

# 天文光子学研究现状及其应用展望\*

童雪<sup>1,2,3†</sup> 林栋<sup>1,2,3</sup> 何晋平<sup>1,2‡</sup>

(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(南京天文光学技术研究所) 南京 210042)

(3 中国科学院大学 北京 100049)

**摘要** 天文学是一门观测学科,其发展受观测技术及仪器进步所推动,而天文科学发展同样不断对观测仪器提出新的要求.天文学发展至今,对观测仪器的要求逐渐走向极致和极端,这在实现成本及难度两方面均带来极大挑战.为应对上述挑战,基于新原理、新技术的下一代天文光学技术及观测仪器已成为天文学发展的内在需要.近年来,集成光子学的发展为天文光学技术带来了新的变革性机遇,在此基础上产生的新兴交叉学科天文光子学(Astro Photonics)可为天文观测提供低成本、高度集成化(芯片化)的新一代高性能光学终端仪器,这类仪器将在空间天文观测、大规模光谱巡天、高分辨高精度光谱成像等应用中起到关键作用.主要从仪器/器件功能出发介绍天文光子学主要研究内容及现状,并简要讨论其发展所面临的主要问题,最后对其发展趋势做出展望.

**关键词** 天文学, 天文光学技术, 天文光子学, 集成光子学

**中图分类号:** P185; **文献标识码:** A

## 1 引言

自17世纪伽利略将口径4.4 cm的光学望远镜指向天空开始,以望远镜技术及光谱技术为代表的天文光学技术的持续发展不断提升人类基于光学波段探索宇宙的能力.人类对宇宙空间的研究从最初的月球、太阳及太阳系内行星的表面细节,拓展到银河系结构与物理化学性质、星系形成与演化、暗物质暗能量及系外行星与系外生命探测等重大科学问题.如今,8–10 m级光学红外望远镜已成为光学波段天文观测主力设备,而以美国牵头的30 m口径望远镜(Thirty Meter Telescope, TMT)<sup>[1]</sup>和25 m口径大麦哲伦望远镜(Giant Magellan Telescope, GMT)<sup>[2]</sup>以及欧洲牵头的39 m口径欧洲极大

望远镜(European Extremely Large Telescope, E-ELT)<sup>[3]</sup>为代表的下一代极大口径光学红外望远镜也已在规划甚至研制之中,其中,进展最快的E-ELT预计将于2027年实现初光<sup>1</sup>.这类极大口径望远镜将影响众多天文学前沿研究领域,涵盖众多激动人心的科学问题,可将人类对宇宙的探知能力提高到一个新的高度.然而,在大幅提升观测能力的同时,下一代光学天文设备(含30 m级望远镜及其终端仪器)的设计及建造也给天文光学技术带来极大挑战:简单升级现有技术在仪器复杂性、尺寸及成本方面代价极大(传统光学仪器的造价通常与仪器光学口径的平方甚至立方成比例).探寻其他更优解决方案迫在眉睫.另一方面,大规模光谱巡天

2022-02-28收到原稿, 2022-04-22收到修改稿

\*国家自然科学基金项目(11773045、11973009、11933005)资助

†xtong2020@niaot.ac.cn

‡jphe@niaot.ac.cn

<sup>1</sup><https://elt.eso.org/about/timeline/>

对单次摄谱数目要求逐渐增长,如郭守敬望远镜(Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopy Telescope, LAMOST)能同时采集4000个目标的光谱<sup>[4]</sup>,而暗能量光谱装置(Dark Energy Spectroscopic Instrument, DESI)将这一纪录刷新到5000<sup>[5]</sup>.近期,我国天文学家正在考虑对LAMOST进行升级改造,改造后单次光谱采集数目预计达到8000–20000,将使我国在大规模光谱巡天方面继续保持世界领先水平.这种大规模光谱巡天装置对几千个目标同时进行光谱观测,一般需要大量光谱仪器:目前LAMOST配备光谱仪16台<sup>[4]</sup>(如图1所示),而升级改造之后,配备的光谱仪数目预计将提高到30台以上.天文光谱仪的大尺寸及高造价对大规模光谱巡天项目的发展在实现成本及难度上均带来巨大挑战.研发小尺寸、低成本、高性能天文光谱仪对以LAMOST为代表的大规模光谱巡天项目至关重要.

