

引用格式: JI Hangxin, BA Guoxin, LI Jun, et al. Optical Design of a High-efficiency Medium-low Dispersion Spectrograph with Wide-band Based on FOSC Type (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(5):0552206
季杭馨, 巴国鑫, 李军, 等. 基于 FOSC 型的宽波段高效率中低色散光谱仪设计(特邀)[J]. 光子学报, 2023, 52(5):0552206

基于 FOSC 型的宽波段高效率中低色散光谱仪设计(特邀)

季杭馨^{1,2}, 巴国鑫^{1,2,3}, 李军^{1,2}, 余浩然^{1,2}

(1 中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 南京 210042)

(2 中国科学院天文光学技术重点实验室, 南京 210042)

(3 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为实现各类暂现源及暗弱目标的宽波段、高效率光谱后随观测,以 1.9 m 光学望远镜为例,设计了一种基于 Faint Object Spectrograph and Camera 型的双通道中低色散光谱仪,可实现三种光谱分辨率($R=500, 2\ 000$ 和 $5\ 500$),工作波段覆盖紫外-近红外($310\sim 1\ 000$ nm)。根据光栅方程和光谱分辨率等各项指标,确定光谱仪的初始结构参数,针对光谱仪在全波段的高效率需求以及仪器随动的包络限制,确定光学系统采用双通道设计并近似对称分布:准直系统采用了不同于传统 Faint Object Spectrograph and Camera 型光谱仪的折反射式系统,在提高了系统效率的同时压缩了空间。色散系统根据直视棱栅的不同工艺,通过棱镜材料和角度的调整对工作波段的光栅效率进行优化并得到 8 种棱栅参数;红蓝通道相机系统在设计过程中优化选取光学材料,同时结合二次非球面和单透镜的主动调焦补偿,实现大动态温度范围($-30\ ^\circ\text{C}\sim 20\ ^\circ\text{C}$)全视场($\varphi 16^\circ$)最大弥散斑半径均方根小于 $5\ \mu\text{m}$ 的优良像质。该系统结构紧凑、分布对称,设计结果满足各项指标,光谱仪全波段峰值效率优于 60%,最低效率优于 20%,具有较高的可实现性。基于曲面芯片工艺,以红通道为例,简化的相机系统至少可提高整体光谱效率约 4%,可以为未来光谱仪相机系统的设计提供参考。

关键词:棱栅;天文光谱仪;中低色散;体位相全息光栅;曲面探测器;紫外

中图分类号: P111.42

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20235205.0552206

0 引言

随着双中子星并合事件的发现,现代天文研究已经进入全波段、多信使、天地一体化发展的新时代^[1-4]。光学天文发展最早,望远镜及其天文仪器对高精尖技术创新的需求也最高,任何可以提高探测深度、广度、精度以及降低体量、成本等方面的关键技术和发展工艺^[5],都是值得重点关注的。未来五年,多个地面/空间光学巡天望远镜,国际如 Large Synoptic Survey Telescope (LSST)^[6]、Roman Space Telescope^[7] 和 Euclid,国内如 China Space Station Telescope (CSST)^[8]、Multi-channel photometric survey telescope (Mephisto)^[9]、Wide Field Survey Telescope (WFST) 等,即将出光,届时海量的深度巡天数据将使得光学天文进入一个空前发展的新时代。天文学家希望建造各类先进的天文仪器以满足宇宙各层次天体的探索和研究,比如:高分辨、超稳定的光谱仪获得科学目标的精细观测,如 High Accuracy Radial velocity Planet Searcher (HARPS)^[10]、Echelle Spectrograph for Rocky Exoplanets and Stable Spectroscopic Observations (ESPRESSO)^[11] 等;大视场、多目标光谱仪提高天体目标的光谱获取率,如 Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI)^[12]、Prime Focus Spectrograph (PFS)^[13]、Multi-Object Optical and Near-infrared Spectrograph (MOONS)^[14] 等;宽波段、

基金项目:国家自然科学基金(No. 12173061)

第一作者:季杭馨, hxji@niaot.ac.cn

收稿日期:2022-12-27;录用日期:2023-02-20

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

高效率光谱仪实现更暗天体的快速观测,如 X-Shooter^[15]、Imaging Spectrograph (IMSP)^[16]等;集成式、智能化满足不同科学目标的自动观测等。引力波电磁对应体、沉寂黑洞耀发、伽玛暴等各类暂现源作为时域天文研究的热点,一般需要后随光谱仪对暂现源进行多维度的证认和特性分析。由于暂现源爆发的不确定性,需要望远镜及其光谱仪尽量兼顾以下几点:1)具有较大的视场、快速响应的能力,满足不同标下的精准获取;2)具有宽波长覆盖、高仪器效率,满足暗弱天体目标的全波段普查;3)具有多种观测模式(成像、偏振和不同的光谱分辨率等),满足不同维度的特性研究。

中低色散成像光谱仪具有多用途、高效率和小体量的特点,可满足各类暂现源在光学波段多个方面的观测需求,如:The Gran Telescope CANARIAS (GTC)望远镜的成像和低分辨率集成光谱仪(Optical System for Imaging and low-Intermediate-Resolution Integrated Spectroscopy, OSIRIS)^[17],Keck I望远镜的低分辨成像光谱仪(Low Resolution Imaging Spectrometer, LRIS)^[18],Very Large Telescope (VLT)望远镜的缩焦相机和光谱仪(Focal Reducer and low dispersion Spectrograph, FORS-2)^[19],Subaru望远镜的暗天体照相光谱仪(Faint Object Camera and Spectrograph, FOCAS)^[20],欧洲南方天文台(European Southern Observatory, ESO) 3.6米望远镜的暗天体分光照相机(ESO Faint Object Spectrograph and Camera, EFOSC)及其衍生而来的十几台 Faint Object Spectrograph and Camera(FOSC)型光谱仪^[21-22]。这些仪器的工作波长以可见光(365~900 nm)为主,虽然部分仪器的工作波长标称可以小于 350 nm 或大于 950 nm,但是仪器设计在玻璃材料、关键器件(光栅、探测器)等方面均未进行整体优化^[18,20];另一方面,部分 FOSC 型仪器采用体位相全息棱栅(Volume Phase Holographic Grisms, VPHG)替换原有的直视棱栅进行了升级改造用于仪器效率的提升^[23],但是单通道设计下的直视棱栅为了减少二级光谱的影响需要配合级次滤光片使用,镀膜效率也因工作带宽较大而提升有限。

国内外多个台址为光学天文望远镜在紫外和近红外波段的观测提供了非常优良的条件,而且随着高效率光栅、宽波段镀膜工艺以及新型探测器的技术发展,各类光谱仪对全波段覆盖、高效率观测都提出了更迫切的需求。基于此,本文以 1.9 米光学望远镜为研究对象,设计了一种基于 FOSC 型的双通道、高效率中低色散光谱仪,仪器体量较小,不同分辨率模式单次曝光均可实现 310~1 000 nm 的全波段覆盖。

