

引用格式: GUO Pan, DENG Yanbao, WANG Lifu, et al. Optical Spectrometer Design of Combined Unfolded Czerny-Turner Spectrometer Sharing One Common Linear-array Detector[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(6):0622002  
郭磐,邓延宝,王立福,等.一种共用线阵探测器的双M型C-T光谱仪[J].光子学报,2022,51(6):0622002

# 一种共用线阵探测器的双M型C-T光谱仪

郭磐<sup>1</sup>, 邓延宝<sup>1</sup>, 王立福<sup>1</sup>, 陈思颖<sup>1</sup>, 檀望舒<sup>1</sup>, 张寅超<sup>1</sup>, 孙雨婷<sup>1</sup>, 张嘉忆<sup>1</sup>,  
杨文慧<sup>2</sup>, 陈和<sup>1</sup>

(1 北京理工大学 光电学院 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

(2 军事科学院 军事医学研究院 微生物流行病学研究所 病原微生物与生物安全国家重点实验室, 北京 100071)

**摘要:** 现有的切尼特纳光谱仪实现双波段或多波段探测时往往结构复杂, 设计成本高, 而以线阵探测器接收信号的光谱仪又很少用于多波段探测。本文在传统的切尼特纳光谱仪的基础上, 设计了一种共用线阵探测器的双M型切尼特纳光谱仪, 用于双激光诱导荧光光谱的探测。该光谱仪采用线阵光电倍增管作为探测器, 可以实现 280~460 nm 和 380~560 nm 两个波段光谱的快速探测。采用发散光照射光栅的方法校正像面光斑在色散方向上的宽度, 从而实现对光谱仪像散的控制。利用光学设计软件对系统光路结构进行仿真优化, 对系统的线色散率和 RMS 光斑进行理论分析, 并在原理样机中进行了实验验证。结果表明, 两个波段平均光谱分辨率分别为 5.84 nm、6.15 nm。本文提出的光谱仪不仅适用于双激光诱导荧光光谱应用, 在其他双通道光谱探测领域中也具有很大的应用前景。

**关键词:** 光学设计; 切尼特纳光谱仪; 双波段探测; 激光诱导荧光; 光电倍增管

中图分类号: O433.1; TH744.1

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20225106.0622002

## 0 引言

切尼特纳(Czerny-Turner, C-T)光谱仪是现有光谱仪结构中最为常用的一种, 由于其结构简单且具有良好的分辨率, 被广泛地应用于拉曼光谱检测<sup>[1]</sup>、荧光光谱分析<sup>[2]</sup>、大气遥感<sup>[3]</sup>等领域。切尼特纳结构是从只有一个大凹面反射镜的艾伯特-法斯第结构演变而来的, 分开的两个球面镜分别用来准直和聚焦, 不仅减少了系统的像差, 而且避免了二次衍射和多次衍射, 提高了探测范围, 非常适用于双波段光谱探测系统。双波段光谱探测常用可见红外波段双通道光谱探测系统<sup>[4]</sup>、双激发激光诱导荧光光谱检测系统等<sup>[5-6]</sup>。

为实现双波段或多波段光谱探测, 国内外学者提出了许多基于切尼特纳变形结构的光谱仪设计方法。MARSHALL 等提出一种紧凑型宽波段切尼特纳光谱仪<sup>[7]</sup>, 将 4 块不同刻线密度的光栅拼接为一个矩阵, 完成了从 370 nm 到 1 170 nm 四个波段的成像探测。BELAY G Y 等在非色散方向上使用 3 个刻线密度相同而闪耀波长不同的光栅完成了在紫外光、可见光、近红外光三个不同波段的探测<sup>[8]</sup>。薛庆生等使用两块反射式平面光栅, 通过改变光栅两个维度内的俯仰角度实现在 276~492 nm 和 480~700 nm 的光谱探测<sup>[9]</sup>, 徐明明等将两块相同平面光栅垂直排列, 利用了光栅旋转角度的不同, 实现了 276~492 nm 和 480~700 nm 的光谱探测<sup>[10]</sup>。上述结构均使用面阵探测器来接收信号, 有些甚至需要不止一个探测器, 成本较高。而且, 这些结构都使用了多块光栅, 利用光栅倾角的不同或位置的错位实现双波段或多波段的探测, 对光栅的安装精度要求极高, 设计相对复杂。此外, 这些系统光源部分都是只有一个光学入口, 无法满足双光学入口共探测的要求。

在双波长激发粒子荧光光谱检测系统中, 由于气溶胶微粒的流动性, 用同一光学入口很难区别两段被

基金项目: 中国博士后科学基金(No. 2020M680369)

第一作者: 郭磐(1981—), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为大气探测激光雷达技术与系统。Email: guopan@bit.edu.cn

通讯作者: 陈和(1982—), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为激光雷达和光谱探测。Email: shinianshao@gmail.com

收稿日期: 2022-01-26; 录用日期: 2022-03-09

<http://www.photon.ac.cn>

激发的荧光信号,而若将两端荧光信号单独分开探测又增加了系统的冗杂性。采用双光学入口共探测的方式能快速交替激发同一区域气溶胶并进行荧光信号的采集,提高了探测的准确性,并且使系统更加集成化,实验操作更便捷。

