

文章编号 1004-924X(2011) 08-1736-07

凸面光栅成像光谱仪的干涉法装调

刘玉娟^{1,2*}, 巴音贺希格¹, 崔继承^{1,2}, 唐玉国¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要:研究了 Offner 凸面光栅成像光谱仪同心分光系统的装调方法。将双光束干涉基本原理与同心光学系统基本特点相结合, 提出了适用于 Offner 凸面光栅成像光谱仪的干涉装调法。该方法首先对凸面光栅成像光谱仪同心光学系统的两个凹球面反射镜进行同心装调, 由于单个球面反射镜的离焦量难以调整至零, 故引入相对离焦使两个反射镜的离焦量相等, 从而实现两镜同心。另外, 考虑无法用同一套凹球面补偿镜来检测凸球面, 故提出采用谱图直读法来确定凸面光栅位置, 实现了 Offner 凸面光栅成像光谱仪的高精度同心装调。实验结果表明, 经干涉法装调后, 分光系统主镜和三镜的球心距离可以达到几个纳米甚至更高。

关键词: 成像光谱仪; 凸面光栅; 干涉装调法; 谱图直读法

中图分类号: TH744.1 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20111908.1736

Interferometric alignment of imaging spectrometers with convex gratings

LIU Yujuan^{1,2*}, Bayanheshig¹, CUI Jicheng^{1,2}, TANG Yuguo¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)
* Corresponding author, E-mail: xuliuyujuan@163.com

Abstract: How to align the spectral systems of Offner concentric imaging spectrometers with convex gratings was researched. Based on the principle of dual-beam interference and characteristics of concentric systems, an interferometric alignment method for the Offner imaging spectrometers with convex gratings was proposed. With this method, the primary and tertiary mirrors of Offner imaging spectrometers were aligned firstly. As the defocus of single spherical mirror could not be aligned to zero, the relative defocus was introduced to adjust the defoci of the two mirrors to achieve the concentricity. Furthermore, because the concave compensator could not test the convex mirror, the convex grating was arranged according to reading spectrogram directly to complete concentric alignment with high precision. The result indicates that the interferometric alignment can achieve the distance between centers of the primary and tertiary mirrors of Offner imaging spectrometers up to several nano-

收稿日期: 2010-09-28; 修订日期: 2011-01-11.

基金项目: 国家创新方法工作专项资助项目 (No. 2008IM040700); 吉林省科技支撑计划资助项目 (No. 20106011)

meters or near zero.

Key words: imaging spectrometer; convex grating; interferometric alignment; direct-reading spectrography

1 引言

凸面光栅成像光谱仪采用基于 Offner 同心结构的离轴三反式凸面光栅分光结构,该结构由两个凹球面反射镜和一个凸球面光栅组成,所有光学表面均为反射球面且所有球面的球心为同一点^[1]。Offner 同心分光系统与望远镜头组合设计的凸面光栅成像光谱仪是图谱合一的分析仪器。与传统成像光谱仪相比,同心系统特性使凸面光栅成像光谱仪具有谱线弯曲和色畸变小、无像散、结构简单、无移动部件等优点^[2-3],这种前沿技术在军事侦察、资源勘查、自然灾害监控、环境污染评估、医学诊断治疗等诸多领域具有广阔的应用前景^[4-7]。近年来,随着光栅制造技术的发展,凸面光栅制造工艺不断改进,凸面光栅同心成像光谱仪从最初的理论研究逐渐走向实际应用^[8-11]。