1 光谱仪主要技术指标

1.9 米光学望远镜是一架具有高分辨和高测光精度的赤道式望远镜,采用经典的 Ritchey-Cassegrain 光学系统设计,设置卡焦、折轴卡焦和库德三个观测焦点,其中折轴卡焦的系统焦比为 $F/8$,双通道中低色散光谱仪根据总体布局需求将安装在望远镜的中间块。由于望远镜在卡焦端设置了 3 通道同步测光,因此双通道中低色散光谱仪并不需要兼顾成像功能,其主要技术指标要求见表 1。

表 1 双通道中低色散光谱仪的主要技术指标要求

Table 1 The main requirements of the double channel medium-low dispersion spectrograph

Technical index	Index requirements
Working band	Blue channel: 310~560 nm Red channel: 540~1 000 nm
Spectral resolution	$R=500, 2\ 000, 5\ 500@0.8''\text{slit}$
Operating temperature	$-30\ ^\circ\text{C}\sim 20\ ^\circ\text{C}$
Peak efficiency (without slit loss)	$\geq 40\%$
Minimum efficiency	$\geq 15\%$ (goal)
Image quality	RMS radius $\leq 10\ \mu\text{m}$

2 光谱仪性能参数分析

双通道中低色散光谱仪需实现不同的光谱分辨率和整个波段的高效率,因此采用类似于 FOSC 型的双通道设计方案,其优势在于:1)不同模式的切换简单高效,不需要旋转相机系统;2)相比于单通道 FOSC 型光谱仪,双通道方案每个通道的工作波段变窄,更有利于镀膜效率的提升以及光栅、相机和 CCD 等关键器件效率的优化;3)单通道的光栅需考虑其它级次的影响配合滤光片使用,双通道则不需要。

双通道设计方案的原理如图1所示,每个通道保证准直系统、相机系统和像面共轴无偏转。通过移动或者旋转方式进行不同光学器件的切换,可实现多种工作模式^[21]的快速转换,如:直接成像、长缝光谱、无缝光谱、阶梯光谱、成像偏振、分光偏振、星冕仪和多目标光谱。多工作模式,既节约时间,又可以根据天文学家的需要、天气和视宁度变化情况优化观测策略,目前的双通道中低色散光谱仪的设计需求是实现不同的光谱分辨率,因此具备长缝光谱、无缝光谱和阶梯光谱三种基本模式,未来可根据需要进行拓展,比如:小视场的直接成像、有限的多目标光谱,增加偏振器件或星冕板可开展偏振和星冕仪等观测模式。

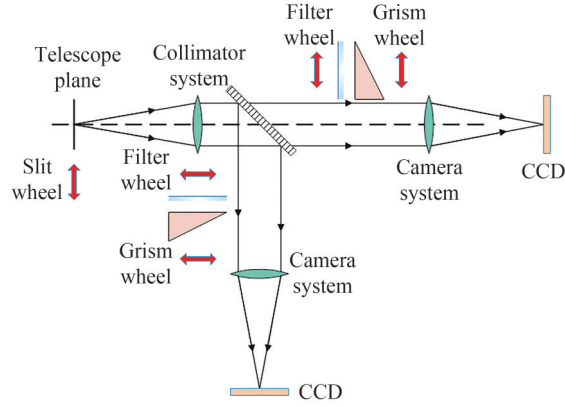


图1 双通道FOSC型光谱仪工作原理图

Fig. 1 The working principle of the double channel spectrograph based on FOSC type

2.1 直视棱栅的工作原理

双通道中低色散光谱仪中最关键的器件是直视棱栅,它可以实现特定波长的入射光和衍射光不发生偏折。根据不同的光栅工艺,直视棱栅可以选择在棱镜上进行光栅刻划或者复制(GRISM),如图2(a)所示,或者选择棱镜与体位相全息光栅组合的形式(VPHG),如图2(b)所示。

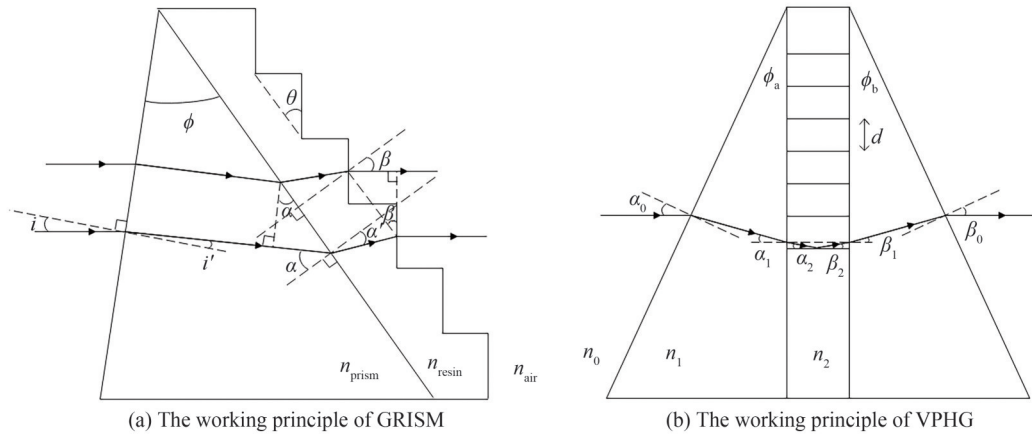


图2 两种直视棱栅的工作原理图

Fig. 2 The working principle of two straight-through GRISMS

2.1.1 GRISM的工作原理

如果选择GRISM作为色散元件,有GRISM棱栅方程^[24]

$$m\lambda = d(n_{\text{prism}}\sin\alpha + n_{\text{air}}\sin\beta) \quad (1)$$

式中, λ 为波长, m 为光栅级次, d 为光栅常数, α 为光栅入射角, β 为光栅衍射角, n_{prism} 为波长 λ 下的棱镜折射率, n_{air} 为波长 λ 下的空气折射率($n_{\text{air}} \approx 1$)。

对棱栅方程式(1)进行微分,可得棱栅的角色散

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{m}{d\cos\beta} = \frac{n_{\text{prism}}\sin\alpha + \sin\beta}{\lambda\cos\beta} \quad (2)$$

通常情况下,光栅在 Littrow 条件下具有峰值效率,此时 $\alpha = -\beta = \theta$,其中 θ 为光栅闪耀角,此时的波长定义为光栅的闪耀波长 λ_b ,角色散可简化为

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{(n_{\text{prism}} - 1)}{\lambda_b} \tan\theta \quad (3)$$