对于一维光谱信息的快速探测,线阵探测器比面阵探测器更有优势。以电荷耦合器件(CCD)为例,面阵CCD像元总数多,相比线阵CCD单排像元数少,且用于接收一维光谱信息时,多个像元重复探测相同信号,效率低,相比而言,线阵CCD结构简单,成本低。对于荧光光谱等微弱信号,用光电倍增管探测效率更高,32通道线阵光电倍增管被证明可以很好的应用到激光诱导荧光光谱探测系统<sup>[11]</sup>。

本文提出了一种共用探测器的双M型C-T光谱仪光学设计方法,并且采用线阵光电倍增管(Photomultiplier Tube, PMT)作为光谱仪的探测器。根据C-T光谱仪像散的形成原理,本研究利用发散光照射光栅的方法,完成对系统像散的控制,使像面光斑宽度和长度匹配光电倍增管各通道;并结合像散控制和两路光谱共用探测器的几何条件得到系统参数,利用Zemax光学设计软件进行系统仿真、优化和分析,实现了280~460 nm和380~560 nm双波段本征荧光光谱快速交替探测的设计目标;研制了光谱仪样机并通过实验验证了设计的可行性。本文所设计的双光谱仪结构简单,成本低,可用于双波长激发的激光诱导荧光的光谱检测系统,为基于线阵探测器双波段光谱探测的研究工作提供新的设计思路。

### 1 双M型C-T光谱仪系统设计

传统C-T光谱仪,光路呈M型展开,因此也被称为M型C-T光谱仪,其结构一般由入射狭缝、平面光栅、两个球面反射镜和探测器组成<sup>[12]</sup>。从狭缝入射的光线经过准直反射镜反射后平行入射到光栅,不同波长的光发生衍射后经过聚焦反射镜聚焦到探测器上,实现光谱的探测。

本文提出的双M型光谱仪系统采用两个独立的M型C-T光谱仪相结合的方式,实现了图1所示的结构,其中将低波段光谱仪设为光谱仪A,其相关参数用角标为1的符号表示,较高波段光谱仪设为光谱仪B,相关参数用角标为2的符号表示。为使两光谱仪都在探测器上理想成像,两段光路不能有重叠。但由于两光谱仪对称分布,两光谱仪聚焦镜 $F_1$ 、 $F_2$ 之间很容易产生机械结构碰撞。

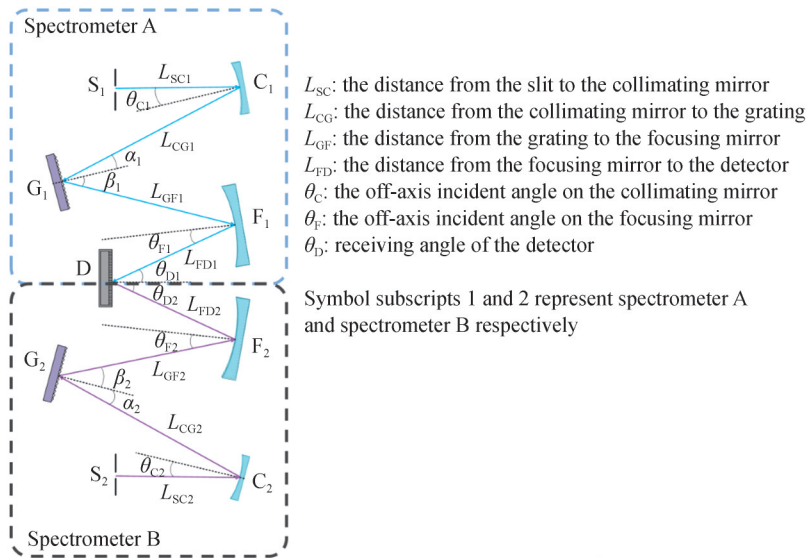


图1 双M型共用探测双光谱仪系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a combined unfolded C-T configuration

根据几何关系,避免机械碰撞可实现共用同一探测器的参数条件是

$$L_{FD1} \tan \theta_{D1} + L_{FD2} \tan \theta_{D2} > \frac{D_{F1} + D_{F2}}{2} \quad (1)$$

式中, $D_{F1}$ 、 $D_{F2}$ 分别表示光谱仪A、光谱仪B聚焦反射镜的口径大小。

### 1.1 像散控制

在切尼特纳光谱仪当中,离轴入射的光线经过球面镜反射后在子午方向和弧矢方向的聚焦位置不同,从而形成像散。本系统的两段光谱共用同一线阵探测器,各像元上的光斑大小需保持均匀且两段光谱的分辨率需尽量保持一致,同时,由于只获取一维光谱信息,并不需要完全校正像散,只要控制像散使光斑在色散方向上宽度足够小,而在非色散方向容许光斑在探测器像元范围内存在一定长度的扩散。可以利用发散光照射光栅的方法来控制系统像散<sup>[13-16]</sup>。

C-T光谱仪的弧矢像距 $F_S$ 和子午像距 $F_T$ 表示为<sup>[13]</sup>

$$F_S = \frac{R_C R_F L_{SC}}{2L_{SC}(R_C \cos \theta_F + R_F \cos \theta_C) - R_C R_F} \quad (2)$$

$$F_T = \frac{R_C R_F \cdot L_{SC}}{2L_{SC} \left( R_C \sec \theta_F + R_F \frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2 \beta} \sec \theta_C \right) - R_C R_F \frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2 \beta}} \quad (3)$$

