

# 线阵列硅探测器多通道 光谱仪性能评价研究

权石柱

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130021)

**摘要** 研究和讨论了线阵列硅探测器多通道光谱仪的性能及实验评价。在完成可见—近红外平谱面多色仪调试、线阵列硅探测器的驱动电路及触发电路设计、微机系统接口与软件开发的基础上,进行了以下几方面研究和讨论:对多通道光谱仪各谱带的中心波长、光谱带宽及光谱范围进行了定标,并分析和讨论定标误差、光谱分辨率及辐射响应;光谱辐射定标:以光谱辐照度(或辐亮度)标准建立探测器各元的数字响应与入射辐照度(或辐亮度)的关系,并分析和讨论辐射动态范围,辐射定标误差和线阵列硅探测器各元响应不均匀性;分析和讨论多通道光谱仪的杂散光特性;最后通过数据处理得到了两种材料的光谱分布,并与用分光光度计测得的结果进行了比较。

**关键词:** 光谱仪; 线阵列探测器

## 1 引言

近二十余年,随着阵列探测器(如 CCD、硅光电二极管阵列、InAs 阵列、热释电阵列)的出现,利用多元阵列探测器和平谱面多色仪的瞬态光谱技术发展十分迅速。与微机技术结合实现的多通道光谱仪是七十年代发展起来的新一代先进光谱仪器。它可快速(几乎是平行输出各光谱的探测信号)测得辐射源的光谱分布。因此,在目标辐射的光谱测量的广泛领域,诸如地物光谱特性测量、快速瞬变目标的光谱特性等研究方面,具有重要的应用。还有如上二维扫描,可开拓成成像光谱仪。

这类光谱仪同传统的波长扫描式光谱仪和摄谱仪是不同的,采用了先进的电子技术、微电子学和计算机处理与控制,使其增加了很多可贵的特性,对其性能和光谱测量特性进行研究是必要的。

## 2 线阵列硅探测器多通道光谱仪实验系统

为了分析和研究多通道光谱仪的性能,并给出实验评价,我们研制了线阵列硅探测器多

通道光谱仪实验系统。

研制的多通道光谱仪由平谱面多色仪、阵列探测器、快速 A/D 变换器及微机等组成，系统框图如图 1 所示。在多通道光谱测量中，多色仪应该是平谱面，尽可能减小象散，其作用是将待测的复合光经色散系统投射到探测器光敏面上。探测器是多通道光谱仪的关键器件，它可几乎同时检测到所需的整个谱段的信息。探测器的输出信号经快速 A/D 变换，在微机控制下完成各种数据采集和处理、存储、显示、打印等功能。这一实验系统的功能参数如图 1 示。

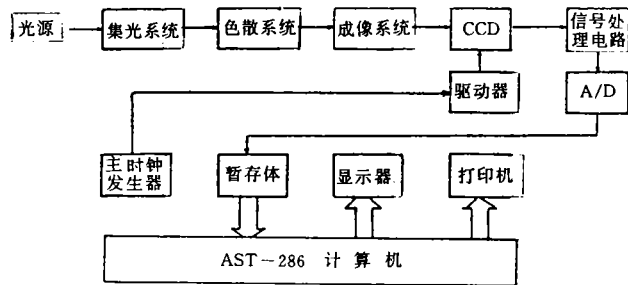


图 1 多通道光谱仪系统框图

## 2.1 光学系统

平谱面多色仪采用交叉式 Czerny-Turner 结构。为减小狭缝高度方向的象散，使光能量集中，在后聚光镜与谱面间加进一块柱面镜 P。有正弦波长扫描机构，在谱面上加出射狭缝还可用作单色仪。

## 2.2 探测器

探测器采用 256 元线阵 CCD 探测器（日本浜松公司的 S3901-256Q），焦面上每个探测元的受光面积为  $50\mu\text{m}$ （间距） $\times 2.5\text{mm}$ （高），整个受光面积为  $12.8\text{mm} \times 2.5\text{mm}$ 。

表 1

光学系统焦距	$f=161\text{mm}$
光学系统相对孔径	F/3.6
狭缝机械尺寸	$18\text{mm} \times 0.05\text{mm}$
光谱范围	$0.3-1.1\mu\text{m}$
探测器	Si-CCD (256 元)
光谱分辨率	3.1nm
探测器积分时间	4-30ms

CCD 探测器的驱动器采用日本浜松公司的 C4350。

## 2.3 电子学系统

电子学系统由 CCD 驱动器采用主时钟发生器、放大器、A/D 变换器、数据采集和记录、实时显示器、微机等组成。

主时钟发生器给 CCD 驱动器提供主时钟脉冲和主起动脉冲。

本系统的数据采集、处理及与 AST286 主机的通信均采用 8098 单片机来实现。8098 控制程序固化在 2764 EPROM 片子中。

8098 单机与 AST286 主机通过串行口相连, A/D 变换后的数据最后通过串行口送入 AST286 计算机中进行处理, 其中与 AST286 串行口的通讯用汇编语言编写, 显示处理程序用 C 语言编写, 两者之间用 C 语言与汇编语言接口软件来连接, 实现程序的一体化。