根据经验和现有的棱栅工艺,假设 θ 最大接近 63° , n_{prism} 玻璃材料的平均折射率假设为 1.5,因此 $\frac{d\beta}{d\lambda} \approx \lambda_b^{-1}$ 。

根据角色散可推导出光谱分辨率 $R = \lambda/d\lambda$ 与系统各个初始结构参数的关系为

$$R\psi = \lambda_b \frac{d\beta}{d\lambda} \frac{\cos\beta}{\cos\alpha} \frac{f_{\text{col}}}{f_{\text{tel}}} \quad (4)$$

式中, ψ 为狭缝对天张角, f_{tel} 为望远镜焦距, f_{col} 为光谱仪准直系统焦距。在 Littrow 条件下,基于棱栅的光谱仪极限分辨率近似为

$$R_{\text{lim}}\psi \approx \frac{f_{\text{col}}}{f_{\text{tel}}} \quad (5)$$

为了减少成本,GRISM 一般利用现有光栅模板进行复制。复制材料的不同,对应的棱栅的闪耀波长 λ_b 和无偏折波长 λ_s 就会有很大区别。一般偏离闪耀波长越大,效率下降越快,因此在满足色散能力的基础上,为了保证整个工作波段的效率,尽量挑选工作波段两端相对闪耀波长对称分布的光栅模板。同时对 GRISM 材料和顶角进行优化,可实现整个工作波段在探测器靶面的效率分布进行优化。当 $n_{\text{prism}} = n_{\text{resin}}$ 时,为简化计算,假设入射角 $i = 0$, $\theta = \phi$, GRISM 在闪耀波长发生光线无偏折,此时的光栅效率也最高;当 $n_{\text{prism}} \neq n_{\text{resin}}$ 时,除了挑选合适的光栅模板保证工作波段的效率,还可根据工作波段,选择合适的玻璃材料,通过数值计算等方式,优化调整棱镜顶角 ϕ , 实现无偏折波长 λ_s 等于 λ_b 或根据相机设计难度和探测器的波长分布进行权衡取舍。

GRISM 应用在双通道中低色散光谱仪的优势:1) 满足不同光谱分辨率的应用需求,尤其是阶梯棱栅一次曝光可通过多级次实现很宽的波长覆盖;2) FOSC 型光谱仪应用最成熟的色散器件,复制用感光材料在紫外也有较好的透过率。主要缺点:1) 受限货架母版光栅的种类,不能与每台光谱仪特定分辨率的需求完美匹配,而且很难兼顾特定工作波段的整体衍射效率;2) 重新加工光栅模板,成本较高,周期较长;3) 阶梯棱栅角度较大,对玻璃材料本身的性能要求较高,而且无偏折波长与材料折射率直接相关,通常不能兼顾不同级次,适合阶梯棱栅的玻璃材料较少。

2.1.2 VPHG 的工作原理

如果选择 VPHG 作为色散元件,有光栅方程^[26]

$$m\lambda = n_i d (\sin\alpha_i + \sin\beta_i) \quad (6)$$

式中, λ 是波长, m 是光栅工作级次, d 是光栅常数, n_i , α_i 和 β_i 分别表示不同介质层的折射率、入射角和出射角 ($i = 0, 1, 2$, 分别为空气, 棱镜材料和感光介质)。基于光栅方程,同样可推导得到基于 VPHG 的光谱分辨率与系统各个参数的关系

$$R\psi = \frac{n_1}{n_0} \frac{\cos(\alpha_1 - \phi_a)}{\cos\alpha_0} \left(\tan\alpha_1 + \frac{\sin\beta_1}{\cos\alpha_1} \right) \frac{f_{\text{col}}}{f_{\text{tel}}} \quad (7)$$

式中, ϕ_a 和 ϕ_b 为 VPHG 两个棱镜的顶角, f_{col} 为光谱仪准直系统焦距, f_{tel} 为望远镜焦距, ψ 为狭缝对天张角。

在 Littrow 条件下,有 $\phi_a = \phi_b = \phi$, $\alpha_i = \beta_i$, 式(7)可简化为

$$R\psi = \frac{f_{\text{col}}}{f_{\text{tel}}} \frac{n_1}{n_0} \frac{\cos(\alpha_1 - \phi_a)}{\cos\alpha_0} 2\tan\alpha_1 \quad (8)$$

根据 VPHG 工作原理图,当 $\alpha_0 + \phi = 0$ 时,可实现光线无偏折。

VPHG 应用在双通道中低色散光谱仪的优势:1) 相比于 GRISM, 衍射效率高,通过参数调整可保证光栅闪耀波长与光线无偏折波长相等,整个工作波段的效率也可对称分布,避免某一端的效率过低;2) 不受现有模板限制,整个工作波段可调制实现对称分布,有效利用探测器靶面,降低相机系统的设计难度。但是,

VPHG也有其自身的缺陷:1)光谱分辨率 $R \geq 5\,000$,工作带宽窄,对于一次曝光需全波长覆盖的应用不太适合;3)光谱分辨率 $R \leq 500$,光栅线密度较低,工作级次的效率转移到其它级次,效率与GRISM相当,优势不大;4)VPHG感光材料在紫外波段吸收相对较小,但是光栅与基底的胶合材料在波长小于350 nm的吸收相对较大,随着工艺的发展,使用其它胶合材料和特殊的固定方式,可以提高VPHG在紫外波段的性能。

2.2 光谱仪初始结构参数的确定

根据式(5),已知望远镜的焦距 $f_{\text{tel}}=15.2\text{ m}$,狭缝对天张角 $\psi=0.8''$, $R_{\text{im}} \geq 5\,500$,因此 $f_{\text{col}} \geq 325\text{ mm}$,为了保证仪器具备更高分辨率的可拓展性和设计允差,最终确定光谱仪的准直系统焦距 $f_{\text{col}}=400\text{ mm}$,准直口径大小为50 mm。

光谱仪相机系统的焦距与探测器的尺寸、采样大小和每个通道的工作带宽相关^[27]

$$s = R\psi D_{\text{tel}} F_{\text{cam}} \frac{\Delta\lambda}{\lambda_c} \quad (9)$$

式中, s 为光谱在像面的分布长度, D_{tel} 为望远镜口径, F_{cam} 相机系统焦比, $\Delta\lambda$ 为工作带宽, λ_c 为光栅中心波长。

综合考虑后,光谱仪初始结构的参数见表2,两个通道棱栅的参数见表3,其中 $R=2\,000$ 模式下,GRISM和VPHG中,优先选择VPHG。

表2 光谱仪的初始结构参数

Table 2 The initial configuration parameters of the spectrograph

Spectrograph parameter	Values
Collimator focal length	400 mm
Pupil diameter	50 mm
Camera focal length	215 mm
Camera focal ratio & field of view	$F/4.3$ & $\varphi \geq 16^\circ$
CCD	4 K@15 μm
Channel working band	Blue channel: 310~560 nm Red channel: 540~1 000 nm