式中, $R_C, R_F$ 分别表示准直反射镜和聚焦反射镜的曲率半径,光栅入射角 $\alpha$ 和衍射角 $\beta$ 满足光栅基本方程

$$Gm\lambda = \sin \alpha + \sin \beta \quad (4)$$

式中, $G$ 是光栅刻线密度, $m$ 是衍射级次。

一般弧矢面焦距大于子午面焦距,这种情况下子午面焦面处的光斑在非色散方向扩展,呈现长条状。只有子午面和弧矢面焦距相等时像散才被校正,焦点处的光斑为小圆斑。以子午焦距作为光谱仪的像距,在允许光斑向非色散方向扩展的情况下,光谱仪子午焦面和弧矢焦面如图2所示。根据几何关系,光斑在非色散方向(弧矢面)的扩展长度 $X$ 为

$$X = \left( 1 - \frac{F_T}{F_S} \right) \cdot D_F \quad (5)$$

一般情况下,以确定的入射角从狭缝入射到准直反射镜的光线,经反射后平行入射到光栅上。所谓发散光照射光栅,就是通过减小狭缝到准直反射镜的距离 $L_{SC}$ ,使经过准直反射镜反射后的光不再平行,光线发散照射到光栅上。也可以通过增大 $L_{SC}$ ,使得经过准直反射镜反射的光线会聚照射到光栅上。上述两种方法原理完全相同,可视为同一类方法。由于 $L_{SC}$ 变化不大,发散光照射光栅的光线仍可近似看作平行光,所以

$$D_F = 2 \cdot L_{SC} \cdot NA \quad (6)$$

限定中心波长处光斑扩展长度为 $X$ ,即可根据式(2)、(3)、(5)推出

$$AL_{SC}^2 + BL_{SC} + C = 0 \quad (7)$$

式中,

$$\begin{cases} A = 4 \cdot NA \cdot \left( R_C \cos \theta_F + R_F \cos \theta_C - R_C \sec \theta_F - R_F \sec \theta_C \frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2 \beta} \right) \\ B = 2X \left( R_C \sec \theta_F + R_F \sec \theta_C \frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2 \beta} \right) + 2R_C R_F \cdot NA \cdot \frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2 \beta} - 2R_C R_F \cdot NA \\ C = R_C R_F X \frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2 \beta} \end{cases} \quad (8)$$

狭缝到准直镜的距离 $L_{SC}$ 就可以由式(7)求解得出。之后可根据式(3)得到子午像距 $F_T, L_{GF}, \theta_D$ 等光谱

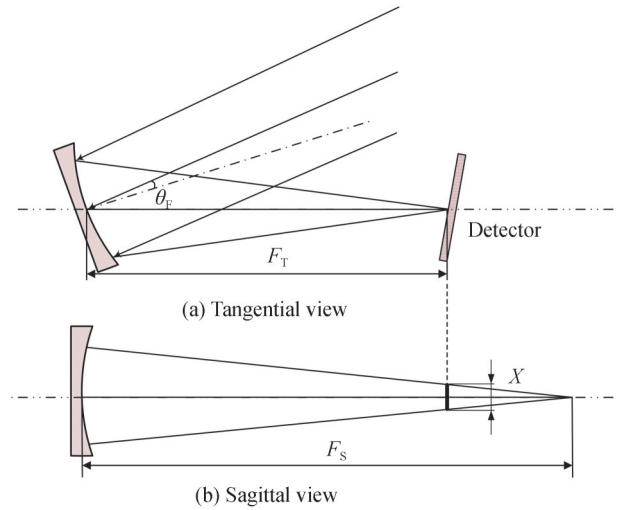


图2 子午面和弧矢面的聚焦镜示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the tangential plane and the sagittal plane.

关键参数,可以按照一般发散光照射光栅校正像散的方法依次求出<sup>[16]</sup>。

## 1.2 线色散率

根据光栅基本方程可知,不同波长光线经光栅衍射后衍射角各不相同。因此光线在球面聚焦反射镜上的离轴入射角 $\theta_F$ 随波长的变化而变化。由式(2)、(3)可知,子午面焦距 $F_T$ 和弧矢面焦距 $F_S$ 也随波长变化,因此不同波长处的分辨率也存在着差异。

在通过分散光照射光栅控制像散的方法中,用式(9)计算不同波长对应的线色散率。

$$\frac{dl'}{d\lambda} = \frac{d\beta'}{d\lambda} \frac{dl'}{d\beta'} = \frac{G}{\cos\beta'} \sec\theta_D \left( L_{GF} + L_{FD} - \frac{2L_{GF}L_{FD}}{R_F \cos\theta'_F} \right) \quad (9)$$

式中, $\beta'$ 代表任意波长的衍射角, $\beta$ 为中心波长的衍射角,不同波长光线对应的聚焦反射镜离轴入射角为<sup>[17]</sup>

$$\sin\theta'_F = \sin(\beta' - \beta + \theta_F) - \frac{L_{GF}}{R_F} \sin(\beta' - \beta) \quad (10)$$

式中, $\theta'_F$ 为不同波长对应于在聚焦镜上的离轴入射角, $\theta_F$ 是中心波长对应的聚焦反射镜离轴入射角。结合式(9)、(10)就可以得到系统全波段色散率的变化。