空间观测因在应对大气湍流、光吸收、大气辐射等方面的独特优势受到天文学家的青睐.中国空间天文与西方发达国家相比还存在差距,但近年

来发展迅速.在高频波段已有一些性能优异的空间观测设备,如暗物质粒子探测卫星“悟空”(Dark Matter Particle Explorer, DAMPE)<sup>[6]</sup>、硬X射线调制望远镜“慧眼”(Hard X-ray Modulation Telescope, HXMT)<sup>[7]</sup>、伽马暴偏振探测仪“天极”(POLAR)<sup>[8]</sup>等,如图2所示.另有众多各波段的空间观测设备在建造或计划中,如中国巡天空间望远镜(Chinese Space Station Telescope, CSST)<sup>[9]</sup>、先进天基太阳天文台(Advanced Space-based Solar Observatory, ASO-S)<sup>[10]</sup>等.与地基观测仪器不同,空间仪器要求严苛,一般会面临以下3个方面问题:(1)由于工作在恶劣的空间物理环境,应尽量避免设计非常复杂的仪器;(2)由于仪器在远离设计团队的地方工作,其设计、制造、测试、校准、发射和操作必须精益求精,以获得保证任务成功的工作性能;(3)设计和制造必须以受限范围非常严格的资源(如质量、能耗、体积等)来达到性能要求.这些问题在一定程度上束缚了空间观测仪器的类型及科学产出.如何设计小质量、低能耗、小体积、高性能的新一代仪器,对空间天文意义重大.

