

引用格式: LIN Dong, ZHU Zhuangzhuang, FENG Jijun, et al. Multi-objects Spectroscopy with Compact Arranged Optical Waveguides[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(5):0552212

林栋,朱壮壮,冯吉军,等. 密排光波导多目标光谱探测技术研究[J]. 光子学报, 2023, 52(5):0552212

密排光波导多目标光谱探测技术研究

林栋^{1,2,3}, 朱壮壮^{1,2,3}, 冯吉军⁴, 何晋平^{1,2,3,5}

(1 中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所 太阳与空间仪器研究室, 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)

(4 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

(5 中国科学院大学南京学院, 南京 211135)

摘要: 利用密排波导光子芯片作为多目标输入机构, 将多目标光谱仪同步探测能力提高至少 4 倍, 且芯片光学效率大于 90%。另外, 由于各输入信道均被集成在芯片内, 所有目标光谱在探测器上几无相对空间移动, 有利于获取高光谱稳定性。本文研究有望为极多目标观测, 尤其是空间大规模光谱巡天或积分视场天文观测提供有竞争力的多目标输入机构解决方案。

关键词: 多目标光谱; 密排波导; 多目标输入; 天文光子学; 光谱巡天

中图分类号: P141.5

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20235205.0552212

0 引言

多目标光谱探测能够同时获得大量天体的光谱信息, 已成为天文观测最重要的科学手段之一。近些年来, 随着郭守敬望远镜(The Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope, LAMOST)^[1]、Sloan Digital Sky Survey 望远镜(SDSS)^[2]、Large Synoptic Survey Telescope(LSST)^[3]、The Dark Energy Spectroscopic Instrument(DESI)^[4]等巡天计划的顺利开展, 为天文学研究带来数千万条天体光谱数据, 如, 截止 2023 年 2 月 2 日, 仅 LAMOST 就对外发布了 1 946 万条光谱数据(其中低分辨率数据 1 121 万条, 中分辨率非时域数据 184 万条, 中分辨率时域数据 641 万条)及 873 万条恒星参数^[5]。利用上述海量光谱数据, 天文学家在银河系结构演化^[6-7]、系外行星探测及研究^[8-9]、宇宙大尺度结构及演化^[10-11]等方面做出众多重要产出, 切实推动了天文学研究的发展。

然而, 宇宙天体数量巨大, 仅星系就可能超过 1 000 亿, 而星系中的各类天体数量更是极为庞大, 如, 银河系就有 1 000 亿到 4 000 亿颗恒星。显然, 与海量宇宙天体数量相比, 目前已获得的千万量级的天体光谱数据依然只是沧海一粟, 还有极大的提升空间。为应对上述挑战, 天文领域近年建设了至少 14 架大尺度光谱巡天专用望远镜^[12], 而 Keck^[13-14]、Subaru^[15]、LBT(Large Binocular Telescope)等 8~10 m 级望远镜上也配备了多目标光谱仪。除了建造更多光谱望远镜外, 增加同时观测目标数目也是提高多目标光谱探测效率的手段之一。我国于 2009 年自主建设研制成功的 LAMOST 能同时探测 4 000 个目标的光谱, 经 10 余年巡天获得了海量天体的光谱数据, 被称为“光谱之王”^[16]; 而在 2021 年, DESI 将这一参数刷新到 5 000 个天体目标, 成为目前全世界同时探测光谱数目最多的望远镜^[17]; 近些年, 中国天文学界在积极推进 LAMOST 二期工程及另一个新的 6.5 m 级光谱巡天望远镜 MUST(Multiplexed Survey Telescope)的立项工作, 预计它们同时探测光谱数目将被提高到 10 000 以上, 使我国在大规模光谱巡天技术及对应的天文科学研究中均持续保

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 11933005, 11773045, 11973009)

第一作者: 林栋, dlin@niaot.ac.cn

通讯作者: 何晋平, jphe@niaot.ac.cn

收稿日期: 2023-03-06; 录用日期: 2023-04-28

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

持世界领先。当然,同时探测如此多的目标光谱,在技术上也具有极大挑战。

目前,天文多目标光谱探测一般基于光纤光谱仪^[18-20],大量光纤在望远镜焦面处采集多目标信号,之后在光谱仪输入端狭缝处形成一维密排,最终实现多目标在同一光谱仪上的光谱探测。这种光纤多目标光谱仪相较于最初的狭缝多目标光谱仪,具有高的探测器利用效率及视向速度测量精度,同时观测的目标数量也高了一个数量级以上^[21]。然而,光纤多目标光谱仪在进一步提升光纤密排性方面依然存在一定挑战^[22]。密排结构在现有水平下可以将相邻光纤间距缩小至127 μm 左右(光纤直径125 μm),在密排性上已做到极致。然而,由于光纤传光时光能量主要局域于芯层,每根光纤独立拥有的厚的包层限制了纤芯间距的进一步缩小,进而可能影响价格极其昂贵的天文探测器的像素利用效率。尤其对于空间或地面视宁度好(大气扰动对望远镜成像质量影响较小的地区)的台址(如南极 Dome A 地区),小的光纤纤芯即可实现信号的高效率耦合,使得探测器利用效率问题更为严重。