## 1.3 系统设计流程

本文提出的共用线阵探测器的双M型C-T光谱仪系统设计流程为:首先,根据光谱范围和分辨率要求,选择光栅刻密度 $G$ ,光栅入射角 $\alpha$ ;然后,选择尽可能小的 $\theta_C$ 和合适的 $R_F, R_C$ ,之后 $\theta_F, L_{SC}, L_{FD}, \theta_D$ 等关键参数按照发散光照射光栅校正像散的一般方法求出,至此分别完成单路C-T光谱仪的初始结构计算;根据式(1)验证初始计算的系统是否满足共用探测器条件,如果计算出来两路光谱仪的 $L_{FD}, \theta_D$ 无法满足共用探测器结构的条件,适当调整单路光谱仪 $\alpha, \theta_C$ 和 $\theta_D$ 等基本参数,直到系统满足共用探测器条件,完成双光谱仪共用探测器结构初步设计。

## 2 仿真与优化

本文设计的双光谱仪将用在双激光诱导荧光光谱探测系统中,该系统接收的两个荧光谱段分别为280~460 nm和380~560 nm。切尼特纳光谱仪多以CCD作为探测器,但是在光谱分辨率要求不高的情况下,使用光电倍增管在微弱信号实时探测方面更有优势。考虑到荧光信号寿命短、信号强度微弱,选择滨松H7260线性多阳极光电倍增管作为双光谱仪系统的接收探测器,该探测器在280~600 nm之间具有很高的量子效率。如图3所示,该探测器有32个线阵通道,光谱的分辨率和成像区域都由这一PMT决定,它的每个通道的有效区域面积为:0.8 mm × 7 mm,每个通道间隔为0.2 mm,左右两边分别预留一个通道,以中间30个通道作为目标波段接收通道,得到目标分辨率为6 nm。

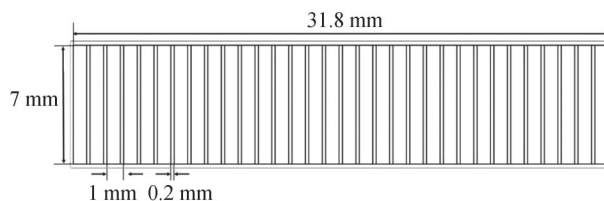


图3 探测器像面结构示意图

Fig. 3 Schematic of anode area in LaPMT (Hamamatsu H7260)

根据线阵探测器有效区域长度和系统探测的光谱范围可以得到满足系统要求的线色散率

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{G \cdot f}{\cos\beta \cdot \cos\theta_D} \quad (11)$$

式中, $f$ 是聚焦反射镜的焦距,在光线离轴入射情况下

$$f = R_F \frac{\cos\theta_F}{2} \quad (12)$$

两光栅都选择刻线密度为900 g/mm,两波段都使用衍射级次 $m = 1$ 。为了能够得到较强的入射信号,选择3 mm × 200 μm的狭缝,两段光谱仪使用的准直反射镜和聚焦反射镜曲率半径均选择为300 mm。根

据系统要求,光谱仪 A 和光谱仪 B 的基本参数如表 1 所示。

表 1 系统基本参数  
Table 1 Basic parameters of system

Parameter	Value	Parameter	Value
Center wavelength of spectrometer A/nm	370	Center wavelength of spectrometer B / nm	470
$\alpha_1/(\circ)$	12	$\alpha_2/(\circ)$	5
$\beta_1/(\circ)$	32.8	$\beta_2/(\circ)$	30.7
$R_{C1}/\text{mm}$	300	$R_{C2}/\text{mm}$	300
$R_{F1}/\text{mm}$	300	$R_{F2}/\text{mm}$	300
$G_1/\text{mm}^{-1}$	900	$G_2/\text{mm}^{-1}$	900

根据系统设计流程,计算得到双光谱仪的初始结构。利用 Zemax 光学仿真软件分别对两个初始结构建模,模型中光栅和狭缝均采用上述描述的规格。然后分别对单个 M 型光路结构进行优化,优化过程中均以色散方向上的光斑均方根值(Root Mean Square, RMS)为优化目标,按照参数的重要性排序,选取  $\theta_D$ ,  $L_{FD}$ ,  $\theta_F$ ,  $L_{SC}$ ,  $L_{CG}$  等为优化变量。根据两路光谱共用探测器条件以及关键变量全局优化后的结果,可限定变量在特定区域,作为优化的边界条件。采用先多变量后单变量,先粗调整后精调整的方案进行优化。两路光谱优化后的结构参数如表 2 所示。图 4 展示了优化后系统结构的光路布局图。

表 2 优化后的结构参数  
Table 2 Parameters for the optimized structure

Parameter	Value	Parameter	Value
$\theta_{C1}/(\circ)$	7	$\theta_{C2}/(\circ)$	7
$\theta_{F1}/(\circ)$	13	$\theta_{F2}/(\circ)$	14
$\theta_{D1}/(\circ)$	15	$\theta_{D2}/(\circ)$	17
$L_{SC1}/\text{mm}$	130.2	$L_{SC2}/\text{mm}$	128.4
$L_{CG1}/\text{mm}$	220	$L_{CG2}/\text{mm}$	240
$L_{GF1}/\text{mm}$	121	$L_{GF2}/\text{mm}$	150
$L_{FD1}/\text{mm}$	169	$L_{FD2}/\text{mm}$	170