## 3 线阵列硅探测器多通道光谱仪的光谱定标

多通道光谱仪, 需要对阵列探测器的每一元进行对其各谱带中心波长、光谱采样间隔、光谱带宽等诸参数的精确定标, 进而确定其实际光谱分辨能力, 分析和讨论辐射响应。

### 3.1 中心波长定标

首先由实时显示系统测量中心波长, 光谱定标系统由光源、准直透镜、多通道光谱仪和实时显示系统组成。其中光源使用汞灯, 实时显示系统将平谱面多色仪的输出信号经 A/D 变换后通过串口传送到 AST-286 主机, 最后在监视器上显示各元相对光谱分布曲线。多通道光谱仪有正弦波长扫描机构, 通过波长扫描鼓轮的转动, 进行光谱方向的谱线移动, 最终定出各元所对应的波长, 即为中心波长。

定标后的光谱范围为 310.5 (nm) - 1100.9 (nm), 与最初设计的指标基本符合。由于探测器相邻探测元的波长间距为 3.1 nm, 光谱定标误差应不超过 3.1 nm, 在这误差范围内计算机显示的信号峰值代表该探测元所对应中心波长的辐射量。从测得的汞灯谱线结果可知, 光谱定标误差在上述极限误差范围内, 各谱线的带宽为 3.1 nm。

### 3.2 光谱分辨率

本系统中多色仪的准直镜与成像物镜焦距相等, 即光谱放大率为 1, 狭缝宽度与焦面上的像宽相等。

由理论分析计算可知  $a' \gg a_0$  (正常狭缝宽度), 故本系统实际光谱分辨率由狭缝像的几何宽率  $a'$  决定, 则实际的分辨率为

$$R_{\text{实}} = \lambda/d\lambda' \quad (1)$$

式中  $d\lambda'$  - 相对于  $a'$  的等价光谱宽度

$$d\lambda' = a' \cdot d\lambda/dl = 0.05(\text{mm}) \times 62.0(\text{nm/mm}) = 3.1(\text{nm})$$

平谱面上相邻两探测元间的光谱宽度  $d\lambda$  为

$$d\lambda = 50(\mu\text{m}) \times 62.0(\text{nm/mm}) = 3.1(\text{nm})$$

可知  $d\lambda = d\lambda'$ , 这说明本系统光谱分辨极限为 3.1 nm。对汞灯谱图的处理结果, 其中相距近 2.11 nm 的两条黄线 (576.96 nm 和 579.07 nm) 没能被分辨, 相距近 34 nm 的中心波长为 546.1 nm 的绿线和中心波长为 578.0 nm 的两条黄线 (576.96 nm 和 579.07 nm) 间距占平谱面的 11 个探测元, 这说明光谱分辨极限为 3.1 nm, 结果与光谱定标结果相符。

### 3.3 摄谱式多色仪的辐射传输特性

定义: 光谱集光本领 (Spectral luminosity 或 Spectral throughput)  $p(\lambda)$  为多色仪谱面上光谱辐照度  $E_{out}(\lambda)$  与入射狭缝上成像的光源像的光谱辐亮度  $L_{in}(\lambda)$  之比。

当入射辐射是线光谱时 (即  $\Delta\lambda$  为无限窄), 经分析可得:

$$P(\lambda) = \frac{E_{out}(\lambda)}{L_{in}(\lambda)} = \frac{A}{f^2} \cdot \eta(\lambda) \quad (2)$$

由上式可见, 在线光谱情况下, 多色仪集光本领和入射狭缝的宽度、高度无关, 与有效相对孔径的平方成正比。可见, 对多通道光谱仪, 提高实际分辨率需增大成像系统的焦距 ( $f'_2 = f$ ), 但由于减小了有效相对孔径, 降低了集光本领。

入射辐射是连续光谱时, 经分析可得:

$$P(\lambda) = \frac{E_{out}(\lambda)}{L_{in}(\lambda)} = \frac{A \cdot W}{f^3 \cdot D_s} \eta(\lambda) \quad (3)$$