表3 红蓝通道棱栅的主要参数

Table 3 The main parameters of grisms for the blue & red-channel

Resolution mode	Line density/($\text{l}\cdot\text{mm}^{-1}$)	Groove angle	Prism angle & materials	Order
B-GRISM 500	200	8.95°	10.6° & fused silica	1
B-GRISM 2 000	600	28.7°	33.1° & fused silica	1
B-VPHG 2 000	775	20°	20° & fused silica	1
B-GRISM $>5\,000$	97.11	56°	56° & LF5HTI	9~17
R-GRISM 500	150	10.8°	10.8° & LF5HTI	1
R-GRISM 2 000	300	26.7°	23.5° & LF5HTI	1
R-VPHG 2 000	450	21°	21° & LF5HTI	1
R-GRISM $>5\,000$	91.7	58.9°	58.9° & LF5HTI	5~10

3 多功能天文光谱仪设计及性能评价

3.1 光谱仪光学设计

光谱仪安装在望远镜的折轴卡焦,观测过程中随望远镜运动,因此仪器设计应尽量简化并减少整体包络,同时优化提高仪器效率。根据光谱仪初始结构参数,准直系统焦距400 mm,若采用传统FOSC型的透射式设计,整个仪器的长度过长将导致结构产生变形,仪器性能下降,因此考虑选择反射式或折反射式设计为准直系统的初始结构;准直系统后,利用分色镜分成红蓝两个通道,同时利用折转平面镜进一步优化布局减小仪器包络。光谱仪需在不同的光谱分辨率间快速切换,尤其是高分辨率模式需要主色散和横向色散组合工作,因此至少需要2个切换轮,第1个切换轮装配中低色散GRISM并兼顾横向色散的功能,第2个切换轮配置高色散GRISM或VPHG;另外,2个滤光轮也可装配不同的滤光片、偏振器件等实现多种观测模式。

双通道中低色散光谱仪的相机系统是最为关键的子系统,不仅需要考虑各个光谱分辨率模式不同的视场需求,而且需要兼顾像质和高效率的设计要求。考虑到相机系统的焦比不快,红蓝通道没有采用类似LAMSOT中低分辨率光谱仪的施密特相机设计^[25],采用传统透射式设计并保证空间布局的近似对称;同时为了提高仪器效率,相机系统在满足设计像质的前提下,适当选择非球面,减少透镜数量,并对玻璃材料进行优化;另外,整个光谱仪需在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内正常工作,为了实现全年的环境适应性,相机系统考虑采用主动调焦补偿或者无热化相机设计方案。

基于上述思路,双通道中低色散光谱仪的光学系统如图3所示,每个通道最后一个镜子作为探测器的封窗;Grisms和Filters两个滤光轮可装配不同的直视棱栅;蓝通道相机系统由于可选择的玻璃材料非常少,设计难度非常大,透镜数量比红通道多,像质也略差一些。

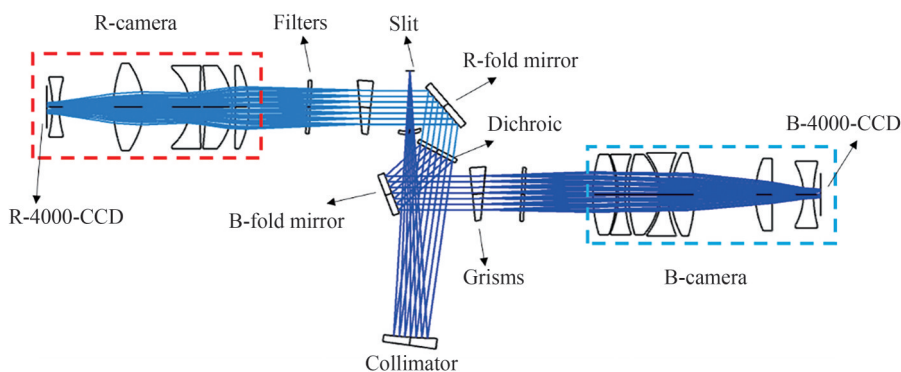


图3 双通道多功能天文光谱仪的光路

Fig. 3 The optical layout of the double channel multi-mode spectrograph

双通道中低色散光谱仪两个通道都需要大面阵的CCD,靶面大小 $4\ 000\times 4\ 000$,像元 $15\ \mu\text{m}$,同时由于工作波段覆盖紫外-近红外,不同厂家基于不同工艺的CCD芯片量子效率差异较大。目前,天文应用4 000 CCD芯片以Teledyne公司的e2v CCD231-84和Semiconductor Technology Associates公司的STA4850产品为主,为了尽可能的提高两个通道的效率,效率最大的组合:蓝通道选择STA4850芯片,红通道选择e2v基于HiRho的芯片;工程实施可行性最高的组合:蓝通道选择e2v最新技术NBB芯片,红通道选择e2v的深耗尽(Deep Depletion)芯片,但是相应的在紫外和近红外两端的效率有所下降。

3.2 像质评价和光谱分辨率

天文光谱仪的像质可通过弥散斑大小进行初步评价,也可以通过能量集中度或点扩散函数进行描述。

图4和图5给出了红蓝通道在室温 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下部分级次的弥散斑大小,图中,每个矩形框大小为2个像素

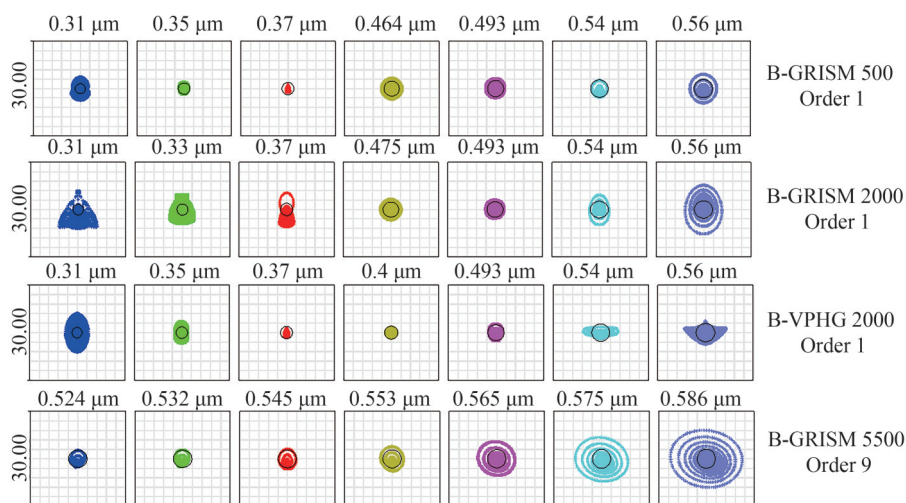


图4 蓝通道4个光谱工作模式不同波长的弥散斑大小

Fig. 4 The spot diameter of different wavelength at 4 spectral modes in the blue channel