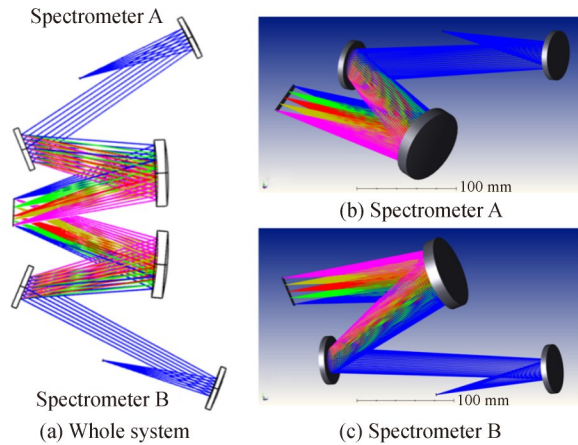


图 4 系统光路结构

Fig. 4 Layout of the system

### 3 分析与实验

#### 3.1 光谱分辨率

线色散率的倒数称为倒色散率,表示像面上单位距离内探测到的光谱宽度,用倒色散率来表征系统的光谱分辨率。根据式(9)、(10),得到光谱仪 A 和光谱仪 B 的倒色散率随波长的变化曲线如图 5 所示。可以看出,色散程度随波长的增大而增大,倒色散率随波长的增大而减小。在光谱仪 A 和光谱仪 B 各自中心波

长处的倒色散率分别为 6.03 nm/mm, 6.10 nm/mm, 光谱仪 A 两边缘波长处, 倒色散率分别为 6.31 nm/mm, 5.70 nm/mm。光谱仪 B 两边缘波长处, 倒色散率分别为 6.34 nm/mm, 5.80 nm/mm。结果表明, 光谱仪 A 和光谱仪 B 中心波长处的光谱分辨率均为 6 nm; 全波段的最大光谱分辨率差异仅为 0.6 nm。

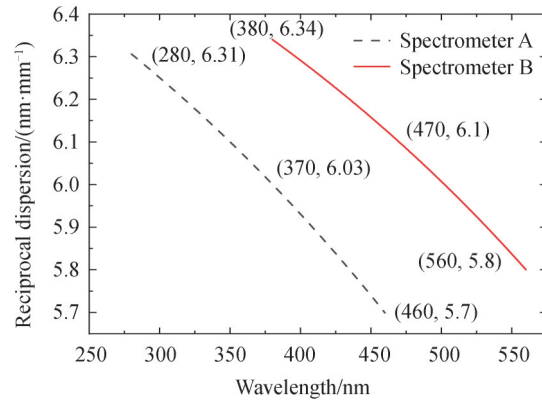


图 5 光谱仪 A 和光谱仪 B 倒色散率曲线

Fig. 5 Reciprocal dispersion versus wavelength in Spectrometer A and Spectrometer B

### 3.2 光斑质量

用光谱仪像面上的光迹图来评价系统成像质量。每一路光谱仪选择全波段内间隔相等的 5 个波长进行分析, 且视场类型选择为物方高度, 以狭缝中点和狭缝各边缘端点作为视场点。图 6 所示为中心单视场下像面上的光迹图, 其他各视场光迹图中光斑大小和分布情况基本相同。因为两光谱仪对称分布, 所以在探测器上的波长排列顺序是相反的。可以看出, 优化后的光斑在色散方向保持着极小的宽度, 而在非色散方向, 两光谱仪单视场光斑大小随着波长的增大, 光斑扩展长度也在增大。PMT 上单个像元的长度是大于理想光斑长度的, 光斑长度的扩展使光斑成像区域与 PMT 单个阳极通道更加匹配, 并且这样充分利用了 PMT 的性能, 使得探测信号更加稳定。

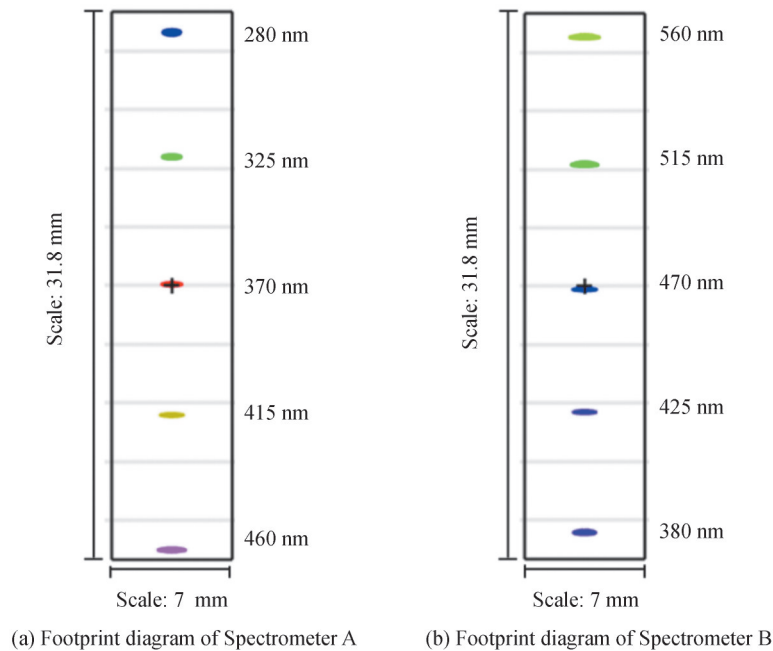


图 6 单视场足迹图

Fig. 6 Footprint diagram in single field

为了直观表现各波长处光斑大小的变化情况,给出优化后光谱仪A与光谱仪B在切平面的单视场RMS光斑半径与波长的关系,如图7所示。可以看出,光谱仪A在310 nm波长之后,RMS光斑半径小于50  $\mu\text{m}$ ,在280 nm处RMS光斑最大,为67.1  $\mu\text{m}$ 。而光谱仪B在522 nm之前RMS光斑半径小于50  $\mu\text{m}$ ,在560 nm处RMS光斑最大,为53.2  $\mu\text{m}$ 。结果表明,两光谱仪在80%的波段下RMS光斑半径小于50  $\mu\text{m}$ 。说明本研究提出的共用线阵探测器的双光谱仪可以很好地提取光谱谱线,由于本光谱仪使用了像面较宽的光电倍增管,导致光谱分辨率一般,但只要将线阵光电倍增管更换为面元更小的探测器(如线阵CCD等),并且选择宽度更小的狭缝,即可实现更小的光谱分辨率。