光谱仪器的装调是仪器生产的最后一个工艺流程,也是仪器走向产品化的关键环节,提高装调精度是实现高性能仪器的基本要求^[12]。Offner 同心分光系统作为凸面光栅成像光谱仪的核心部分,直接决定了成像光谱仪的光学性能,因此,Offner 同心分光系统的高精度装调是实现凸面光栅成像光谱仪性能的关键。对凸面光栅成像光谱仪而言,装调误差会造成同心结构离心,从而导致光谱分辨率降低,像散和谱线弯曲等像差增大。由于离轴三反系统中3个球面的公共球心是一个空间点,在实际装调时,确定这个空间点的简便易行的方法不多,也未见文献报道,这在一定程度上影响了 Offner 凸面光栅成像光谱仪的推广应用。鉴于此,本文基于双光束干涉基本原理及同心结构基本特点,提出了适用于 Offner 凸面光栅同心系统的干涉装调法,利用此方法对 Offner 同心凸面光栅成像光谱仪的两个凹面反射镜进行同心装调,并采用图谱直读法确定光栅位置,从而提高了凸面光栅成像光谱仪的装调精度。

2 Offner 凸面光栅分光系统

Offner 凸面光栅分光结构由两个凹球面反射镜(主镜、三镜)和一个凸球面光栅组成,凸球面光栅位于两个凹面反射镜之间,所有反射球面的球心均位于同一点。Offner 凸面光栅分光系统结构如图1所示, C 为两反射球面和凸面光栅共同的球心。入缝处物面发出的光经主反射镜反射后被凸面光栅分光,后经三镜反射聚焦于像面。

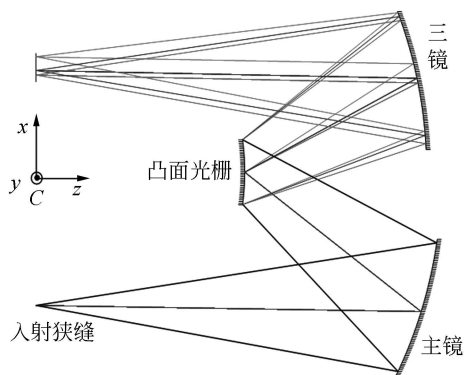


图1 Offner 凸面光栅分光系统结构图

Fig. 1 Schematic of Offner convex grating spectrometer

由于 Offner 凸面光栅分光系统的所有反射面均为球面,加工较易实现。近年来,随着镜面加工和光栅制造工艺的发展,Offner 凸面光栅分光系统以其独特的优势备受关注。

3 干涉装调法原理

3.1 双光束干涉的球面检测原理

设平面单色波在非吸收介质中传播时的波矢量分别为 k_1, k_2 ; 初始相位为 φ_1, φ_2 ; 根据双光束干涉原理^[13],两波的复振幅矢量为:

$$A_1 = a_1(\mathbf{r}) e^{-i(\varphi_1 - \mathbf{r} \cdot \mathbf{k}_1)}, \quad (1)$$

$$A_2 = a_2(\mathbf{r}) e^{-i(\varphi_2 - \mathbf{r} \cdot \mathbf{k}_2)}. \quad (2)$$

两波干涉后复合波的振幅为

$$A = a_1(r) e^{-i(k_1 \cdot r - \omega t)} + a_2(r) e^{-i(k_2 \cdot r - \omega t)} \quad (3)$$

复合波的强度为

$$I = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 \cos[\mathbf{r} \cdot (\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) - (\omega_1 - \omega_2)t] \quad (4)$$

当位相差 $\omega_1 - \omega_2 = 0$ 时, 两束平面单色波干涉后波腹形成的条件为

$$\mathbf{r} \cdot (\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) = 2m \quad (5)$$

干涉条纹为垂直于 $\mathbf{k} = \mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2$ 的平面族方程, 条纹间距 d 为

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin(\frac{\theta}{2})} \quad (6)$$

基于双光束干涉原理的激光干涉仪是利用干涉条纹进行高精度测量的光学仪器。干涉仪把一束光分裂为两束, 经参考光路和测试光路后, 在其交叉区域产生干涉图。以透射式菲索干涉仪为