(30 μm),可以看出蓝通道最大弥散斑半径均方根小于 5 μm ,红通道最大弥散斑半径均方根小于 3.5 μm ,远优于设计要求,给加工和装调精度提供了较大的冗余公差。考虑到光谱仪在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的应用需求,每个通道选择倒数第二个透镜作为大动态温度范围的主动调焦补偿器件,补偿后的像质与室温下差异较小,蓝通道不同分辨率模式调焦最大灵敏度小于 27 $\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$,红通道不同分辨率模式调焦最大灵敏度小于 9 $\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$,蓝通道由于 CaF_2 的热膨胀系数较大,后期考虑采用无热化镜筒设计进行自动补偿。

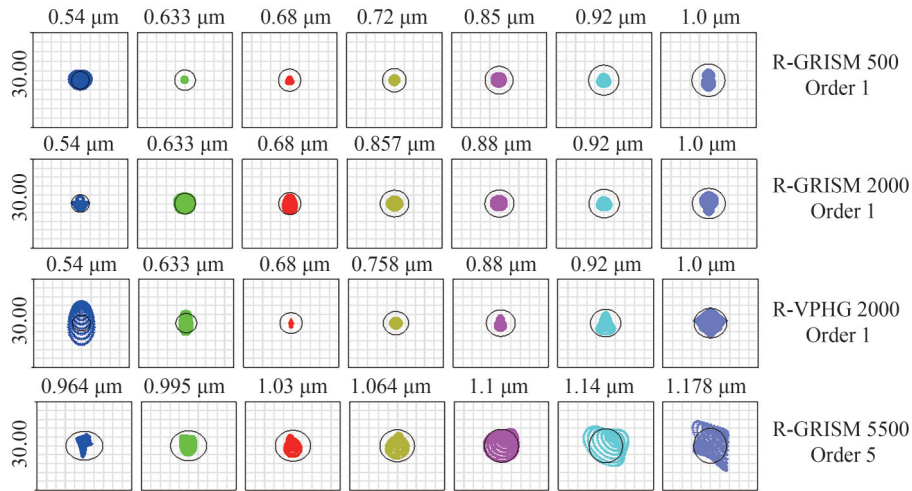


图5 红通道4个光谱工作模式不同波长的弥散斑大小

Fig. 5 The spot diameter of different wavelength at 4 spectral modes in the red channel

基于表3的8种光栅,计算得到不同波长下的光谱分辨率以及光谱在 CCD 色散方向的分布情况,如图6所示,红蓝通道的光谱分辨率满足设计要求,均可实现 $R=500, 2\ 000$ 和 $5\ 500$ 三种模式;GRISM 和 VPHG 经过棱镜角度的优化,光谱在 CCD 靶面上的位置基本呈对称分布。

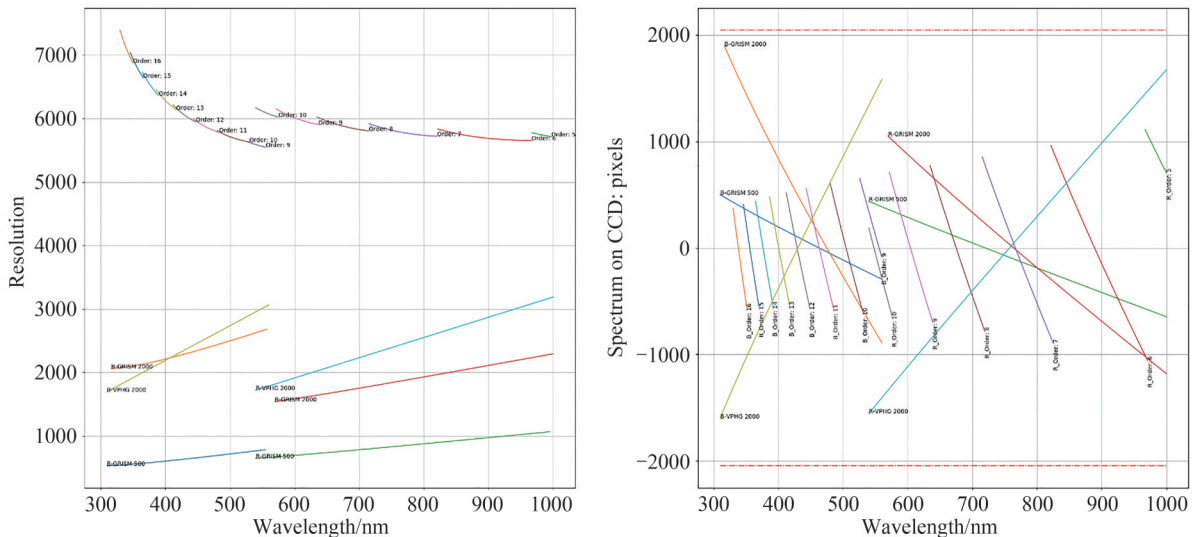


图6 不同直视棱栅,光谱分辨率与波长的关系(左),光谱在 CCD 上的位置(色散方向)与波长的关系(右)

Fig. 6 Different straight-through grisms, the relationship between spectral resolution and wavelength (left), the relationship between the spectrum position on the CCD in dispersion direction and wavelength (right)

3.3 理论光谱效率评估

3.3.1 基于现有技术的光谱效率

光谱效率的评估按照要求从光谱仪狭缝之后到探测器之前进行计算,主要包括光谱仪准直系统、相机系统的材料吸收和镀膜效率,色散系统的光栅衍射效率,不含狭缝损失和 CCD 芯片的量子效率。材料吸收

数据以现有玻璃库的理论数据进行计算;镀膜数据以实测数据进行评估^[1],310~1 000 nm的宽波段透射膜可实现平均效率99.2%,310~1 000 nm的紫外增强银膜,平均效率大于98.3%,实际以每个通道的工作波段进行优化都有一定的提升空间,而且反射膜效率曲线不平整可进一步优化改善;各个棱栅的理论效率由Newport和Wasatch公司提供,部分GRISM数据厂家未提供330 nm以下衍射效率数据;探测器分别以STA 4850和e2v HiRho的芯片量子效率进行计算。基于上述假设,图7给出了光谱仪两个通道的理论光谱效率(不含狭缝损失),最终效率取决于每个器件的实测结果,一般在理论效率的基础上有所下降。