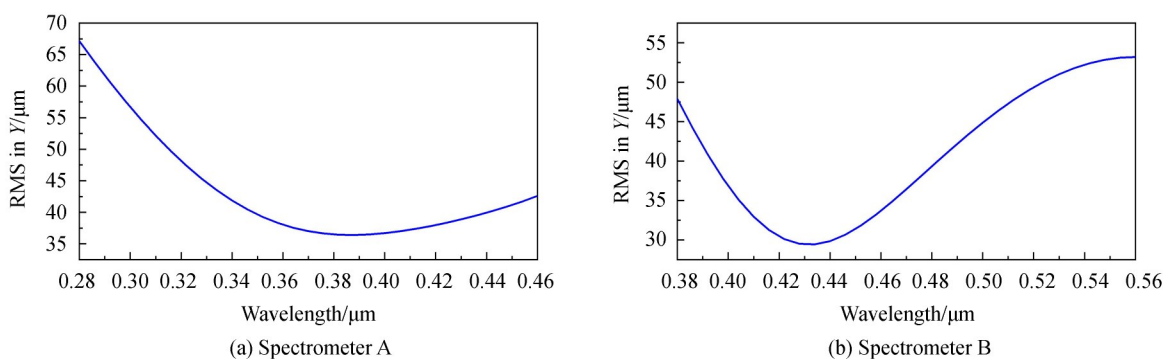


图7 子午面光斑RMS半径随波长变化的曲线

Fig. 7 Relationship between RMS spot radius and wavelength in the tangential plane

为了分析线阵光电倍增管上的光谱分布,需要同时追迹16条谱线,得到如图8所示的全视场光谱足迹图。使用Zemax光学设计软件采用16个波长来模拟各通道光谱分布,结果表明在非色散方向的扩展基本不影响各个通道谱线的均匀成像。

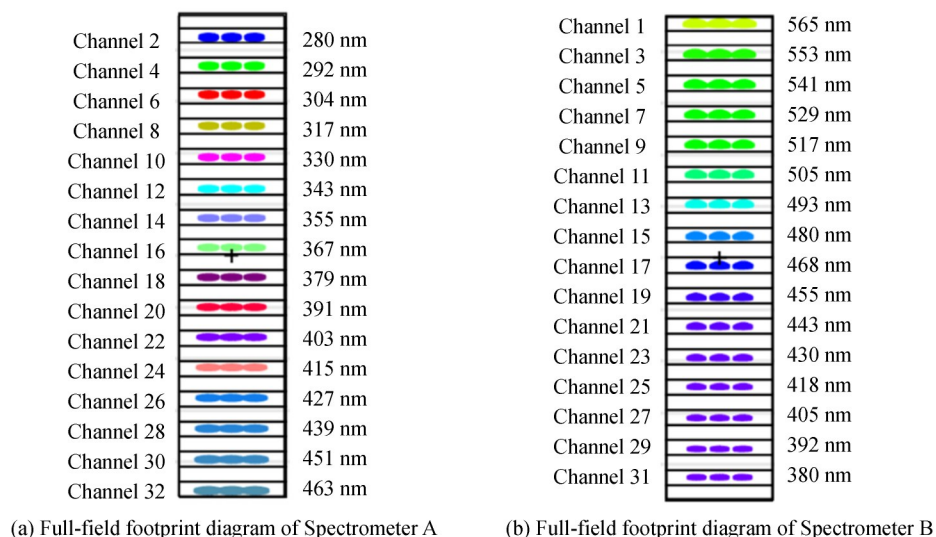


图8 像面各通道光谱分布

Fig. 8 Full-field footprint diagram

### 3.3 实验

根据参数设计和仿真结果搭建实验装置如图9所示,选择低压汞灯作为光谱测试实验的光源,由光纤将光源引入光谱仪,通过光纤准直镜和消色差的胶合透镜来控制狭缝之后光线的数值孔径。将汞灯分别接入光谱仪A和光谱仪B光学入口,利用光谱仪32通道采集软件得到实验结果如图10所示。从图中可以看出,光谱仪A在第6通道,第15通道,第22通道和第27通道有较强信号,分别对应汞灯的313.16 nm、365.01 nm、404.66 nm、435.83 nm四个光谱高峰,光谱仪B在第4通道,第22通道和第27通道存在较强信号,分别对应

汞灯的 546.07 nm、435.83 nm、404.66 nm 三个光谱高峰。根据实验结果,对于光谱仪 A,通过第 6 通道和第 27 通道对应波长差和跨越通道数之比,得到平均光谱分辨率为 5.84 nm;同样的方法,得到光谱仪 B 的平均光谱分辨率为 6.15 nm。结果表明,基于切尼特纳结构的共用线阵探测器的双光谱仪可以实现双波段光谱的探测且实验结果与仿真基本一致。