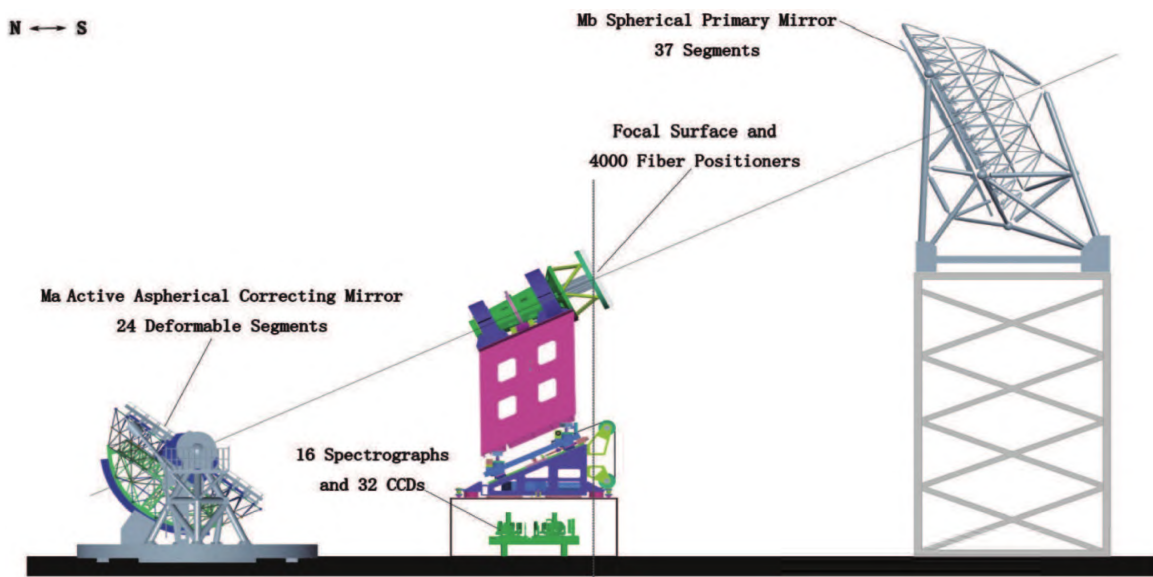


图1 LAMOST望远镜结构示意图<sup>[4]</sup>

Fig. 1 Configuration of LAMOST<sup>[4]</sup>

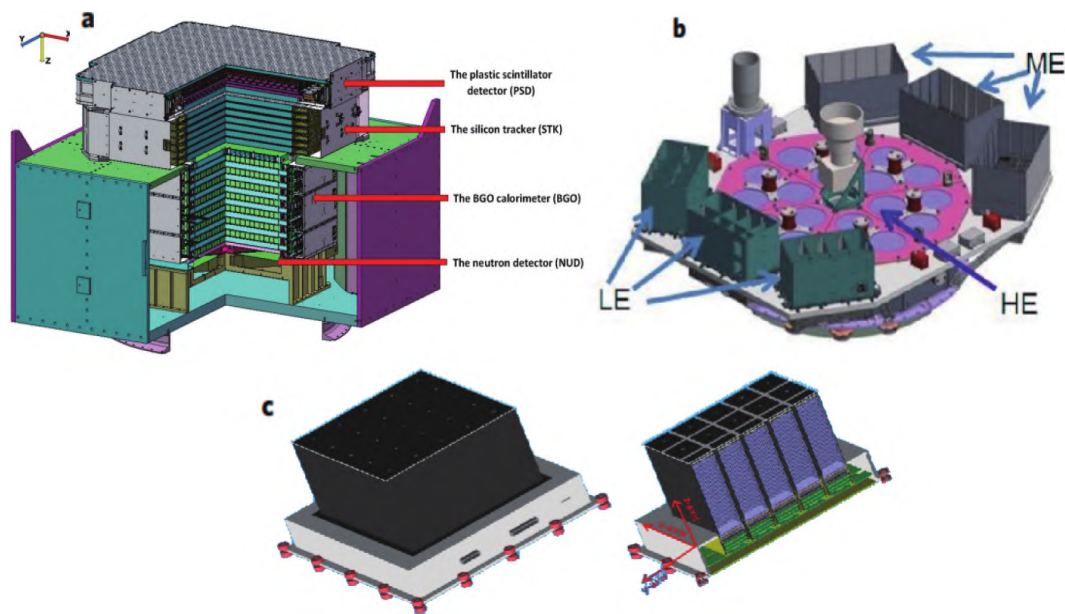


图2 我国代表性空间天文装置。(a)暗物质粒子探测卫星“悟空”<sup>[6]</sup>；(b)硬X射线调制望远镜“慧眼”<sup>[7]</sup>；(c)伽马暴偏振探测仪“天极”<sup>[8]</sup>。

Fig. 2 Representative space astronomical installations of China. (a) DAMPE<sup>[6]</sup>; (b) HXMT<sup>[7]</sup>; (c) POLAR<sup>[8]</sup>.

为应对上述问题,光子学(Photonics)及新一代光子技术(Photonic Technology)有潜力提供合适的解决方案.光子学这一概念是参考电子学(Electronics)提出来的,其主要研究以光子(Photon)为信息和能量载体的科学及应用,包括光的产生、发射传输、调节、信号处理、切换、放大及传感等,目前在量子科学、信息技术、生物医学等众多领域均有深度应用.近年来,集成光子学(Integrated Photonics)及技术的发展,更是将光子学及光子技术推向了光学研究的最前沿,正在逐步影响到几乎所有与光学相关的研究方向.集成光子学,也被称为集成光学(Integrated Optics),于1960年由美国贝尔实验室Miller首次提出,当时定义为“在光电子学和微电子学基础上,采用集成方法研究和开发光学器件和混合光学电子学器件的一门系统学科”.经过这些年发展,特别是近年来在光通信等巨大产业需求的推动下,集成光子学不论是在原理、技术方面,还是在器件及工艺等方面均日趋成熟.就当前而言,光子学涉及到的基本光学过程及功能,集成光子学均能实现,而且能将这些功能模块或器件集成在一层基底上,形成类似于电子芯片