本文提出并实验验证了以密集排布波导替代光纤阵列作为多目标光谱仪输入机构的方案,有效减小了大的光纤包层对光纤空间排布紧密性的影响,提高了探测器利用效率;同时,由于波导阵列中各波导均被刻蚀在同一块芯片内,波导间几无空间移动,使得探测器上各通道间的光谱几无相对漂移,提高了波长精度或视向速度探测精度。该方案有望在未来天文多目标/积分视场光谱观测中得到应用,尤其是空间或视宁度较好台址下的光谱巡天应用。

1 密排波导多目标输入原理

光纤是最常用的光谱仪输入形式,其通过V型槽进行密排可以实现包覆层的近乎完全贴合,其原理如图1。

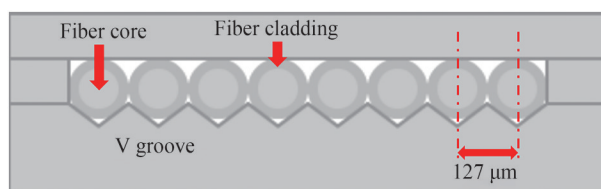


图1 多目标光纤光谱仪中常用光纤密排结构示意图
Fig. 1 Typical fiber bundle arrangement in a multi-object fiber spectrograph

波导是光子芯片的基础结构,能实现光的局域及传导,与光纤可起到类似作用。本文涉及的密排波导多目标输入原理参考图2所示,多根光纤将多个目标的光信号传导至光芯片端面,并通过芯片封装技术将信号光高效率的耦合进芯片对应的波导波导中,再利用S型波导有效减小各目标通道(此时对应各波导)间的空间间距,最终在输出端形成极小间距的密排波导阵列输出。这种输出的光束间隔可以比较容易做到小于30 μm 甚至是数个微米,光束占空比高,有助于提高后续多目标光谱探测时探测器的利用效率。

本文从原理上讨论光纤密排(图1所示)和波导密排(图2所示)时的多目标光谱探测差异。在色散方向与光束排布方向完全垂直的前提下,以光纤阵列作为输入的多目标光谱在探测器靶面上的占空比取决于光纤芯径与光纤间隔的比值,而以波导阵列作为输入的多目标光谱技术能够获得的占空比取决于波导宽度与波导间隔的比值。因此,波导光束重排多目标光谱技术相较光纤多目标光谱技术在相同视场角下观测数量的对比如式(1)。

$$R = \frac{W_{\text{core}}}{D_{\text{core}}} \times \frac{D_{\text{fiber}}}{D_{\text{waveguide}}} \quad (1)$$

式中, W_{core} , D_{core} 分别代表波导的宽度和纤芯的芯径, D_{fiber} , $D_{\text{waveguide}}$ 分别代表光纤间隔和波导间隔。光纤间隔

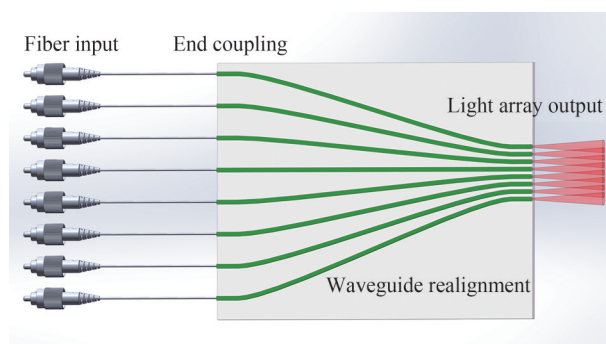


图2 波导重排布芯片功能示意图
Fig. 2 Functional diagram of waveguide realignment chip

由于光纤包层的存在,其取值一般不低于 $125\ \mu\text{m}$,波导间隔只受限于相邻通道间的串扰,其取值远小于 $100\ \mu\text{m}$,以较为常见的石英波导为例,其间隔可以做到低于 $20\ \mu\text{m}$ 。如果纤芯和波导宽度相近,则波导密排较光纤密排方案在探测器利用效率上可提高若干倍(按上述参数可提高6倍以上)。图3给出了光纤间隔为 $125\ \mu\text{m}$ (a)以及波导间隔为 $40\ \mu\text{m}$ (b)条件下两种密排方案的效果图,可以清晰的看到波导密排结构较光纤密排结构在探测器利用效率有明显提升。

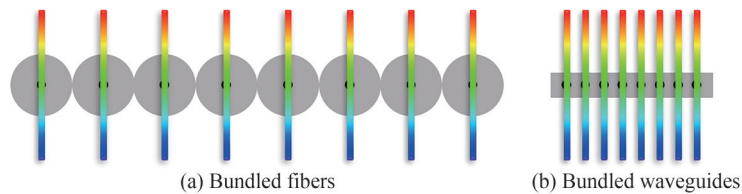


图3 两种密排结构下多目标光谱探测时探测器利用效率对比

Fig. 3 The comparison of detector utilization efficiency for multi-object spectroscopy under two different bundle arrangements

