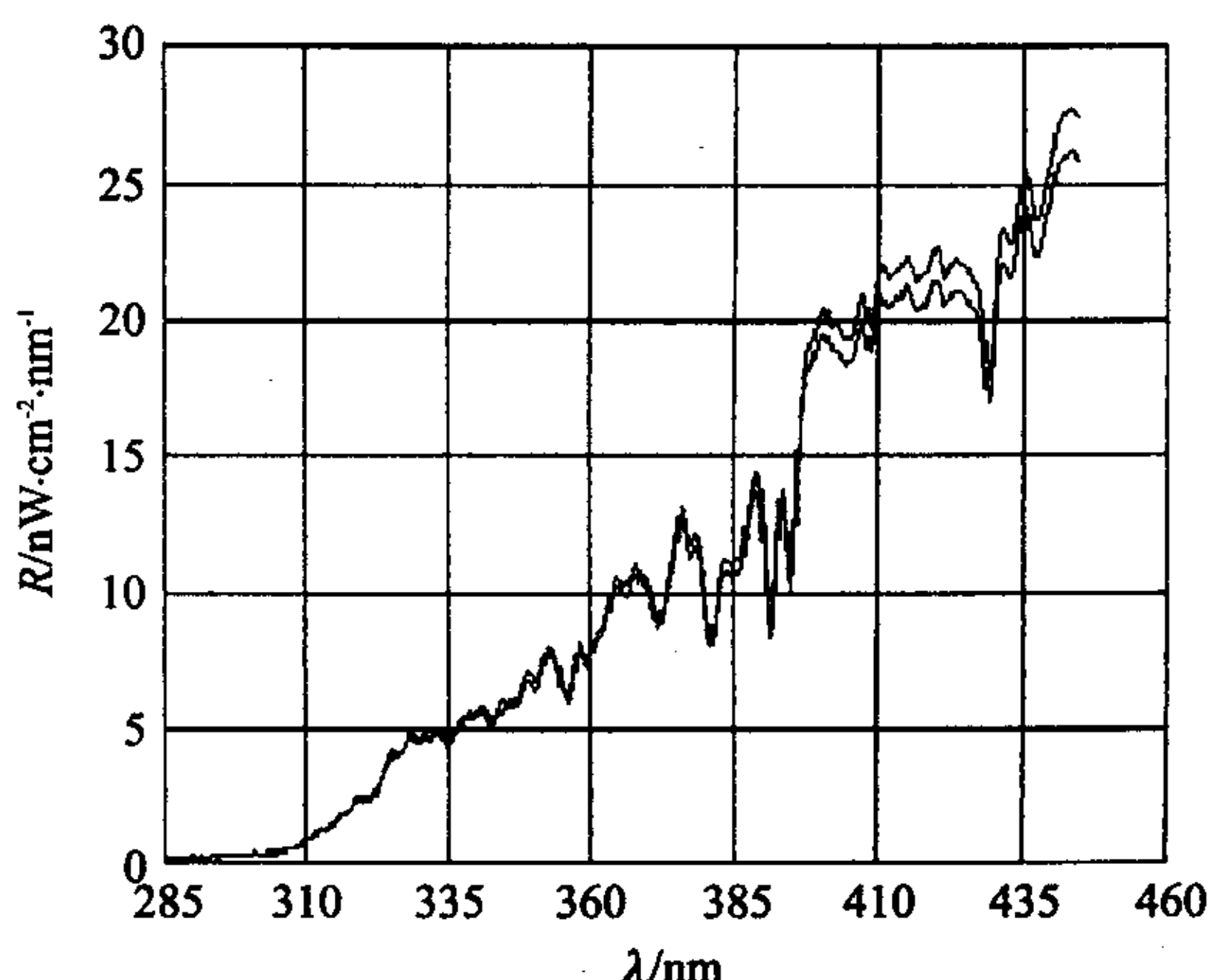


图 5 中国北方晴朗天气太阳辐照度测量曲线

Fig. 5 Solar spectral irradiance of North China

4 关于积分时间和信噪比改善的讨论

基于线阵 CCD 的光谱仪信噪比可用下式表达

$$SNR = \frac{P_f(\lambda)Q_e(\lambda)t}{\sqrt{(P_f(\lambda) + B_f)Q_e(\lambda)t + Dt + N_r^2}},$$

式中: P_f 为入射到 CCD 光敏面上的光通量; Q_e 为 CCD 的量子效率, 是波长的函数; B_f 是背景杂散光, 由外背景和仪器共同产生; D 是暗电流, 是暗噪声的来源, 暗电流和暗噪声成方根关系; N_r 是系统读出噪声, 和系统读出速率有关, 信号读出速率越高, 读出噪声越大, 速率一定时读出噪声可认为是常数。

当系统读出噪声很小(读出噪声受限), 积分时间较长时, 信噪比公式可简化为

$$SNR = \frac{P_f(\lambda)Q_e(\lambda)}{\sqrt{(P_f(\lambda) + B_f)Q_e(\lambda) + D}} \times \sqrt{t}.$$

信噪比随积分时间增加成方根增长, 实际上由于暗电流也是积分时间的增函数, 这种方根关系是近似的。

当系统读出噪声很大, 积分时间很短时, 信噪比公式还可简化为

$$SNR = \frac{P_f(\lambda)Q_e(\lambda)}{N_r} \times t.$$

信噪比随积分时间增加成正比增长。

参考文献:

- [1] 霍建伟, 马海涛, 王丽秋, 等. 全自动生化分析仪用分光光度计[J]. 光学精密工程, 2003, 11(5): 457—460.
- [2] 张继彦, 杨国洪, 张保汉, 等. 小型平焦场光栅光谱仪的研制[J]. 光学学报, 2001, 21(9): 1009—1102.
- [3] 温志渝, 陈刚, 温中泉, 等. 混合集成微型光纤光谱仪的设计模拟及实验[J]. 光学学报, 2003, 23(6): 740—744.
- [4] 赵育良, 张青臣, 李开端. 基于线阵 CCD 的全息光栅位移传感器[J]. 测试技术学报, 2002, 16(3): 167—170.
- [5] 王庆有. CCD 应用技术[M]. 天津: 天津大学出版社, 2000. 1—53.