一样的“光子芯片”.图3<sup>[11]</sup>给出了一种封装好的微环腔芯片,在超高带宽光纤通信中展现极大应用前景.利用这种高度集成化的“光子芯片”可研制小型化、低成本、高稳定的光学功能器件及仪器,为众多研究领域及行业的众多应用提供极大的想象空间,如光量子计算<sup>[12]</sup>、超高带宽光通信<sup>[11]</sup>、增强现实/虚拟现实<sup>[13]</sup>、神经网络/人工智能<sup>[14]</sup>、激光雷达导航<sup>[15]</sup>等,当然也为天文学及天文观测带来了前所未有的机遇.

近年来,光子学技术/器件的天文应用被逐渐发展成为一个崭新的交叉学科—天文光子学(Astrophotonics).“Astrophotonics”这个名词于2009年左右由Bland-Hawthorn等人首先提出,定义为“天文和光子学的交叉学科”<sup>[16]</sup>,而后,其定义逐渐明确、细化,经历“光子学和天文仪器的交叉”<sup>[17]</sup>、“将功能强大的光子技术用于单个或多个望远镜所收集的光的导光、操控及色散,以低成本、高效率实现天文学研究的科学目标”<sup>[18]</sup>两个阶段.实际上,光子技术的天文应用由来已久,如20世纪70年代,光纤<sup>[19]</sup>及光电探测器CCD<sup>[20]</sup>的实用极大地提高了天文观测效率及观测性能,20世纪80年代开始的自





本篇综述论文将主要介绍天文光子学近年来的发展现状、面临的主要问题及后续发展趋势。其中发展现状部分将从集成光子技术在天文光谱技术、望远镜成像技术及其他相关技术中的应用3个方面来分别展开。

## 2 天文光子学发展现状

天文光子学涵盖的内容十分广泛,可涉及天光信号的收集、传输、排布、滤波、色散、合束、标定等功能。这些功能的排列组合将可引入大量天文光子设备。天文光子学的研究进程也就是伴随这些光子功能器件及仪器的发展进程而逐步推进。鉴于天文观测主要涵盖光谱及成像两类技术手段,本节在介绍天文光子学发展现状时也从集成光子光谱技术、集成光子成像技术及其他相关技术3方面来展开。

### 2.1 集成光子光谱技术发展现状

集成光子光谱技术作为天文光子学典型代表,近些年来发展极其迅速。目前已有几十种不同类型的天文光子光谱仪,其中有少量进入到原型样机阶段,还有个别已进入实际应用阶段。基于工作原理不同,这些集成光子光谱技术及仪器可分成两类:(1)直接色散型,其代表有半集成紧凑型光栅光谱仪<sup>[23]</sup>、阵列波导光栅光谱仪<sup>[24]</sup>、侧面全息色散光谱仪<sup>[25]</sup>、光子晶体超棱镜光谱仪<sup>[26]</sup>;(2)计算重构型,其代表有可见高分辨率片上光谱仪<sup>[27]</sup>、驻波集成傅里叶变换光谱仪<sup>[28]</sup>、泄露循环集成傅里叶光谱仪<sup>[29]</sup>、阵列Mach-Zehnder干涉仪<sup>[30]</sup>、单纳米线光谱仪<sup>[31]</sup>、锥形光纤模式干涉光谱仪<sup>[32]</sup>等。其中,计算重构型光谱技术及器件种类繁多,诸如黑磷<sup>[33]</sup>及珍珠<sup>[34]</sup>等材料或物体均能被直接用来作为光谱探测的核心器件。除集成光谱仪外,基于集成光子技术的滤波器件(如布拉格光栅)及波长定标器件(如光子光梳)也将在这一节介绍。