2 设计与仿真

2.1 芯片设计

为验证波导密排的可行性,并且基于二氧化硅波导工艺的成熟度较高以及便于封装的考虑,我们设计了和图2一致构型的波导阵列光子芯片。其中输入端光纤阵列的间距为 $127\ \mu\text{m}$,输出端波导阵列间距为 $30\ \mu\text{m}$,此外为了避免弯曲损耗以及光芯片尺寸过小带来的机械夹持问题,最小的S型波导曲率半径设计为 $2.2\ \text{mm}$,使得整体的器件尺寸能接近 $10\ \text{mm} \times 1.5\ \text{mm}$ 。

2.2 实验仿真

在实际实验验证前,我们进行了基于光纤密排及波导密排的多目标光谱探测的仿真,以比较这两种多目标光信号输入方案在探测器利用效率上的差异。仿真光路采用了如图6所示的经典光栅光谱仪结构,以光栅作为色散器件,其色散方向与光波导阵列的排布方向垂直以获取规整的多目标光谱。在参数设置上,准直抛物面镜和成像透镜的焦距分别为 $100\ \text{mm}$ 和 $150\ \text{mm}$,工作波长以 $1\ \text{nm}$ 的间隔从 $1\ 550\ \text{nm}$ 递增至 $1\ 558\ \text{nm}$ 。仿真中,以光纤输入及波导输入下相邻通道间的间隔分别设为 $127\ \mu\text{m}$ 和 $30\ \mu\text{m}$,数值仿真结果如图4所示。

由图4(a)与4(b)可知,在探测相同数量的目标光谱的情况下,波导密排的方式所占用的探测器靶面更

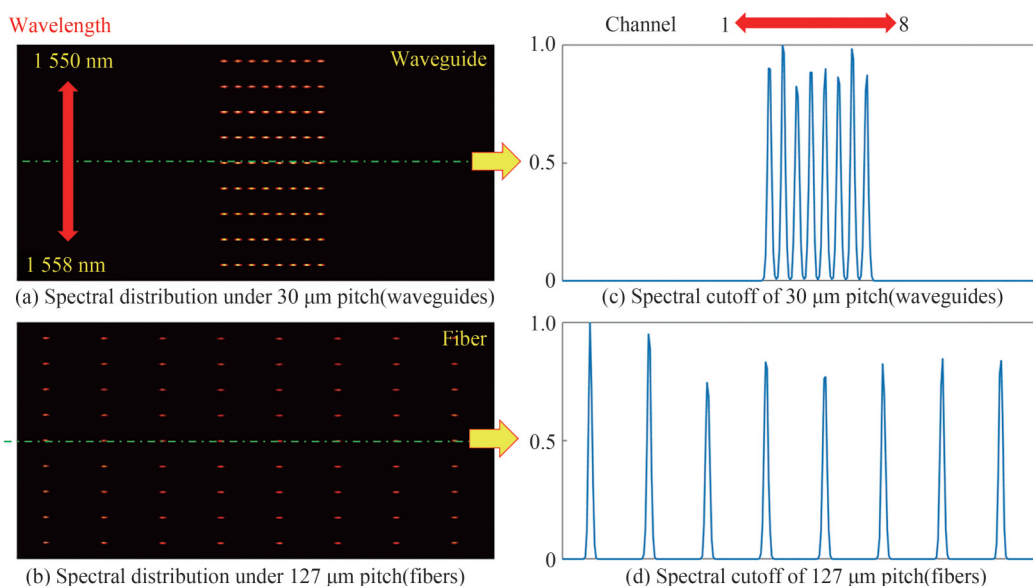


图4 波导密排与光纤密排下探测器预期观测结果

Fig. 4 expected observation results of detectors under bundled waveguides and fibers

小,并且同时保证了目标光谱间的互不干扰。在色散方向上,无论是波导密排还是光纤密排都不影响一维光谱的展开,而在垂直于色散方向上的探测器利用尺寸取决于通道的间隔。图4(c)和4(d)分别展示了1554 nm输入下波导密排与光纤密排条件下,8通道分别获取的单波长光强以及空间分布,横坐标代表探测器上像素所在的空间位置,纵坐标为归一化光强。从截线方向上来看,波导密排与光纤密排所成的像,其半高全宽所占据的像素是一致的,但图4(c)中实际利用空间仅是图4(d)的0.25倍,因此可以得出结论波导密排多目标光谱相较于光纤排布获得的光谱,占空比获得了4倍的提升。图4(c)和4(d)存在的光强分布不相等的原因在于仿真里设置的光学器件参数均参考索雷博官网,因此并不是完全理想的光学系统,不同离轴量的光源排布存在像差,从而造成截线方向上光强的起伏。