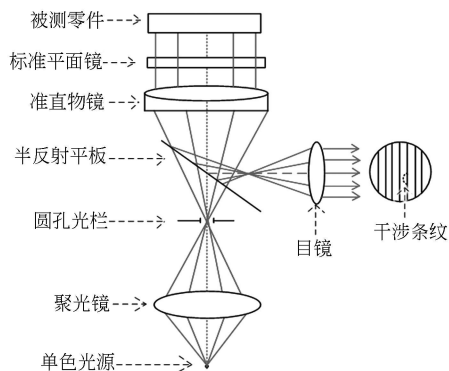


图2 菲索干涉仪光路图

Fig.2 Schematic of Fizeau interferometer

例, 其光路如图2所示。单色光源被聚光镜会聚在圆孔光阑, 光阑位于准直物镜的焦平面处。从物镜出射的平行光束, 在标准平面镜的上表面和被测零件的下表面反射回来, 再通过物镜和半反射平板在目镜的焦平面处形成小孔光阑的两个重合像。根据标准平面镜的上表面和被测零件的下表面反射回来的波形成的干涉条纹形状, 对被测零件的下表面面形进行检测。被测平面面形变化 S 与干涉条纹弯曲量满足式(7), 此时干涉条纹如中虚线所示。

$$\frac{\Delta s}{d} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (7)$$

菲索干涉仪采用补偿镜进行球面镜面形检测, 如图3所示, 设被检球面为半径为 R 、口径为

$2D$ 的理想球面。光源发出的平面波一部分由补

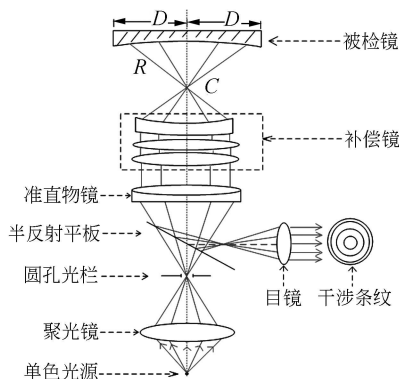


图3 利用菲索干涉仪球面检测离焦光路及其干涉条纹
Fig.3 Testing path and fringe of spherical surface with Fizeau interferometer

偿镜的参考球面直接返回作为参考波; 另一部分经补偿镜后变为与被检球面理论形状相同的球面波入射到被检球面, 经被检球面反射后沿原路返回补偿镜重新变为平面波, 并与参考波干涉, 得到干涉条纹。此时, 补偿镜的焦点应与被检球面的球心重合于一点 C 。补偿镜的相对口径 $F^\#$ 满足如下关系:

$$F^\# = R / 2D \quad (8)$$

被检球面的球心与补偿镜的焦点的偏离程度用离焦量 Δ 来表示, 此值可由菲索干涉仪直接测出, 且可以调整至无限小, 此时的干涉条纹为同心圆环, 如图3所示, 离焦量越小, 圆环个数越少^[14]。

3.2 Offner 同心结构干涉装调法

3.2.1 主镜、三镜同心的实现

Offner 同心结构 3 个光学球面的球心位于同一点, 主镜、三镜均为凹面反射镜, 可用同一补偿镜检测。根据双光束球面检测理论, 检测曲率半径为 R_1 的主镜时, 设补偿镜的焦点 C 与主镜球心重合于一点 C_1 , 检测曲率半径为 R_3 的三镜时, 设补偿镜的焦点 C 与三镜球心重合于一点 C_2 。若将主镜、三镜同时置于被检镜位置, 使同一检测光束同时入射到主镜、三镜上。当 C_1, C 重合时, 可以观察到主镜的检测干涉条纹; 当 C_2, C 重合时, 可以观察到三镜的检测干涉条纹; 同时调整 Offner 同心结构的主镜、三镜, 当干涉条纹(1)如图4所示的直线时, C_1, C_2, C 重合为一点, 此时主镜、三镜同心。但是, 在实际检测中, 不可能做到离焦量为零, 即 C_1, C_2, C 严格重合。此时, 可以

采用如下方法进一步调整: 根据装调精度要求将离焦量调整至最小, 并记录主镜离焦量 δ_1 和三镜离焦量 δ_2 , 然后由 $(\delta_1 - \delta_2)$ 计算出主镜与三镜的球心距离, 其中 λ 为干涉仪光源波长。此时, 干涉条纹 (2) 呈圆环状, 如图 4 所示, 于是固定主镜、三镜的位置。如果能够将主镜离焦量 δ_1 和三镜离焦量 δ_2 调整为 $\delta_1 = \delta_2$, 即 $(\delta_1 - \delta_2) = 0$, 此时主镜、三镜严格同心。