#### 2.1.1 直接色散型集成光子光谱技术

##### (1)阵列波导光栅

阵列波导光栅(Arrayed Waveguide Grating, AWG) 1988年由Smit首先提出<sup>[35]</sup>,是人类历史上第一个得到实用的平面波导器件。目前,AWG作为

最典型的密集型波分复用器件已在光通信中得到广泛应用。

AWG本质上与光栅类似,是相位阵列型色散器件(如图5(a)<sup>[24]</sup>所示)。其利用波导阵列之间特定的长度差来获取类似于光栅周期性结构衍射所产生的相位阵列,而相位阵列(或光程成等差数列的多光束)的多光束干涉使得不同波长光信号在不同空间位置获得相干增强,从而实现光的空间色散。值得一提的是,AWG的波导阵列光程差可做到较大,其在输出端呈罗兰圆排布,以小尺寸集合了聚焦功能和较高的色散能力<sup>[36]</sup>,使得其具有波长间隔小、信道数多、结构紧凑等优点<sup>[37]</sup>,极适密集型波分复用应用。

原则上,具有空间色散能力的器件均有潜力用在光谱探测中。近年来,AWG在低损耗研究方面获得重大突破,从而使其开始在天文光子学领域受到广泛关注,并逐渐成为关注度最高、研究最多的天文光子光谱器件。AWG天文光谱技术主要研究进展及成果可总结如下。2009年,澳大利亚Macquarie大学Cvetojevic等人利用AWG光谱仪原型机首次对天试观测(望远镜:Anglo-Australian, 3.9 m)<sup>[38]</sup>:光谱分辨率在1500 nm处为2100,利用半导体激光测得系统光效率约为65%。该小组于2012年在同一架望远镜上再次进行试观测<sup>[39]</sup>:在波长1600 nm附近,光谱分辨率为2500,并能同时采集多目标光谱数据(多条输入光纤);但由于单模光纤耦合效率(5%~7%)、光纤—波导间光耦合效率(~14%)、正交色散系统光效率(~11%)均较低,再加上其他损耗,使得仪器对天实测总光效率只有0.03%~0.07%。2016年,美国Maryland大学的Gatkine等人利用AWG光谱仪在H波段获得1500左右光谱分辨率(目标3000),光谱对比度优于18 dB,且AWG芯片光效率最高达80%<sup>[24]</sup>,此类光谱仪可用来通过测量几条金属诊断线的等效线宽来精密测量高红移伽马暴星体或干预系统(Intervening Systems)的金属丰度等。2017年,Gatkine等人将峰值光效率提高到23%(实验室结果,未计算单模光纤耦合效率)<sup>[40]</sup>。同年,澳大利亚Macquarie大学Jovanovic等人将AWG光谱仪样机首次在8 m级地面望远镜Subaru上进行了天文实测(图5(b)<sup>[41]</sup>):

(1)由于自适应光学系统性能有限,导致单模光纤耦合效率较低,致使仪器总光效率在5%左右,但有很大希望提高到13%,这已十分接近天文实测光效

率要求;(2)光谱分辨率为4000–5000 (J、H波段);(3)光谱范围覆盖J波段及H波段;(4)光谱仪尺寸小于30 cm × 30 cm × 30 cm.