值得注意的是,仿真中使用的光源是点光源,但是受限于光学系统的分辨率,光源在探测器上所成的像半高宽为 $8\ \mu\text{m}$,这表示多目标光谱在探测器上的占空比不仅与光源的尺寸、间距有关,还与光学系统本身的空间分辨率密切相关。在实际的天文观测中,光学系统往往能够优化到衍射极限,其空间分辨能力可以做到优于芯径的尺寸,因此光学系统带来的分辨率降低和观测效率下降基本上可以忽略不计。

3 实验验证

为验证方案的可行性,实际加工了八通道波导阵列芯片,并搭建了光谱测量装置进行了器件测试。

3.1 芯片加工

本文所用波导采用成熟的 SiO_2 平面光波导工艺,先在4英寸晶片上生长一层掺镉氧化硅芯层,然后通过镀铬膜完成芯层的保护,紧接着通过光刻与显影工艺将图案呈现在铬膜上,再通过反应离子刻蚀实现铬膜的去除,紧接着再刻蚀一层氧化硅实现二氧化硅芯片的制备,最后通过火焰水解沉积 $20\ \mu\text{m}$ 厚的 SiO_2 包层,加工流程如图5(a)。芯片尺寸为 $7\ \text{mm}\times 1.5\ \text{mm}$,其芯层折射率为1.463,包层折射率为1.4567,单模波导尺寸为 $6.5\ \mu\text{m}$,数值孔径为0.135。光纤的尾端以 $127\ \mu\text{m}$ 的间隔排布在右侧而左端的波导阵列仅有 $30\ \mu\text{m}$ 的间隔,通过对每个通道进行单独测试,光纤端5 mW的单频光信号输入可至少获取波导输出端4.53 mW的输出,因此整个器件的光效率高达90%以上。

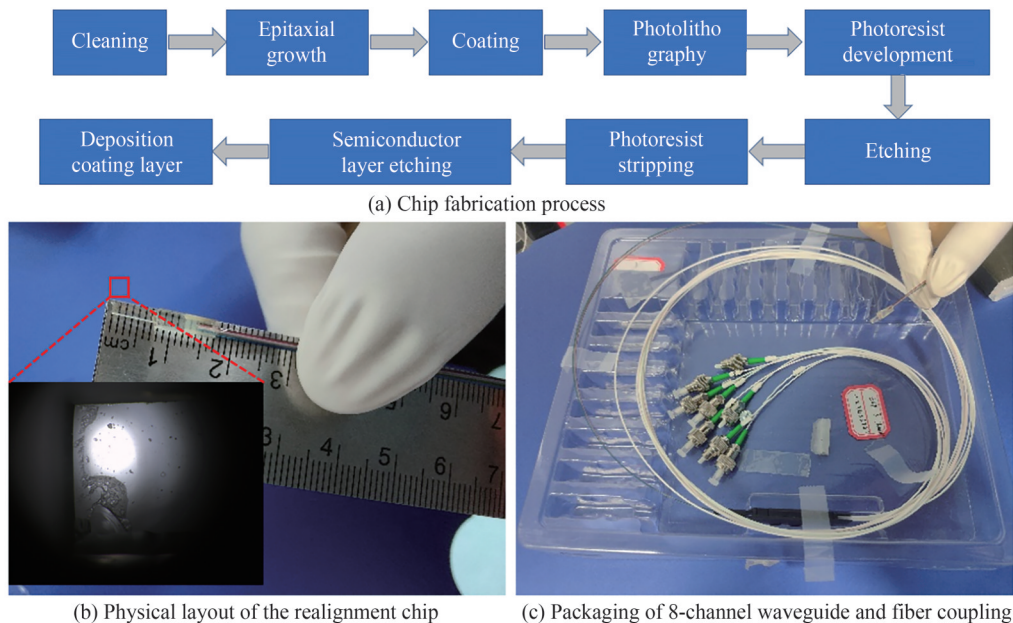


图5 芯片的加工与实物呈现

Fig. 5 Chip fabrication and physical demonstration

基于上述过程加工的多目标输入芯片实物如图5(b),图5(c)展示了芯片的封装,光纤与波导以机械对准的方式进行了耦合,使得芯片能够支持光纤输入。

3.2 实验研究

为了验证多通道波导芯片的实际效果,在实验室搭建了如图6所示的光谱测量装置。

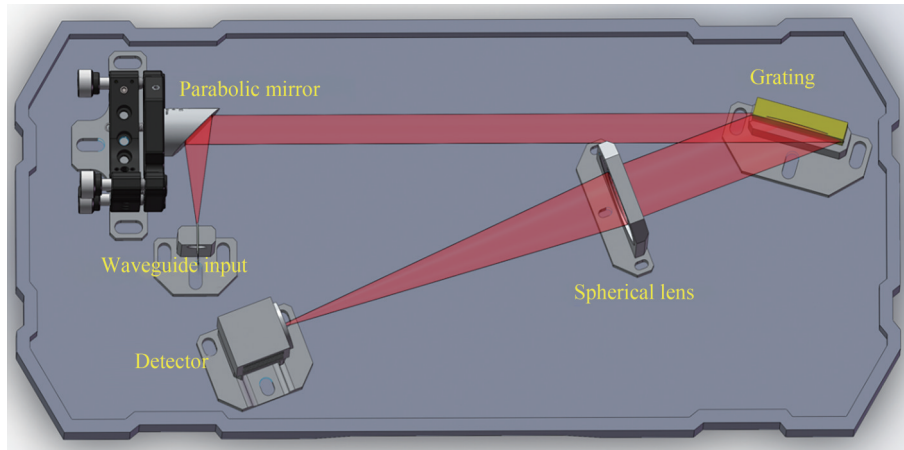


图6 密排波导8通道光谱探测实验装置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of experimental setup for 8-channel spectroscopic detection with bundled waveguides