可见, 连续光谱的光谱集光本领随实际实用的入射狭缝宽度  $W$  增大而增大, 这将导致仪器的实际分辨率的下降。

### 3.4 摄谱式多色仪的光谱响应特性

首先考虑光学系统是理想的, 即不考虑光学系统的传递函数及像差对光谱分辨率的影响, 只研究入射狭缝与出射狭缝的作用。设  $\lambda'$  为探测器平面上的光谱坐标,  $\lambda$  为入射光波长, 第  $i$  个探测元的中心波长为  $\lambda_i$ 。此时, 狭缝函数为:

$$s(\lambda - \lambda_i) = A(\lambda - \lambda_i) \star D(\lambda - \lambda_i) \quad (4)$$

上式是入射狭缝函数与探测元函数的相关, 它表示波长为  $\lambda$  的单色辐射在中心波长为  $\lambda_i$  的探测元上的相对光谱透过率, 即表示多色仪的光谱通带特性及光谱分辨率。经分析可知, 本系统中规一化的狭缝函数半值宽度为入射狭缝像所对应的波长宽度 (即每一探测元所对应的波长宽度)。

实际上, 由于色散光学系统的存在, 光谱辐射输出函数计算中, 还应有光学系统像差等因素引起的点扩散函数 ( $H(\lambda_i)$ ) 卷积项:

$$P(\lambda_i) = E(\lambda_i) \star A(\lambda_i) \star H(\lambda_i) \star D(\lambda_i) \quad (5)$$

从理论上分析计算结果可知, 当光谱辐射输出函数半值宽度  $\Delta\lambda$  变宽时, 相邻探测元间的影响增大, 使光谱分辨率下降。分析和测量杂散光时, 我们测量了入缝宽 0.05mm 时, 标称波长 0.71 $\mu$ m 所对应的探测元光谱辐射输出函数对相邻探测元的影响, 其大小为 0.120, 与理论分析结果相符。这说明本系统中光学系统的衍射畸变和像差等因素对光谱辐射输出函数和光谱分辨率的影响很小。还有当入射狭缝和探测器各元间的宽度同时变小时, 光谱辐射输出函数的半值宽度减小, 此时对相邻探测元间的影响也减小, 实际光谱分辨率提高, 但光谱集光本领下降。

## 4 光谱辐射定标

在实际应用与研究中, 多通道光谱仪记录的输出数据, 并不直接是光谱辐射量值, 要求把输出数字量转化为光谱辐射量值, 进而推知目标的光谱辐射特性, 这一过程通过光谱辐射定标来实现。

#### 4.1 光谱辐射定标实验

绝对辐射定标实验系统由标准辐射光源、多通道光谱仪、数据采集和放大系统、微机数据处理及显示系统组成。如图 2 所示。

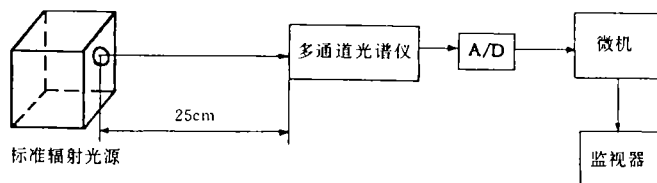


图 2 辐射定标实验系统框图

如图 2 调好光路，此时标准辐射光源通过多色仪投射到整个探测器平谱面上，这样可以对 0.3—1.1 $\mu\text{m}$  光谱范围的各探测元进行辐射定标。定标时使控制软件不加滤光片时采集对应于 0.6 $\mu\text{m}$  之前的探测元的 A/D 变换值，加一块橙黄色滤光片时，采集对应于 0.6—1.1 $\mu\text{m}$  间的探测元的 A/D 变换值，其目的是消除光栅二级光谱的影响。

由消除了暗电流后的输出数字量数据和标准灯光谱辐照度数据可计算出每一探测元的光谱绝对响应度数据，作为定标数据文件存放备用。

定标文件数据由下式决定：

$$R(\lambda_i) = \frac{\sum_{j=1}^N DN(i, j)/N - \sum_{j=1}^N C(i, j)/N}{E_0(\lambda_i)} \quad (6)$$

式中： $i$ —探测元序号

$j$ —采样次数

$DN(i, j)$ —输出数字量大小（含暗电流）

$C(i, j)$ —暗电流数字量大小

$E_0(\lambda_i)$ —标准灯光谱辐照度（或加滤光片时）

#### 4.2 光谱辐射测量范围

通过对饱和入射辐照度、噪声等效辐照度、噪声分布的测量和分析可知，本系统的动态范围为 300（即最大入射辐照度与最小入射辐照度之比），256 个探测元多次测量的标准偏差的平均值为 1.7。

#### 4.3 探测器各元响应不均匀性

探测器各元响应不均匀性从以下几方面考虑。

(1) 探测器的暗电流

(2) 探测器光谱响应不均匀性

(3) 光学系统的影响

测量由暗电流、光谱响应不均匀性引起的探测器各元响应不均匀性时，用大积分球出射的均匀辐射照射探测器，经过 A/D 变换、计算机处理后可得探测器各元响应不均匀性，测量结果探测器各元响应不均匀性为 3.4%。