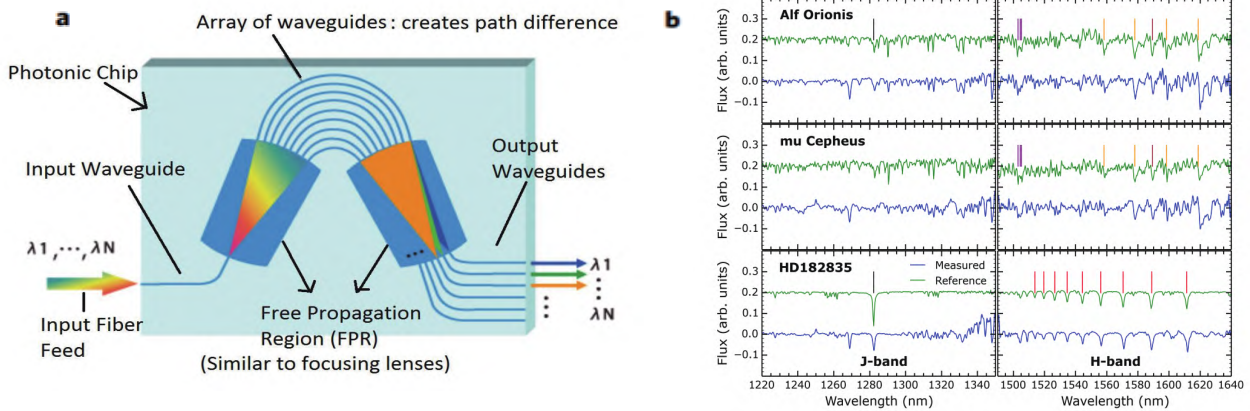


图 5 AWG原理示意图<sup>[24]</sup>及在Subaru望远镜上的测试结果<sup>[41]</sup>. (a) AWG原理示意图; (b) Subaru实测结果,其中红色垂直线表示氢-布拉克特线的位置,黑色垂直线表示氢-帕申线的位置,橙色垂直线表示CO线的位置,棕色垂直线表示硅线的位置,紫色垂直线表示镁线的位置.

Fig. 5 Schematic diagram<sup>[24]</sup> of AWG and test results on Subaru telescope<sup>[41]</sup>. (a) Schematic diagram of AWG principle; (b) Subaru measurement results, in which the red vertical line indicates the position of the hydrogen-Brackett line, the black vertical line indicates the position of the hydrogen-Paschen line, the orange vertical line indicates the position of the CO line, the brown vertical line indicates the position of the silicon line, and the purple vertical line indicates the position of the magnesium line.

由以上结果可知,AWG光谱仪在中/低光谱分辨率情况下已实现多次天文试观测,参数要求已经接近满足天文观测要求,有望在5–10 yr内得到实际应用.另外,据Stoll等人数值模拟结果所示,在1630 nm附近,AWG光谱仪有潜力获得最大60000的光谱分辨率,且芯片尺寸仅需5.5 cm × 3.93 cm<sup>[37]</sup>.这意味着对芯片及系统结构进行针对性设计后,AWG光谱仪有实现高光谱分辨率的潜力.

中国在AWG方面的研究主要集中在面向光通信的AWG芯片开发研究及AWG在通信领域应用研究两方面,浙江大学何赛灵教授团队有大量此类工作发表,如Dai等<sup>[42–43]</sup>,其他诸如中科院半导体所等众多单位也有大量研究工作,在此不一一给出.然而,AWG光谱技术目前研究极少.据作者调研,目前只有厦门大学萨本栋微米纳米科学技术研究院的吕苗教授团队有相关工作:如Cheng等人利用AWG芯片搭建了便携式拉曼光谱仪实验装置,

在工作波长800–1000 nm范围内获得的光谱分辨率约2000<sup>[44]</sup>.

为解决AWG色散能力问题并面向光谱应用针对性改造AWG结构,作者团队在新型波导阵列光谱芯片方面也开展了相关研究,目前已将光谱分辨率推进到15000 (在1550 nm波段)左右,且避免了常规AWG的离散化采样及罗兰圆结构设计引入的像差问题<sup>[45]</sup>.这种新型波导阵列结构将使得直接色散型光谱芯片在高分辨天文观测中的应用成为可能.