图6中,光信号首先通过重排布芯片以 7.7° 的半角进行发散,然后依次通过25 mm焦距的抛物镜准直、31.6线的光栅衍射(工作在25级)以及100 mm焦距的平凸透镜聚焦,最终成像在近红外CCD上。实验使用的光源是airlab公司TLG-220可调谐激光器,拥有1 535 nm~1 562 nm的调谐范围,近红外CCD使用的是英国Raptor公司OWL 640 SWIR型号相机,能够高效且低噪的探测700 nm~1 700 nm光学信号,单个像素尺寸大小为 $15\ \mu\text{m}\times 15\ \mu\text{m}$ 。

本实验设计的色散系统在成像方面起到了四倍放大的效果,因此探测器预期能够获得间距为 $120\ \mu\text{m}$ 的8通道光谱,实测数据以及用于验证的数值仿真如图7。

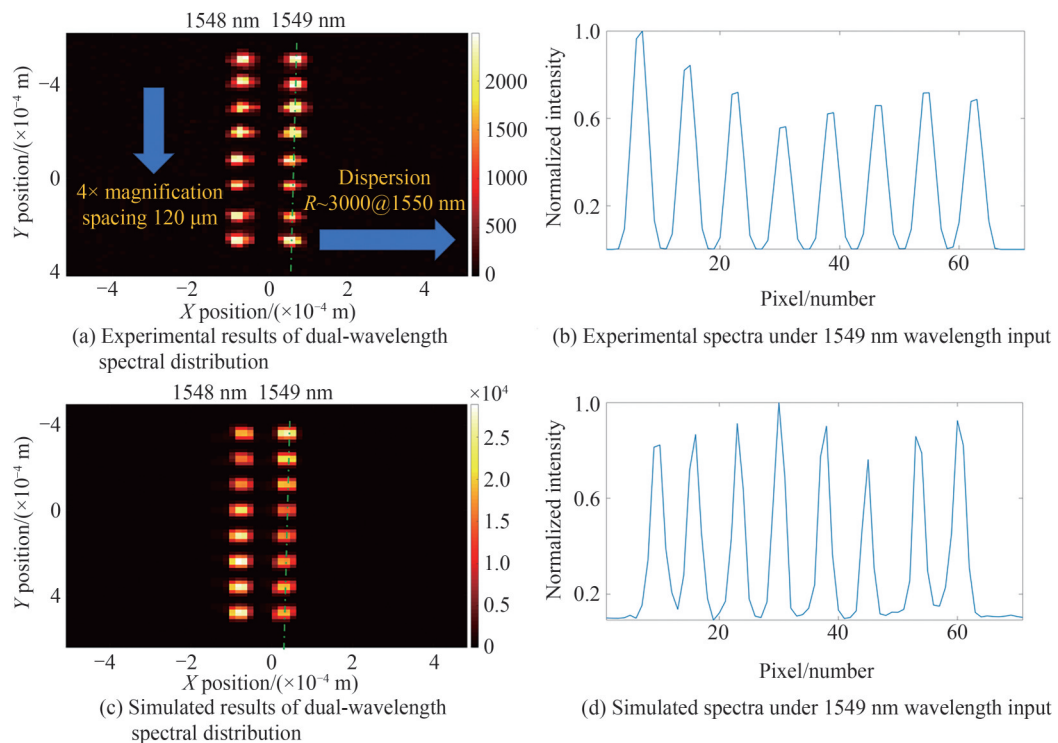


图7 实验与仿真获得的双波长8通道光谱

Fig. 7 dual-wavelength spectra in 8 channels obtained from experiment and simulation

由图7(a)与图7(c)可知,探测器获取的理想与实际光谱不仅空间分布基本保持一致,所成像的大小也基本相同,足以证明波导重排多目标光谱的可行性。图7(b)与7(d)则是在数据上展示了1549 nm单波长输入条件下,通道排列方向上的能够获取的光谱分布,图中所示相邻通道的光谱完全分开并且其间隔保持在8个像素(120 μm)左右,和预期获得的120 μm 间隔的8通道光谱保持一致。但是图7(b)相较于图7(d),8个通道的光强起伏会更大,其原因一方面在于8个通道之间本身存在5%左右的通光效率浮动,另一方面在于波导输出端面受到加工质量的影响,各个通道出射的光束质量不完全一致,如图7(a)。