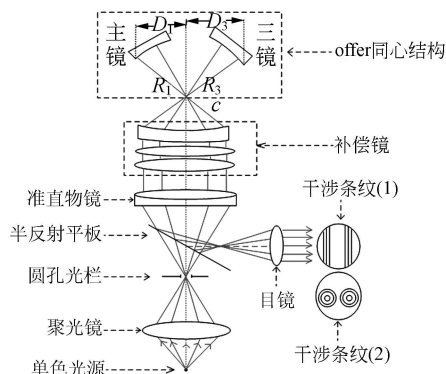


图 4 菲索干涉仪装调 Offner 同心结构原理图

Fig. 4 Principle schematic of interferometrical optics aligned with Fizeau interferometer

根据球面检测理论, 单球面镜检测时补偿镜满足式 (8)。在主镜、三镜同心装调时, 双镜检测需同时进行, 补偿镜的相对口径 $F_2^{\#}$ 应满足

$$F_2^{\#} = \min\left(\frac{R_1}{2D_1}, \frac{R_3}{2D_3}\right), \quad (9)$$

3.2.2 谱图直读法固定光栅

Offner 同心结构 3 个光学球面的球心位于同一点, 主镜、三镜位置由上述方法固定后不再更改, 通过调整凸面光栅, 使其球心与主镜、三镜球心重合即可。尽管凸面光栅的表面也是球面, 但是根据球面检测理论^[14]可知, 用同一套凹球面补偿镜检测凸球面并不可行。如果更换补偿镜, 不仅难度较大, 而且还会引入新的误差。为此, 本文采用较为简便的谱图直读法进行凸面光栅的同心装调。

谱图直读法是指通过像面接收到的标准光源光谱进行光栅的调整。Offner 同心结构光学放大倍率为 $1^{[15]}$, 即望远系统将目标物体成像在 Offner 同心结构宽度为 l 的狭缝上, 经凸面光栅色散后在像面形成的狭缝的单色光谱像宽度为 l 。将高倍读数显微镜焦面置于 Offner 同心结构的像面位置, 并调整光栅, 使读数显微镜读出的狭

缝单色像宽度为 l 。将探测器置于读数显微镜焦面位置, 探测器像元尺寸为 l_0 , 则每条光谱所占光谱方向像元数为 l/l_0 。再通过微调光栅, 使探测器接收到的各个波长狭缝像无倾斜, 且尺寸相等; 各个视场的单色光谱像在光谱方向所占像元数均为 l/l_0 , 且同一视场不同光谱像在探测器同一列像元。此时, 光栅与主镜、三镜同心, 固定光栅和探测器, Offner 同心成像光谱仪装调完成。像面探测器接收到的光谱如图 5 所示, 不同波长 λ_1 , λ_2 , λ_3 光谱像在光谱方向所占的像元数相等, 均为 3 个像元, 在不同视场 X 处的同一波长的光谱像位于探测面同一列像元上。

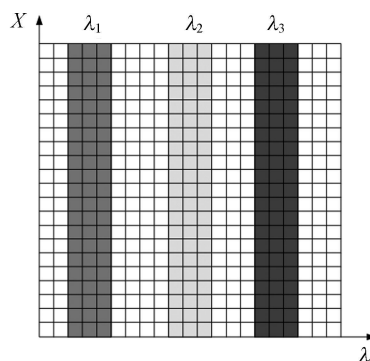


图 5 成像光谱仪像面光谱图

Fig. 5 Image spectrum from imaging spectrometers

3.2.3 装调公差分析及检测

与传统光谱仪装调方法相比, 干涉装调法装调 Offner 同心成像光谱仪的主镜、三镜的同心, 其同心精度通过干涉仪实时显示, 根据实际装调要求, 可以实现高精度装调, 装调后主镜、三镜的球心距离可达纳米级甚至更高。光栅的同心装调通过谱图直读法实现, 装调精度完全通过探测器接收到的狭缝像质量评估。采用小像元尺寸、高响应度的探测器提高装调精度, 探测器像元尺寸越小, 单色波长狭缝像所占像元数越多, 装调精度越高。