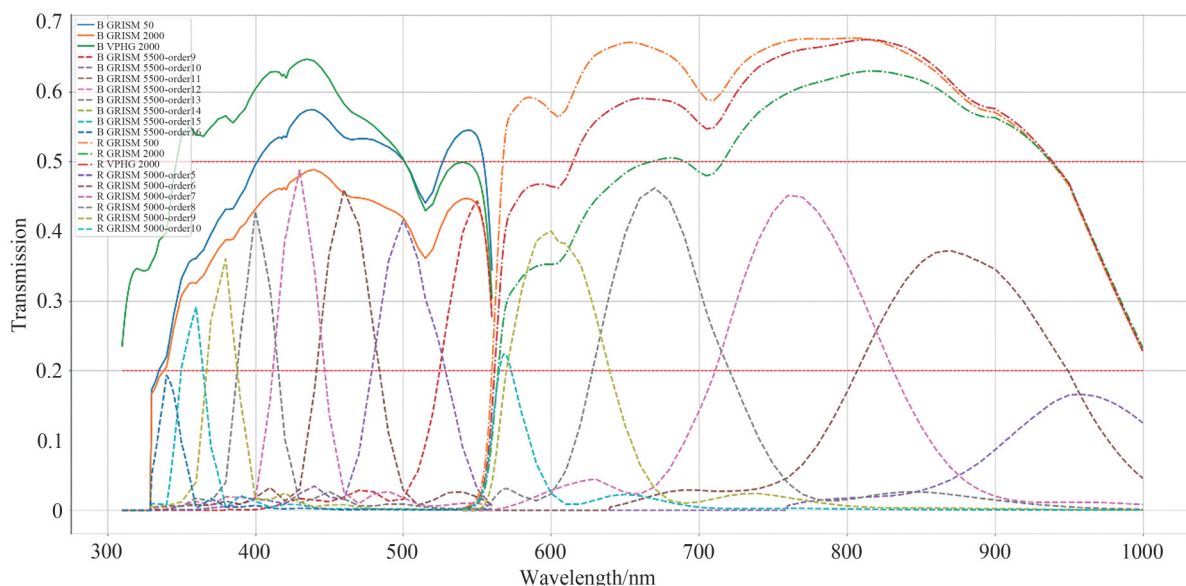


图7 不同直视棱栅(GRISM或VPHG)的光谱仪效率曲线

Fig. 7 The spectrograph efficiency curve with different straight-through gratings (GRISM or VPHG)

3.3.2 其它技术的发展现状

天文光谱仪为了追求极限观测能力,通常对光谱效率有着很高的要求,任何能提高仪器效率的关键技术或工艺都是光谱仪设计过程中需要重点考虑的因素。一方面是基于现有方案的提升手段,如:宽波段高效率反射膜和透射膜,高效率光栅,低吸收玻璃材料,高量子效率的探测器等;另一方面是基于新的工艺或关键技术的突破,颠覆传统光谱仪的设计形式,从而减少光学零件数量,提高光谱效率,如:不断成熟的非球面或自由曲面加工、检测能力,曲面探测器,集成光学等基于光子晶体的新型技术等。

以双通道中低色散光谱仪为例,目前通过改变设计形式提高光谱效率的技术手段:1)采用高次非球面或自由曲面,有望减少相机系统的透镜数量1块,但是会增加加工难度和成本;2)采用胶合或者折射率匹配液等形式减少部分玻璃-空气交界面的数量。在动态工作温度范围较大的情况下,光学胶合适用于口径相对较小,胶合玻璃材料热膨胀系数相近的设计,而折射率匹配液的约束相对较少,是大口径相机系统解决胶合应力等问题的最佳选择,但会增加结构设计的复杂度;3)用反射式相机设计代替透射式,但对于空间包络的需求更大,装调难度也更高。

相对于上述相对成熟的三种关键技术或工艺,更值得关注的是曲面探测器,它对于相机系统场曲和像散的矫正有一定帮助,可以简化相机系统的设计从而有效控制研制成本、体量并提高系统效率^[28-29],这将极大的改变现有光谱仪相机系统的设计思路,尤其是突破现有快焦比折射式相机的经验极限。虽然曲面探测器的天文应用还不够成熟,但是部分生产商已经开始或完成对曲面芯片的试制和样机系统测试,如:Teledyne e2v通过改造现有的CCD30-11芯片实现曲率半径70 mm的凹柱面探测器,同时一直致力于60 mm或90 mm更大靶面曲面探测器的研究^[30];ESO和亚利桑那大学成像技术实验室(Imaging Technology Laboratory, ITL)第一次在4 000大靶面芯片上实现曲率半径500 mm的凹球面^[31];麻省理工学院林肯实验室在2 000×4 000的芯片上实现曲率半径为5 440 mm的凸球面探测器,并最终完成6×2的焦面拼接成为Space Surveillance Telescope (SST)望远镜的焦面接收器^[31]。

如果双通道中低色散光谱仪采用曲面探测器,以红通道为例,它的相机系统可以大大简化,如图8所示,对应的像质如图9所示,其中每个矩形框大小为2个像素($30\ \mu\text{m}$),虽然像质相比图5有一定的下降,但是仍可满足设计要求,而且减少了2个透镜5个玻璃-空间交界面,不考虑玻璃材料吸收方面带来的效率增益,在现有镀膜工艺条件下已经可以提高整体效率约4%。

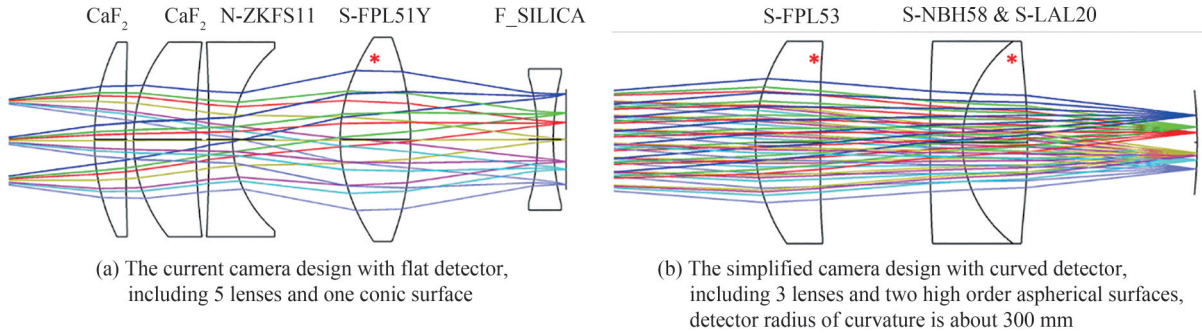


图8 多功能天文光谱仪红通道的相机系统设计对比

Fig. 8 The camera design comparison for the red channel of multi-mode astronomical spectrometer