4 讨论

基于波导重排的多目标光谱探测解放了光纤的固有包层对多目标光谱空间排布的限制,波导重排芯片起到了光纤输入与波导输出的转接作用,但是其潜在的应用价值不仅限于此,其优势还在于二维排布以及更大的设计自由度。

二维排布的波导可以带来观测能力的进一步提升,可以满足极多目标的观测需求,也是天文光子学深化应用领域的重要一环^[23]。在天文领域内不仅光谱巡天需要多目标光谱探测,积分视场光谱探测同样需要解决观测数量过多的问题。积分视场光谱仪所观测的物面被分割成一个个点目标,这就使得视场单元的数量会达到成千上万个,仅用成千上万个光纤在一维空间排布会占用极大的空间,在实验上很难实现。随着多层波导工艺以及激光直写工艺的日渐成熟,二维排布的波导在深度方向能够拥有更大的尺度,这将会带来同步观测能力二次方的提升,有望成为未来积分视场观测空间分辨率过高带来的观测目标过多的解决方案。

在设计自由度方面,本文对式(1)进行了简化处理,将光纤的芯径和波导的直径默认为相同以建立相同的观测条件。但在实际使用中,波导的直径、数值孔径以及材料拥有更大的自由度,在设计阶段可以通过改变波导构型以获取制式光纤不能够获取的参数组合,这将在部分光学系统的设计上提供更大的便利,我们在图8中给出相应的设计范例。

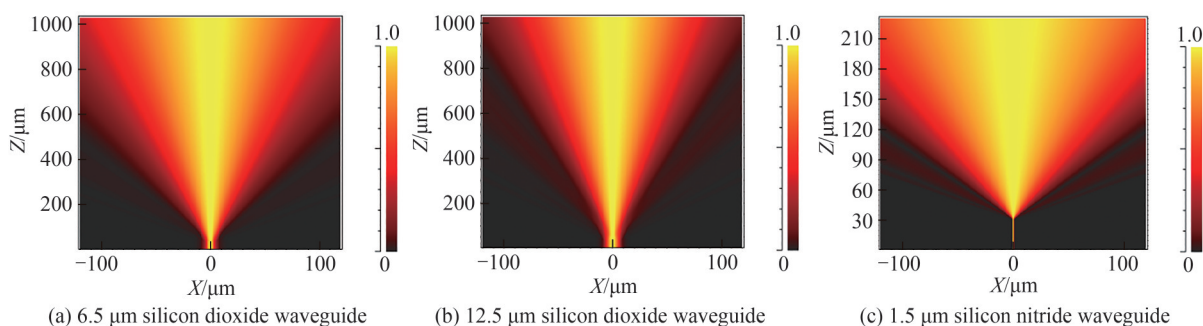


图8 不同构型与材料下波导的发散角

Fig. 8 Divergence angle of waveguides under different configurations and materials

图8(a)与8(b)中波导材料一致,仅波导构型上存在差别,6.5 μm 直径二氧化硅波导数值孔径为0.135,而12.5 μm 二氧化硅波导数值孔径下降至0.085,说明即使都工作在单模条件下,波导构型仍然可以提供数值孔径设计的自由度。图8(a)与8(c)均是单模光进行传输,但1.5 μm 氮化硅波导拥有接近0.7的数值孔径,其原因在于波导材料的改变会大大改变需要满足的单模传输的波导构型。氮化硅相较于二氧化硅拥有更高的折射率,会形成芯层与包层的大折射率差,使得单模条件下的氮化硅波导直径大大减小,从而变相增大了数值孔径。

重排布芯片作为光纤和光谱仪输入之间的转接件不可避免的存在插损,在实际应用时需仔细考虑波导材料的选择、适配程度以及对准耦合的限制。本文实验所用的掺锗二氧化硅的波导由于折射率差较小,其耦合模场尺寸较大,可以做到95%以上的效率,并且数值孔径变化较小,可以适用于各类应用场景。但是当选用氮化硅、硅等高折射率差材料作为波导芯层时,如图8所示,其拥有较大的数值孔径,但是单模模场直径会明显降,造成耦合模场的失配,从而造成耦合效率会下降至40%左右,因此更适用于小尺寸设备的应用

场景。在芯片与光纤阵列对准耦合方面,国内现阶段已拥有成熟的16根光纤-波导对准耦合工艺,并且实验室条件下可以通过精密装置辅以手工调试实现几十上百根光纤的对准,因此在进行大批量应用时,波导数量的选择同样需要关注。

此外,观测效率的提升会随着增大的波导尺寸有不同程度的下降。由式(1)可知,光纤间距与波导间距的比值决定了两种方法的相对观测能力,但是随着光纤芯径的增加,包层对间距的影响会逐步减小,从而变相的降低了观测能力的提升幅度。对于单模光纤输入的多目标光谱仪而言,约10 μm 大小的芯径仅占据光纤截面尺寸的1/10,这导致探测器能够获取信号数据的区域要小于整个探测靶面的1/10,当使用相同芯径的波导阵列作为输入时,波导间的间距可以做到30 μm 以下,这意味着波导重排布可以带来观测数量上至少4倍的提升。但在大芯径的多模光纤输入的应用场景下,包层的厚度要小于芯层,可以相对的减小包层的影响,如LAMOST上配备的光纤多目标光谱仪芯层400 μm ,光纤间距为528 μm ,如果设计相同芯径的波导阵列,它带来的观测数量提升只有0.25倍,因此该方法在单模和少模的条件下会获得较大的提升,而在大芯径的多模光纤输入条件下则提升效果不明显,现阶段更加适用于空间或南极等视宁度条件较好时的多目标光谱探测。