任何光学仪器, 在获取物方信息后, 都希望在像方获取一个与之相关的正确的像方信息。像方信息的正确与否, 是衡量光学仪器质量的重要指标^[16]。因此, Offner 同心成像光谱仪的装调精度可以通过探测器接收到的光谱像来衡量。光谱分辨率、谱线弯曲、色畸变是 Offner 同心成像光谱仪的主要技术指标, 根据这些技术指标对探测器接收到的标准光源光谱像进行检测, 将检测值与

设计值比较, 各项指标均不低于设计值, 则装调精度满足实际要求。因此, 需要对装调后的 Offner 同心成像光谱仪的光谱分辨率、谱线弯曲、色畸变进行检测。光谱分辨率是评定 Offner 同心成像光谱仪的综合指标, 通过探测器接收到的标准光源的成像光谱便可直观判别像质好坏。谱线弯曲、色畸变的测量则采用像元尺寸小、响应度高的探测器来实现。

4 干涉装调法的应用

利用干涉装调法对 Offner 凸面光栅成像光谱仪进行装调, Offner 凸面光栅成像光谱仪的结构及指标参数如表 1 所示。

表 1 Offner 凸面光栅成像光谱仪参数
Tab.1 Parameters of Offner imaging spectrometer with convex grating

光谱仪参数	性能指标
光谱范围/nm	400~ 800
主镜 R_1/D_2	2.1
三镜 R_3/D_3	2.3
狭缝宽度/ mm	25
光谱分辨率/ nm	2.4
谱线弯曲/(%)	0.1
色畸变/(%)	0.6
探测器像元尺寸/ m	7.4
像元数	1 024 1 024

根据现有条件, 选用光源为 632.8 nm 的 Zygo GPI XP/D 干涉仪。根据式(9), 标准补偿镜应满足 $F^\#$ 1.05, 具体参数如表 2 所示。

表 2 标准补偿镜参数
Tab.2 Parameters of compensating lens

口径/mm	f /mm	$F^\#$	R /mm
101.6	75	0.75	48.24

4.1 装调过程

(1) 调节干涉仪至标准状态。将成像光谱仪置于干涉仪被检镜位置, 调节成像光谱仪的位置, 使经过标准镜的光束会聚于成像光谱仪 3 个光学元件共同的中心, 会聚光经过中心后照射成像光谱仪主镜、三镜, 调整主镜位置使主镜与标准光束

形成的干涉条纹位于干涉区一侧小于 1/2 区域, 由于球面反射镜存在离焦和球差, 干涉条纹为同心圆环, 调整主镜至同心圆环个数最少, 此时离焦量为 0.092, 固定主镜; 同理调整三镜, 三镜的反射光与标准光束的干涉条纹是位于干涉区另一侧小于 1/2 区的干涉环, 调整三镜至干涉环个数最少, 此时离焦量 δ_2 为 0.107, 固定三镜。此时主镜、三镜球心距约为 9.5 mm, 装调实验光路以及干涉条纹如图 6 所示。

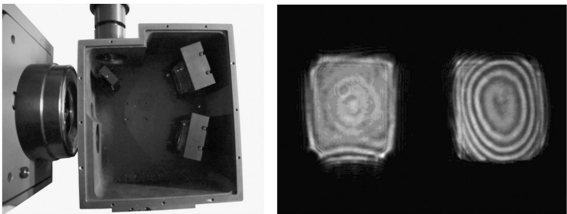


图 6 装调实验光路(左)及干涉条纹图(右)
Fig.6 Experiment schematic(left) and fringes (right)