## (2)其他直接色散型光谱芯片

除AWG外,还有大量直接色散型光谱芯片被提出、制造及在实验室得到研究.这些芯片虽然还未有天文试观测记录,但是也展现出一定的前景,如片上中阶梯光栅(Planar Echelle Gratings, PEG).该类光栅是反射式光栅,其结构如图6 (a)所示<sup>[46]</sup>.1995年,Watson<sup>[47]</sup>便首次提出了片上中阶梯光栅有用于天文的可能性,但一般适用于低分辨率情形<sup>[48]</sup>.由于PEG紧凑性好,可以采用在单个芯片

上蚀刻多个PEG实现串联中阶梯光栅设计<sup>[49]</sup>, 这既不会损失材料的均匀性, 并且占用空间小, 同时传输损耗也较小. 2018年, 美国马里兰大学的Xie等人基于氮化硅平台设计的片上中阶梯光栅实现光谱观测, 在1550 nm处分辨率为1300, 信噪比30 dB (如图6 (b)所示<sup>[50]</sup>). 2019年加拿大的Melati等人通过硅基工艺获得尺寸为260  $\mu\text{m}$   $\times$  83  $\mu\text{m}$ 的片上阶梯光栅芯片, 基于该芯片在O波段获得了分辨率为800 GHz、信噪比28 dB的光谱<sup>[46]</sup>.

除上述PEG外, 还有众多类型的直接色散型光谱芯片也被提出及研究. 2001年, 德国汉堡大学的Sander等人基于自聚焦投射光栅(self-focusing phase transmission gratings)搭建光谱测量装置, 工作带宽为350–650 nm, 分辨率为9 nm<sup>[51]</sup>. 2014年, 都灵大学理工学院Calafiore等人利用片上数字平面全息(digital planar holo-

gram)实现了在同一芯片上集成多个平面全息图的光谱仪, 采用926个输出通道, 在红光和近红外波段光谱分辨率0.15 nm、工作带宽148 nm、芯片尺寸仅为2  $\text{cm}^2$ <sup>[52]</sup>. 2018年加州理工大学Faraji-Dana等人利用超表面(meta-surfaces)色散特性设计了760–860 nm分辨率为1.2 nm的集成光谱仪, 尺寸1 mm  $\times$  1 mm  $\times$  7 mm<sup>[53]</sup>. 2020年, 新墨西哥大学Nezhadbadeh等人基于啁啾光栅(chirped grating)设计了在640 nm处分辨率为0.3 nm, 工作带宽为75 nm的光谱仪<sup>[54]</sup>. 另外, 光子晶体(planar photonic crystals)超棱镜相较于普通棱镜, 色散能力可高数百倍<sup>[55]</sup>, 也具有一定的应用前景. 2015年, 美国罗彻斯特大学的Gao等人设计了由8个通道输出、分辨率为100、工作带宽为100 nm的光子晶体超棱镜光谱仪<sup>[56]</sup>.