### 5 多通道光谱仪的杂散光及其测量

杂散光是在多通道光谱仪中形成光谱背景的主要原因。背景深，则强度弱的谱线就不易

测定, 给辐射定标也带来很大误差。可见, 对多通道光谱仪进行杂散光测量及研究是不可缺少的一项工作。

定义多通道光谱仪标称波长的谱杂散光系数  $T_{ij}(\lambda_i)$  为在标称波长  $\lambda_i$  上, 其它波长  $\lambda_j$  ( $i \neq j$ ) 的透过率  $\tau_j(\lambda_i)$  与标称波长的透过率  $\tau_i(\lambda_i)$  之比。

多通道光谱仪标称波长  $\lambda_i$  的总杂散光系数  $T_{i\cdot}$  为谱杂散光系数对波长积分之和, 即:

$$T_{i\cdot} = \frac{\sum_{j=1}^n \tau_j(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda}{\tau_i(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda} = \sum_{j=1}^n T_{ij}(\lambda_i) (i \neq j) \quad (7)$$

多通道光谱仪的杂散光系数测量实验系统框图如图 3 所示。

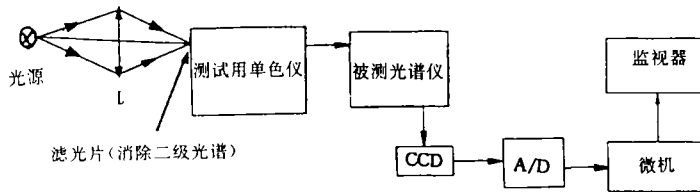


图 3 杂散光系数测量实验框图

从测量计算结果可知, 研制的多通道光谱仪总杂散光系数约为 (1~4)% 杂散光比其它光谱仪严重。

## 6 对几种材料的光谱分布的测试结果

选择的两种材料是黄布 (测反射光谱用) 和 19A 玻璃 (测透射光谱用), 光源是溴钨灯。当由多通道光谱仪测反射光谱时, 先测标准白板 (陶瓷  $\varphi 52$ ) 反射时的探测器输出信号  $V_0(\lambda)$ , 然后测黄布反射时的探测器输出信号  $V(\lambda)$ , 标准白板反射光谱分布是已标定好的, 此时, 黄布的反射光谱分布  $\rho(\lambda)$  为:

$$\rho(\lambda) = \frac{V(\lambda)}{V_0(\lambda)} \cdot \rho_0(\lambda) \cdot 100\% \quad (8)$$

测透射光谱分布时, 分别测不加 19A 玻璃和加 19A 玻璃时的输出信号  $V_0(\lambda)$  和  $V(\lambda)$ , 则 19A 玻璃的透射光谱分布为:

$$\tau(\lambda) = \frac{V(\lambda)}{V_0(\lambda)} \cdot 100\% \quad (9)$$

然后, 由分光光度计测量黄布的反射光谱分布和 19A 玻璃的透射光谱分布。

从测量结果可知, 黄布截止波长在 450nm 处, 对 450nm 以下的光谱反射率极低, 19A 玻璃的透射光谱峰值在 530nm 外。两种测量结果基本上吻合。

## 7 结 束 语

本文对线阵列硅探测器多通道光谱仪实验系统的光谱特性、辐射性能、杂散光及数据处理等方面进行了初步的研究和评价。研究和分析结果说明线阵列硅探测器多通道光谱仪的性能基本上达到设计要求。

线阵列硅探测器多通道光谱仪的各种性能提高需多次测试与研究,有待于在将来的工作中完成。在野外现场工作时,与实验室测量条件不同,应考虑结构简单、轻便、功耗低、测量时间短、精度高等方面特性。因此,在仪器硬件、数据记录和处理等方面都需要进一步研究和分析设计。

## **The Characteristic Evaluating and Research for a Multichannel Spectrometer with Silicon Photodiode Linear Array Detector**

Quan Shizhu

*(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences,  
Changchun130021)*

### **Abstract**

The characteristics of a multichannel spectrometer with silicon photodiode linear array detector are discussed and experimentally evaluated. The adjustment of the visible/near infrared flat focal plane polychromator, circuit design of silicon array detector driver and trigger, development of microcomputer interface and software are accomplished, and the following aspects are discussed: The central wavelengths of the various spectral bands, spectral bandwidth and spectral range of the multichannel spectrometer are calibrated, the calibration error, spectral resolution and radiation response are analyzed and discussed; Spectral radiation calibration is accomplished, the relationship between digital response of detector elements and input irradiance are established according to spectral irradiance standard, dynamic range of the instrument, radiation calibration error and response nonuniformity of silicon array detector.

**Key Words:** Spectrometer, Linear array detector