(2) 确定光栅位置。狭缝宽度为 25 μ m, 探测器像元尺寸为 7.4 μ m, 探测器接收到目标物单色波长像占 4 列像元。将标准汞灯光源置于望远系统焦面处, 将 120 倍读数显微镜焦面置于 Offner 同心结构的像面位置, 调整光栅使读数显微镜读出的汞灯单色像宽度为 25 μ m。再将探测器置于读数显微镜焦面位置, 调整探测器位置使探测器接收到汞灯 400~ 800 nm 内的所有- 1 级衍射光谱像, 图 7 所示为探测到的光谱像。

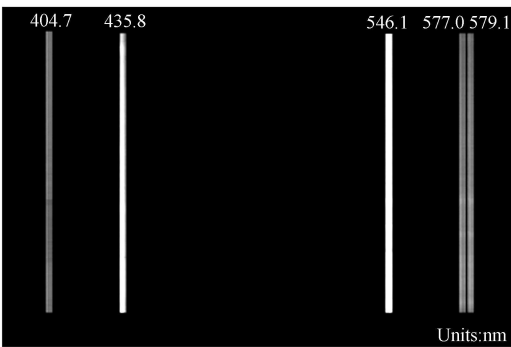


图 7 标准汞灯成像光谱图
Fig.7 Spectrum of standard mercury lamp

4.2 装调结果分析

装调完成后得到的汞灯- 1 级光谱图像如图

7所示。由图可见,标准汞灯光谱波长间距最小的577.0 nm和579.1 nm谱线清晰分离,实现光谱分辨率为2.1 nm,达到了光谱分辨率2.4 nm的要求。汞灯的每条光谱线亮度均匀、边界清晰,不同谱线的狭缝像高度相同,说明谱线弯曲和色畸变均很小,检测结果表明光谱谱线弯曲为0.09%,色畸变为0.6%,均满足设计要求。

5 结 论

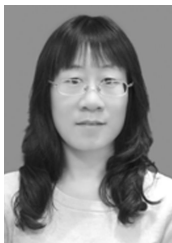
同心装调是凸面光栅同心成像光谱仪的关键技术之一。本文根据双光束干涉的基本理论,结

合同心光学系统的基本特点,提出了适用于Offner凸面光栅成像光谱仪的干涉装调法。该方法分为两步进行。(1)利用干涉仪对凸面光栅成像光谱仪的主镜、三镜进行同心装调,考虑到单个球面反射镜的离焦量难以调整至零,引入相对离焦后可使两个反射镜的离焦量相等从而实现两镜同心。经干涉法装调后,主镜和三镜的球心距离可以达到几个纳米。(2)由于无法用同一套凹球面补偿镜检测凸球面,采用谱图直读法来确定光栅位置。应用结果表明,该方法精度高,实用性强,可以便捷、有效地解决凸面光栅成像光谱仪装调的难题。

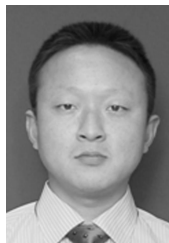
参考文献:

- [1] OFFNER A. New concepts in projection mask aligners [J]. *Opt. Eng.*, 1975, 14: 130-132.
- [2] REININGER F, VIRTIS C. Visible infrared thermal imaging spectrometer for the Rosetta mission [J]. *SPIE*, 1996, 2819: 66-77.
- [3] LOBB D R. Imaging spectrometers using concentric optics [J]. *SPIE*, 1997, 3118: 339-347.
- [4] BROWN T J, CORBETT F J, SPERA T J, *et al.*. Thermal infrared pushbroom imagery acquisition and processing [J]. *SPIE*, 1981, 304: 37-56.
- [5] DINER D J, BRUEGGE C J, MARTONCHIK J V, *et al.*. MISR: a multiangle imaging spectroradiometer for geophysical and climatological research [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1989, 27: 200-214.
- [6] SAINTPE O, DONNADIEU O, DAVANCENS R, *et al.*. Development of a 2-D array for 1 to 2.35 mm hyperspectral imager [J]. *SPIE*, 1997, 2816: 138-149.
- [7] 郑玉权,王慧,王一凡.星载高光谱成像仪光学系统的选择与设计[J].*光学精密工程*, 2009, 17(11): 2629-2637.
ZHENG Y Q, WANG H, WANG Y F. Selection and design of systems for spaceborne hyperspectral imager [J]. *Opt. precision Eng.*, 2009, 17(11): 2629-2637. (in Chinese)
- [8] DAVIS C O, KAPPUS M E, BOWLES J H, *et al.*. Calibration, characterization, and first results with the Ocean PHILIS hyperspectral imager [J]. *SPIE*, 1999, 3753: 160-168.
- [9] FOLKMAN M A, PEARI M J, LIAO I B, *et al.*. EO-1/Hyperion hyperspectral imager design, development, characterization and calibration [J]. *SPIE*, 2001, 4151: 40-51.
- [10] WILSON T H, DAVIS C O. Hyperspectral remote sensing technology (HRST) program and the Naval Earth Map Observer (NEM) satellite [J]. *SPIE*, 1998, 3437: 2-11.
- [11] FIETCHER P A. Image acquisition planning for the CHRIS sensor onboard PROBA [J]. *SPIE*, 2004, 5546: 141-150.
- [12] 吴国安.光谱仪器设计[M].北京:科学出版社, 1978.
WU G A. *Design of Spectrometer* [M]. Beijing: Science Press, 1978. (in Chinese)
- [13] WYANT J C. *Optical Testing and Testing Instrumentation* [M]. Arizona: University of Arizona Press, 1999.
- [14] WYANT J C. *Basic Wavefront Aberration Theory for Optical Metrology* [M]. Arizona: University of Arizona Press, 1992.
- [15] FISHER J, WELCH W C. Survey and analysis of fore optics for hyperspectral imaging systems [J]. *SPIE*, 2006, 6206: 6206R.
- [16] 邱松发,毛精华.光谱仪器装配与调整[M].北京:机械工业出版社.
QIU S F, MAO J H. *Assemblage and Adjustment of Spectrometer* [M]. Beijing: China Machine Press. (in Chinese)

作者简介:



刘玉娟(1984-),女,山东泰安人,博士研究生,主要从事成像光谱仪器设计、装调及光谱数据处理技术的研究。E-mail: xuliuyujuan@163.com



崔继承(1976-),男,吉林长春人,博士研究生,副研究员,主要从事光学设计理论及光谱仪器设计的研究。E-mail: jicheng_cui@yahoo.com.cn



巴音贺希格(1962-),男,内蒙古鄂尔多斯人,理学博士,研究员,博士生导师,主要从事光栅理论、光栅制作技术及光谱技术的研究。E-mail: bayin888@sina.com



唐玉国(1967-),男,吉林人,博士,研究员,博士生导师,主要从事光谱仪器及医用光谱技术的研究。E-mail: tangyg@yiliaoyiqi.com

下期预告

980 nm 高功率垂直腔面发射 激光列阵的单元结构优化

张 星^{1,2}, 宁永强^{1*}, 曾玉刚¹, 秦 莉¹, 刘 云¹, 王立军¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 激发态物理重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

为了提高 980 nm 垂直腔面发射激光器(VCSEL)列阵的整体性能,对 VCSEL 列阵单元器件的分布布拉格反射镜(DBR)反射率进行了优化设计。分析了 VCSEL 列阵单元器件 DBR 反射率与阈值电流、输出功率及转换效率之间的关系,在维持较低阈值电流的前提下适当调节了 N-DBR 的反射率,使单元器件斜率效率得到了有效提高,进而改善了 VCSEL 列阵的整体输出特性。优化 DBR 反射率后研制出的包含 64 个单元的 VCSEL 列阵器件在注入电流为 6 A 时连续输出功率为 2.73 W;在脉宽 100 ns,重复频率 100 Hz 的 130 A 脉冲电流驱动下输出功率达到 115 W;包含 300 个单元的列阵器件在注入电流为 18 A 时连续输出功率达到 5.26 W。对 N-DBR 反射率进行优化后,VCSEL 列阵的整体输出特性得到了有效改善。