5 结论

多目标光谱探测作为解决极多目标同步观测的主流解决方案,但光纤在空间上的紧密排布已经做到了极限,因此现在望远镜上普遍通过增加光学系统的通光口径或增加光谱仪的数量来满足观测需求,不可避免的造成观测成本以及空间的巨大提升,因此提高探测器靶面的利用效率是解决上述问题的有效方案。本文基于波导重排布的多光谱探测避免了光纤覆盖层对光纤芯径间距的限制,采用密排波导阵列作为输出,其观测效率获得了4倍的提升,有望在未来天文多目标/积分视场光谱观测中得到应用,尤其是空间或视宁度较好台址下的光谱巡天应用。

参考文献

- [1] CUI Xiangqun, ZHAO Yongheng, CHU Yaoquan, et al. The large sky area multi-object fiber spectroscopic telescope (LAMOST) [J]. *Research in Astron Astrophys*, 2012, 12(9): 1197-1242.
崔向群, 赵永恒, 褚耀泉, 等. 大天区多目标光纤光谱望远镜(LAMOST)[J]. *天体物理学研究*, 2012, 12(9): 1197-1242.
- [2] ZHAO Gang, ZHAO Yongheng. LAMOST spectral survey—an overview [J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2012, 12(7): 723-734.
- [3] IVEZIC Z T, AXELROD W N, BRANDT W N, et al. Large synoptic survey telescope: from science drivers to reference design [J]. *Serbian Astronomical Journal*, 2008, 176: 1-13.
- [4] ABARESHI B, AGUILAR J, AHLEN S, et al. Overview of the instrumentation for the dark energy spectroscopic instrument [J]. *The Astronomical Journal*, 2022, 164: 207-269.
- [5] National Astronomical Observatories. Large sky area multi-object fiber spectroscopic telescope DATA RELEASE 9 v1.1 [EB/OL]. <http://www.lamost.org/dr9/v1.1/>.
- [6] TOLSTOY E, HILL V, TOSI M. Star-formation histories, abundances and kinematics of dwarf galaxies in the local group [J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2009, 47: 371-425.
- [7] SARAH A B, XUE Xiangxiang, TIAN Haijun, et al. Constraints on the assembly history of the Milky Way's smooth, diffuse stellar halo from the metallicity-dependent, radially dominated velocity anisotropy profiles probed with K giants and BHB stars using LAMOST, SDSS/SEGUE, and Gaia [J]. *The Astrophysical Journal*, 2021, 919: 66-93.
- [8] XIE Jiwei, DONG Subo, ZHANG Yong, et al. Exoplanet orbital eccentricities derived from LAMOST-Kepler analysis [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(41): 11431-11435.
- [9] DONG Subo, XIE Jiwei, LUO A, et al. LAMOST telescope reveals that Neptunian cousins of hot Jupiters are mostly single off spring of stars that are rich in heavy elements [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(2): 266-271.
- [10] GU Weimin, MU Huijun, LIU Jifeng, et al. A method to search for black hole candidates with giant companions by LAMOST [J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2019, 872: 20-26.
- [11] YI Tuan, SUN Mouyuan, GU Weimin. Mining for candidates of Galactic stellar-mass black hole binaries with LAMOST [J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, 886: 97-105.
- [12] YAN Hongliang, LI Haining, ZHAO Yongheng, et al. Overview of the LAMOST survey in the first decade [J]. *The Innovation*, 2022, 3(2): 100-224.

- [13] MCLEAN I S, STEIDEL C C, EPPS H W, et al. MOSFIRE, the multi-object spectrometer for infra-red exploration at the keck observatory[C]. SPIE, 2012.
- [14] SUZUKI N, TYTLER D. Relative flux calibration of keck HIRES echelle spectra[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2003, 115: 1050-1067.
- [15] ICHIKAWA T, SUZUKI R, NISHIMURA T, et al. MOIRCS: multi-object infrared camera and spectrograph for SUBARU[C]. SPIE, 2006.
- [16] 朱永田, 胡中文, 王磊, 等. LAMOST 多目标光纤光谱仪的研制及试运[J]. 中国科学, 2011, 41: 1337-1341.
- [17] JONG R S D, BARDEN S C, BELLIDO-TIRADO O, et al. 4MOST: the 4-metre multi-object spectroscopic telescope project at preliminary design review[C]. SPIE, 2016.
- [18] SALAZAR-GONZÁLEZ J J. Designing optimal masks for a multi-object spectrometer[J]. Omega, 2021, 103(102392): 1-13.
- [19] ZHANG Feifan, WANG Jianping, CHU Jiaru. Fiber assignment for multi-object fiber-fed spectrographs[C]. SPIE, 2020.
- [20] SZENTGYORGYI A, FURESZ G. Hectochelle: a multi object optical echelle spectrograph for the MMT [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2011, 123:1188-1209.
- [21] SMEDLEY S, BAKER G. Sphinx: a massively multiplexed fiber positioner for MSE[C]. SPIE, 2018.
- [22] BELLANGER C, BRIGNON A. Design of a fiber-collimated array for beam combining[J]. Optical Engineering, 2011, 50(2): 025005.
- [23] TONG Xue, LIN Dong, HE Jinping. Research status and application prospects of astrophotonics[J]. Acta Astronomica Sinica, 2022, 63(5): 1-22.
董雪, 林栋, 何晋平. 天文光子学研究现状及其应用展望[J]. 天文学报, 2022, 63(5): 1-22.