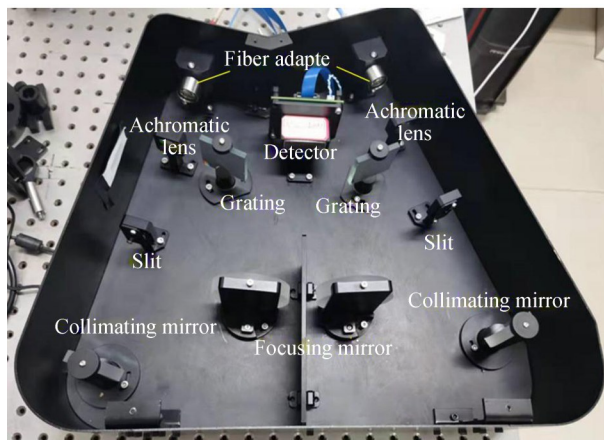


图 9 实验装置实物图

Fig. 9 Schematic diagram of real system

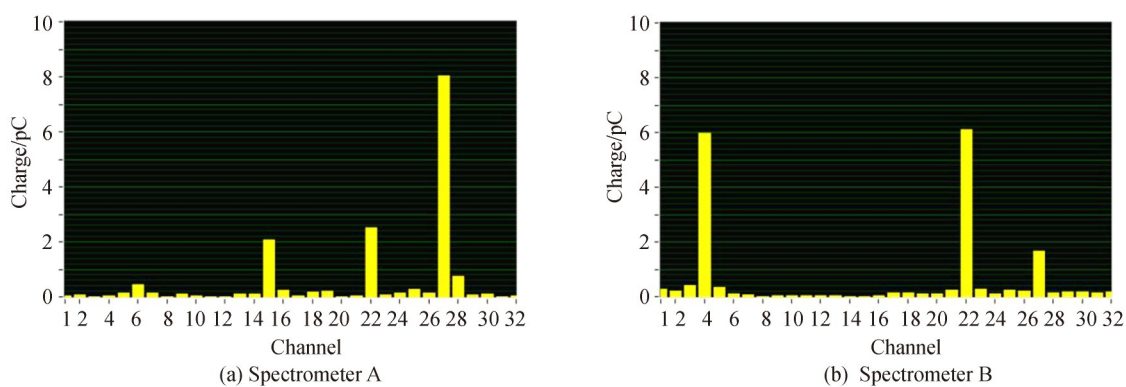


图 10 实测低压汞灯谱线

Fig. 10 Spectrum of low-pressure mercury lamp

## 4 结论

本文设计了一种基于切尼特纳结构的双 M 型光谱仪系统,实现了采用单个线性阵列光电倍增管对 280~460 nm 和 380~560 nm 光谱的探测。在不使用附加光学元件的情况下,使用发散光照射光栅的方法控制了系统像散。通过对双 M 型 C-T 光谱仪系统的光路仿真和初始结构的优化,将单视场子午面 RMS 光斑半径控制在 53  $\mu\text{m}$  以下,将弧矢方向的光斑扩展控制在合理的范围内,从而使光谱谱线在线性阵列光电倍增管各通道上均匀成像,两波段中心波长的光谱分辨率均达到 6 nm,整个工作波段内两路光谱仪光谱分辨率差最大约 0.6 nm。结果表明,可以用共用探测器接收双路光谱信息。本研究提出的共用线阵探测器的双 M 型 C-T 光谱仪,为双波段光谱系统的非成像设计、实现双波段甚至多波段探测提供了新的思路。

### 参考文献

- [1] AN Yan, LIU Ying, SUN Qiang, et al. Design and development of optical system for portable Raman spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 300-306.  
安岩, 刘英, 孙强, 等. 便携式拉曼光谱仪的光学系统设计与研制[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 300-306.
- [2] MIERCZYK Z, KOPCZYŃSKI K, ZYGMUNT M, et al. Fluorescence/depolarization lidar for mid-range stand-off detection of biological agents[C]. SPIE, 2011, 8037: 80371J.
- [3] PATEL M R, ANTOINE P, MASON J, et al. NOMAD spectrometer on the ExoMars trace gas orbiter mission: part 2-