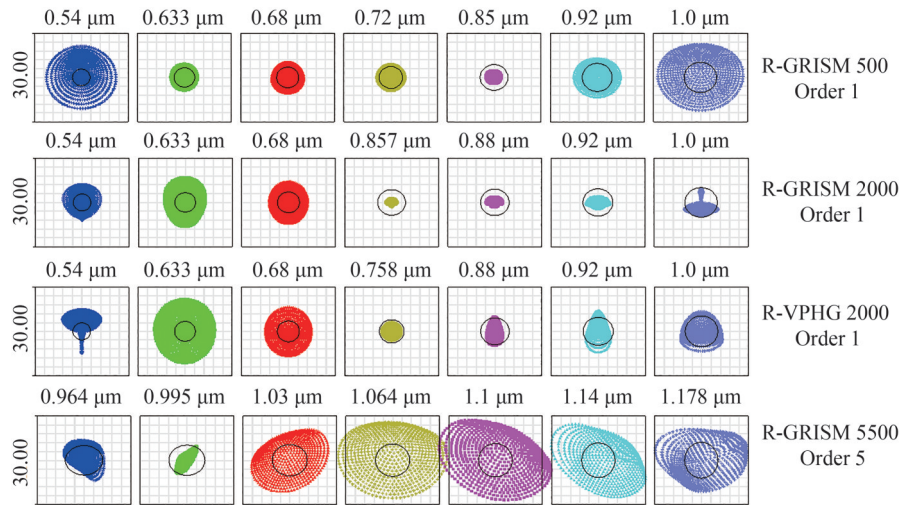


图9 红通道采用曲面探测器后,4个光谱工作模式不同波长的弥散斑大小

Fig. 9 The spot diameter of different wavelength at 4 spectral modes in the red channel with curved detector

4 结论

针对大视场巡天项目需要对各类暂现源开展全波段、暗弱信号的光谱后随观测,设计了一种基于FOSC型的双通道、高效率中低色散光谱仪。该光谱仪单次曝光可实现紫外-近红外($310\sim 1\ 000\ \text{nm}$)的全波段覆盖,并可实现多种光谱分辨率模式($R=500, 2\ 000, 5\ 500$)的快速切换。基于现有的工艺技术,设计完成的光学系统在大动态温度范围内,最大弥散斑半径均方根小于 $5\ \mu\text{m}$,整个工作波段不含探测器的理论光谱峰值效率最高可超过60%,最低效率基本上均可大于20%,优于传统的FOSC型设计,满足实际的工程应用需求。考虑未来的天文新技术发展,若采用新型曲面探测器,双通道中低色散光谱仪的相机系统将大大简化,以红通道为例,整体效率将至少提高4%以上。

参考文献

- [1] MARGUTTI R, COWPERTHWAIT P, DOCTOR Z, et al. Target of opportunity observations of gravitational wave events with LSST[J]. The Astrophysical Journal, 2019, 874: 88.
- [2] VALENTI S, SAND D, YANG Sheng, et al. The discovery of the electromagnetic counterpart of GW170817: Kilonova AT 2017gfo/DLT17ck[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2017, 848: L24.
- [3] NICHOLL M, BERER E, KASEN D, et al. The electromagnetic counterpart of the binary neutron star merger LIGO/

- Virgo GW170817. III. optical and UV spectra of a blue kilonova from fast polar ejecta [J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2017, 848: L18.
- [4] PIAN E, D'AVANZO, BENETTI S, et al. Spectroscopic identification of r-process nucleosynthesis in a double neutron-star merger [J]. *Nature*, 2017, 551: 67-70.
- [5] JI Hangxin, HU Zhongwen, ZHU Yongtian, et al. Wide field multi-object spectrograph for 30m class optical/near infrared telescope [J]. *Acta Astronomical Sinica*, 2019, 60(4): 69-88.
季杭馨, 胡中文, 朱永田, 等. 30m级光学/红外望远镜的宽视场多目标光谱仪 [J]. *天文学报*, 2019, 60(4): 69-88.
- [6] STALDER B, REIL K, AGUILAR C, et al. Rubin observatory commissioning camera: summit integration [C]. *SPIE*, 2022, 12184: 121840J.
- [7] POBEREZHSKIY I, HEYDORFF K, LUCHIK T, et al. Roman coronagraph instrument: engineering overview and status [C]. *SPIE*, 2022, 12180: 121801X.
- [8] ZHAN Hu. The wide-field multiband imaging and slitless spectroscopy survey to be carried out by the survey space telescope of china manned space program [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, 66(11): 1290-1298.
詹虎. 载人航天工程巡天空间望远镜大视场多色成像与无缝光谱巡天 [J]. *科学通报*, 2021, 66(11): 1290-1298.
- [9] YUAN Xiangyan, LI Zhengyang, LIU Xiaowei, et al. Development of the multi-channel photometric survey telescope [C]. *SPIE*, 2020, 11445: 114457M.
- [10] LOVIS C, PEPE F, BOUCHY F, et al. The exoplanet hunter HARPS: unequalled accuracy and perspectives toward 1 cm s⁻¹ precision [C]. *SPIE*, 2006, 6269: 62690P.
- [11] PEPE F, CRISTIANI S, REBOLO R, et al. ESPRESSO at VLT-on-sky performance and first results [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2021, 645: A96.
- [12] HONSCHIED K, FANNING K, BAILEY S, et al. The DESI instrument [C]. *SPIE*, 2022, 12184: 121840X.
- [13] TAMURA N, MORITANI Y, YABE K, et al. Prime Focus Spectrograph (PFS) for the Subaru telescope: its start of the last development phase [C]. *SPIE*, 2022, 12184: 1218410.
- [14] GONZALEZ O, CIRASUOLO M, TAYLOR W, et al. MOONS-multi object spectroscopy for the VLT: overview and instrument integration update [C]. *SPIE*, 2022, 12184: 1218412.
- [15] VERNET J, DEKKER H, D'ODORICO S, et al. Performances of X-shooter, the new wide band intermediate resolution spectrograph at the VLT [C]. *SPIE*, 2010, 7735: 77351.
- [16] JI Hangxin, CHEN Yi, WANG Lei, et al. The current status of the Imaging and Spectrograph (IMSP) for 4m telescope [C]. *SPIE*, 2020, 11447: 114475O.
- [17] CEDILLO J J, BONGIOVANNI A M, EDEROCLITE A, et al. The Multi-Object Spectroscopy (MOS) observations automatized production line [C]. *SPIE*, 2018, 10705: 107050X.
- [18] OKE J B, COHEN J G, CARR M, et al. The Keck low-resolution imaging spectrometer [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 1995, 107(710): 375-385.
- [19] BOFFIN H M, SEDAGHATI E, BLANCHARD G, et al. Regaining the FORS: making optical ground-based transmission spectroscopy of exoplanets with VLT+FORSS2 possible again [C]. *SPIE*, 2016, 9908: 99082B.
- [20] KASHIKAWA N, INATA M, IYE M, et al. FOCAS: faint object camera and spectrograph for the Subaru Telescope [C]. *SPIE*, 2000, 4008: 104-113.
- [21] CEN Xuefen, QIAN Tongling. Faint object spectrograph and camera for 1m telescope [J]. *Publications of Yunnan Observatory*, 2003, 4: 34-42.
岑学奋, 钱铜铃. 云南天文台 1m 望远镜暗天体分光仪和照相机 [J]. *云南天文台台刊*, 2003, 4: 34-42.
- [22] WANG Chuanjun, BAI Jinming, FAN Yufeng, et al. Lijiang 2.4-meter Telescope and its instruments [J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2019, 19(10): 149.
- [23] BIANCO A, FRANGIAMORE M, ZANUTTA A, et al. VPHGs for astronomy: what we learnt in OPTICON EU and manufacturing perspectives [C]. *SPIE*, 2022, 12188: 1218823.
- [24] TRAUB W A. Constant-dispersion grism spectrometer for channeled spectra [J]. *Optical Society of America*, 1990, 7(9): 1779-1791.
- [25] HOU Yonghui, TANG Linlin, XU Mingming, et al. The LAMOST middle resolution spectrograph [C]. *SPIE*, 2018, 10702: 107021I.
- [26] BALDRY I K, BLAND-HAWTHORN J, ROBERTSON J G. Volume phase holographic gratings: polarization properties and diffraction efficiency [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2004, 116(819): 403-414.
- [27] JI Hangxin, ZHU Yongtian, HU Zhongwen. Optical system design of high throughput multi-channel spectrograph for very large telescope [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(3): 0330003.
季杭馨, 朱永田, 胡中文. 极大望远镜高效率多通道光谱仪的光学系统设计 [J]. *光学学报*, 2019, 39(3): 0330003.
- [28] PASQUINI L, DELABRE B, ELLIS R, et al. New telescope design suitable for massively-multiplexed spectroscopy [C]. *SPIE*, 2012, 9906: 99063C.