Multi-objects Spectroscopy with Compact Arranged Optical Waveguides

LIN Dong^{1,2,3}, ZHU Zhuangzhuang^{1,2,3}, FENG Jijun⁴, HE Jinping^{1,2,3,5}

(1 National Astronomical Observatories/Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Laboratory of Solar and Space Instrument, Nanjing 210042, China)

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

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

(4 University of Shanghai for Science and Technology, School of Optical-Electrical and Computer Engineering, Shanghai 200093, China)

(5 College of Nanjing, University of Chinese Academy of Science, Nanjing 211135, China)

Abstract: Multi-object spectroscopic detection has become one of the most important tools in astronomical observation, as it can simultaneously obtain a large amount of spectral information from celestial bodies. Astronomers have developed numerous research achievements in galaxy structure and evolution, outer planet detection and research, and cosmic large-scale structures and evolution through massive spectral data. The astronomical community has set up multiple large-scale spectral survey dedicated telescopes, obtaining tens of millions of spectral information in the past few decades. However, compared to the vast number of celestial bodies in the universe, the current amount of spectral data is still insignificant. For instance, the number of galaxies alone may exceed 100 billion, with an extremely large number of celestial bodies in each galaxy, such as the 100 billion to 400 billion stars in our Milky Way galaxy. Therefore, there is still much more unknown information waiting for exploration. In recent years, China has been actively promoting the second-phase project of survey telescopes and the establishment of new large-scale survey telescopes to maintain its world-leading position in large-scale spectroscopic survey technology and corresponding astronomical scientific research. This requires a significant increase in the number of multi-object spectroscopic detections. However, observing so many celestial spectra at the same time still presents significant technological and cost challenges. Currently, multi-object spectroscopy is generally based on fiber optic spectrographs. After collecting multi-object signals at the telescope focal plane, numerous fibers form a one-dimensional array at the entrance slit of the spectrograph, ultimately achieving multi-target spectral detection on a single instrument. With the same physical field of view, known large multi-object fiber optic spectrographs can measure hundreds of celestial spectra simultaneously due to their

close to 300 mm aperture. However, only synchronously observing several hundred targets is far from sufficient when compared to the vast number of observation targets. Enlarging the aperture requires the use of large optical components, which not only brings about technical issues in manufacturing, modulation, and control but also causes an exponential increase in cost. Moreover, the spatial arrangement of input fibers in multi-object fiber optic spectrographs has reached a theoretical limit. When light energy propagates through optical fibers, it is mainly localized in the core, while the coating layer that each fiber independently possesses restricts further narrowing of the core distance, which may affect the pixel utilization efficiency of the astronomical detector, whose price is extremely high. In the observation environment with minimal disturbances from space and atmospheric turbulence, coupling efficiency can be achieved with small fiber cores, making the problem of detector utilization efficiency more serious. Therefore, at present, the method to enhance the observing quantity mainly relies on building more telescopes and terminal instruments, which will also exponentially increase costs, making it equally unacceptable. To solve this problem, this research uses dense waveguide photonic chips as the multi-object input mechanism and verifies in experiments that this device can effectively reduce the influence of large fiber cladding on fiber spatial arrangement, improving the detection efficiency of multi-object spectroscopy by at least four times, and the chip's optical efficiency can be greater than 90%. The waveguides used in this paper adopt mature planar waveguide technology, combined with end-face coupling technology of fiber-optic-waveguide, have the potential for large-scale production, and do not incur additional technical costs. Since all input channels are integrated into the chip, all target spectra have negligible relative spatial movement on the detector, making the relative spectral drift between different channels almost zero, improving the wavelength accuracy or radial velocity detection accuracy.

In addition, based on waveguide rearrangement, multi-object spectroscopic detection also has advantages in two-dimensional layout and greater design freedom, providing a competitive multi-object input mechanism solution for extremely large-scale observation, especially for spatially large-scale spectroscopic surveys or integral field astronomical observation.

Key words: Multi-objects spectroscopy; Dense waveguides; Multi-objects input; Astrophotonics; Spectral sky survey

OCIS Codes: 300.6190; 230.7370; 350.1260; 350.1270