- design, manufacturing, and testing of the ultraviolet and visible channel[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(10): 2771.
- [4] CHENG Xin, ZHANG Bao, HONG Yongfeng, et al. Optical design of an airborne dual-wavelength imaging spectrometer with high throughput[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 690-695.  
程欣, 张葆, 洪永丰, 等. 机载高光通量双波段成像光谱仪的设计[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(3): 690-695.
- [5] XU Ao, XIONG Chao, ZHANG Pei, et al. Research on dual-channel detection technology of bio-aerosols with intrinsic fluorescence measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 138-143.  
徐傲, 熊超, 张佩, 等. 基于本征荧光测量的双通道生物气溶胶检测技术研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 138-143.
- [6] PAN Y L, HILL S C, PINNICK R G, et al. Fluorescence spectra of atmospheric aerosol particles measured using one or two excitation wavelengths: Comparison of classification schemes employing different emission and scattering results[J]. *Optics Express*, 2010, 18(12): 12436-12457.
- [7] TORR M R, TORR D G. Compact imaging spectrograph for broadband spectral simultaneity[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(34): 7888-7898.
- [8] BELAY G Y, HOVING W, VAN DER PUT A, et al. Miniaturized broadband spectrometer based on a three-segment diffraction grating for spectral tissue sensing[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 134: 106157.
- [9] XUE Q, LU F, DUAN M, et al. Optical design of double-grating and double wave band spectrometers using a common CCD[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(23): 6823-6830.
- [10] XU Mingming, JIANG Qingwu, LIU Wenqing, et al. An improved method for optical system design and optimization of double grating spectrometer[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 184-189.  
徐明明, 江庆五, 刘文清, 等. 一种新型双光栅光谱仪光学系统设计与优化[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(1): 184-189.
- [11] PAN Y, COBLER P, RHODES S, et al. High-speed, high-sensitivity aerosol fluorescence spectrum detection using a 32-anode photomultiplier tube detector[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2001, 72(3): 1831-1836.
- [12] SHAFER A B. Correcting for astigmatism in the Czerny-Turner spectrometer and spectrograph[J]. *Applied Optics*, 1967, 6(1): 159-160.
- [13] DOWELL M W. Design of Czerny-Turner spectrographs using divergent grating illumination[J]. *Optica Acta*, 1975, 22(5): 473-475.
- [14] XUE Q, WANG S, LU F. Aberration-corrected Czerny-Turner imaging spectrometer with a wide spectral region[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(1): 11-16.
- [15] AUSTIN D R, WITTING T, WALMSLEY I A. Broadband astigmatism-free Czerny-Turner imaging spectrometer using spherical mirrors[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(19): 3846-3853.
- [16] WANG C, CHEN H, ZHANG Y, et al. Optical design of a crossed Czerny-Turner spectrometer with a linear array photomultiplier tube[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(28): 7789-7794.
- [17] DONG Keyan, LI Xinhang, AN Yan. Influence factors of Czerny-Turner edge band astigmatism correction[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(10): 2384-2391.  
董科研, 李欣航, 安岩. 影响 Czerny-Turner 结构像散校正的因素[J]. *光学精密工程*. 2016, 24(10): 2384-2391.

## Optical Spectrometer Design of Combined Unfolded Czerny-Turner Spectrometer Sharing One Common Linear-array Detector

GUO Pan<sup>1</sup>, DENG Yanbao<sup>1</sup>, WANG Lifu<sup>1</sup>, CHEN Siying<sup>1</sup>, TAN Wangshu<sup>1</sup>, ZHANG Yinchao<sup>1</sup>, SUN Yuting<sup>1</sup>, ZHANG Jiayi<sup>1</sup>, YANG Wenhui<sup>2</sup>, CHEN He<sup>1</sup>

(1 MOE Key Laboratory of Optoelectronic Imaging Technology and System, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(2 State Key Laboratory of Pathogen and Biosecurity, Institute of Microbiology and Epidemiology, Academy of Military Medical Sciences, Academy of Military Sciences, Beijing 100071, China)

**Abstract:** Czerny-Turner spectrometer has been found for widespread application in the detection of Raman, fluorescence, and atmospheric remote sensing because of its simple structure and high resolution. The conventional Czerny-Turner configuration also known as unfolded C-T spectrometer, consists of two concave mirrors where the light path has no folded part. It can detect a wide range of light, so it is very suitable for dual-band detection. Dual-band spectral detection is mostly used for dual-channel spectral detection systems in the visible infrared band, dual-wavelength-excitation particle fluorescence

spectrometer. However, for dual-band or multi-band detection, the spectrometer based on the Czerny-Turner structure often needs to be deformed, and the detector is always selected as area array detectors and detectors even need more than one. It makes the structure of the system more complex and increases the cost. Considering that linear array detectors are more beneficial than planar array detectors for the detection of one-dimensional spectral information, and linear array photomultiplier tube has higher detection efficiency for weak signals and has been verified for effectiveness in the dual-laser-induced fluorescence detection system. We proposed a modified optical design of a combined unfolded Czerny-Turner Spectrometer sharing one common linear-array detector. In the proposed design, the astigmatism of the system is controlled by using divergent illumination on the grating without introducing any additional optical elements, which is used for the correction of astigmatism in the Czerny-Turner spectrometer. By considering the condition of sharing one detector and the astigmatism correction method of the illuminating grating, the proposed design method of the system is provided, and the proposed design method of the system is provided. Zemax is used for simulation and optimization of the proposed optical system model. The spectrometer can detect two bands of light i. e., 280~460 nm and 380~560 nm. We have also analyzed the reciprocal linear dispersion, which demonstrates that the reciprocal linear dispersion at the central wavelength of two wavebands are 6.03 nm/mm, 6.10 nm/mm, respectively. That means the proposed system satisfies the spectral resolution of 6 nm, and the spectral resolution difference of the two spectrometers in a whole working band is less than 0.6 nm. Finally, the RMS spot size of the system is also analyzed theoretically. In the first band (i. e., 280~460 nm) the maximum RMS spot is 67.1  $\mu\text{m}$  at 280 nm, while in the second band (i. e., 380~560 nm) the maximum RMS spot is 53.2  $\mu\text{m}$  at 560 nm. The 80% range of RMS spot radius is less than 50  $\mu\text{m}$  in these two bands. In view of the design and simulation results, the prototype model is developed and the experimental verification finished. Mercury lamp was used for the optical inlet of spectrometer as a light source, and the experimental results were obtained by 32 linear array photomultiplier tube, the results demonstrate that the positions of several spectrum peaks detected are consistent with the simulation. This proposed method extends the application of the system structure with two light paths and one common linear detector in the elaborate and expensive designs, which may be beneficial for the non-imaging design of dual-waveband spectral systems.

**Key words:** Optical design; Czerny-Turner spectrometer; Dual-band detection; Laser-induced fluorescence; Photomultiplier tube

**OCIS Codes:** 220.4830; 120.4570; 300.6190; 300.2530