- [29] DUMAS D, FENDLER M, BAIER N, et al. Curved focal plane detector array for wide field cameras [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(22): 5419-5424.
- [30] JORDEN P, BOURKE D, CASSIDY R, et al. Teledyne e2v sensors optimized for ground-based and space applications [C]. *SPIE*, 2018, 10709: 1070903.
- [31] LWERT O. Curved detectors (3D)-status[C]. *Scientific Detector Workshop*, 2017.

Optical Design of a High-efficiency Medium-low Dispersion Spectrograph with Wide-band Based on FOSC Type (Invited)

JI Hangxin^{1,2}, BA Guoxin^{1,2,3}, LI Jun^{1,2}, YU Haoran^{1,2}

(1 *National Astronomical Observatories/Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China*)

(2 *CAS Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Nanjing 210042, China*)

(3 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Modern astronomy has entered a new era of all-band, multi-messenger, and space-ground synergistic observation. Optical/Infrared telescopes and their instruments have an increasing demand for high-tech innovation. Any advanced technology and process that can improve the sensitivity, extent and accuracy of detection as well as reduce the volume and cost should be concerned by the instrument design. Several ground/space-based optical surveys telescopes, such as Large Synoptic Survey Telescope, Roman Space Telescope, Euclid, and China Space Station Telescope will commission in the following five years. The upcoming massive deep sky survey data will make optical astronomy enter an unprecedented development epoch. The astronomical community hopes to build various advanced astronomical instruments to explore and investigate any objects among the different scales of the universe. The hottest research in time-domain astronomy is the identification and characteristic analysis of various transient sources, such as Gravitational-Wave Electromagnetic Counterparts, silent Black-Hole flares, and Gamma-Bursts, so it needs the spectrograph have the capability of fast response, wide-band and high efficiency with one exposure. What's more, if the instrument has multi-mode, like, multi-color imaging, spectrograph with different resolution mode, polarimetry, it will be very popular to the community. The mid-low dispersion imaging spectrometer always has the characteristics of multi-modes, high efficiency and small volume, which is suitable for the optical band following-up observation of various transient targets. This kind of instrumentation is a workhorse spectrograph for all size of telescopes around the world, such as, Low Resolution Imaging Spectrometer at Keck I telescope, Focal Reducer and Spectrograph-2 at VLT, Faint Object Camera and Spectrograph (FOCAS) at Subaru Telescope, ESO Faint Object Spectrograph and Camera at 3.6 meters telescope. However, the working band of these spectrographs is mainly visible (365~900 nm). What's more, the "FOSC" type of spectrometers was designed as a single channel, each grism needs to work with an order filter to block the spectral overlapping from other orders, and it will reduce the total efficiency. This paper takes the 1.9m optical telescope as an example, and designs a dual-channel medium-low dispersion spectrograph based on an updated "FOSC" type, which can achieve three spectral resolution modes ($R=500, 2\ 000$ and $5\ 500$) and the working band cover from ultraviolet to near infrared (310~1 000 nm) with high efficiency. According to the grating equation, spectral resolution and other key specification, the initial parameters of the spectrograph can be derived. An approximate symmetry dual-channel design is adopted in order to make the spectrograph having a high efficiency across the whole working band and also having a compact volume. The collimator system uses a catadioptric design rather than a refractive system to improve the efficiency and then splits the spectrograph into two channels. According to the process of GRISM and VPHG, the straight-through grism efficiency is optimized by adjusting the prism material and apex angle, then 4 grism parameters are obtained for each channel. During the camera optimization, materials absorption is carefully considered, and what's more, an aspherical surface is used to reduce the total lens number and an active focusing compensation lens were chosen to meet the requirement of working at a large dynamic temperature range

($-30\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$). The final performance of the spectrograph is quite good, the Blue and Red channels both have excellent image quality with the maximum RMS spot radius of less than $5\text{ }\mu\text{m}$ within the full field of view in resolution mode, the peak efficiency of the spectrograph is better than 60% and the minimum efficiency at both ends of the working band is better than 20%. This paper also has a short discussion about different technologies which could be used in our design to improve the total spectral efficiency, especially the cutting-edge process of curved chips which is expected to overturn the traditional camera system design in the near future. Therefore, taking red camera as an example, the simplified camera system with a curved chip can improve the overall spectral efficiency by at least 4%, which looks very promising.

Key words: Grism; Astronomical spectrograph; Medium-Low dispersion; Volume phase holographic grating; Curved detector; Ultraviolet

OCIS Codes: 120.6200; 120.4570; 050.1950; 220.3620