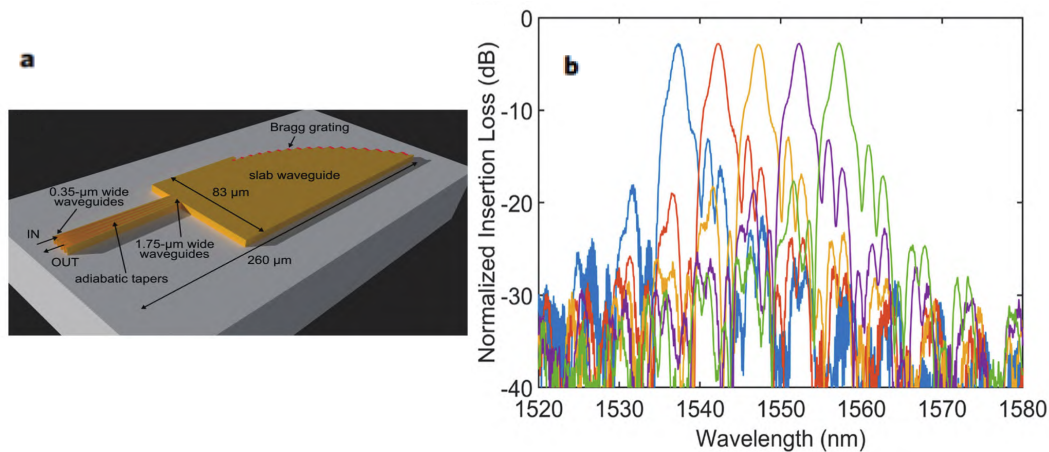


图6 片上中阶梯光栅示意图<sup>[46]</sup>及实验结果<sup>[50]</sup>. (a)片上中阶梯光栅示意图. (b)实验结果, 分辨率为1300.

Fig. 6 Schematic diagram of the on-chip echelle grating<sup>[46]</sup> and experimental results<sup>[50]</sup>. (a) Schematic diagram of the on-chip echelle grating. (b) Experimental results with a resolution of 1300.

### 2.1.2 计算重构型光子光谱技术及器件

计算重构型光谱技术并未直接将信号光的各波长在空间上(或时间上)分开并探测, 它通常利用某些具有光谱响应的过程或器件获得一些可间接探测的物理量, 并利用这些物理量重构出入射光谱. 其中, 傅立叶变换光谱仪(Fourier Transform Spectrometer, FTS)是这一类光谱仪的典型代表,

其在天文观测中已经应用半个多世纪<sup>[57]</sup>.

近年来, 基于片上的集成傅里叶变换光谱仪被频繁报道, 不断提高的性能参数有望满足天文观测需求, 并且能够极大地降低FTS的制造成本. 2017年, 西班牙的Herrero-Bermello等人通过在硅基芯片上制造32组马赫-增德尔干涉仪, 其最大光程差为3.779 cm, 从而在1550 nm波段获得了光



谱分辨率17 pm及自由光谱范围0.22 nm的光谱<sup>[58]</sup>. 同年, 荷兰的Akca<sup>[59]</sup>模拟了中心波长为800 nm、理论分辨率为1 pm、带宽0.03 nm的集成傅里叶光谱仪, 表明片上FTS能实现更高分辨光谱观测. 2018年, 麻省理工的Kita等人设计8个马赫-增德尔级联干涉仪, 辅以时域调节, 在1550 nm波段实现了宽带(4.8 nm)光谱测量<sup>[60]</sup>.

针对FTS需要长时间来扫描光程差的问题, 一种新型片上傅里叶变换光谱仪被提出, 即驻波集成傅里叶变换光谱仪(Stationary Wave Integrated Fourier Transform Spectrometer, SWIFTS, 如图7 (a)所示<sup>[61]</sup>). 该类光谱仪尺寸小, 并且不依赖于任何移动组件, 集成度高. SWIFTS可有两种结构, 第一种被称为SWIFTS-Lippmann模式(见图7 (a)上图), 波导尾端集成反射镜, 光波在波导中传输遇到反射镜, 后向反射光与入射方向传输光形成驻波, 获得干涉图样; 第二种称为SWIFTS-Gabor模式(见图7 (a)下图), 该模式将信号光一分为二分别从两端输入进波导, 在波导中央位置附近产生较强的干涉条纹, 这种模式除了能得到入射光的光谱之外, 还能解算其相位信息<sup>[62]</sup>. 2007年, 约瑟夫傅里叶大学的le Coarer等人首次基于SWIFTS-Gabor模式及硅基平台获得驻波干涉傅里叶变换光谱仪, 在1550 nm波段获得了带宽为96 nm、分辨率为

4 nm的光谱<sup>[28]</sup>. 在此之后, 众多团队基于不同材料成功研制了SWIFTS: 2008年, Ferrand等人基于石英材料在863 nm处获得分辨率为95的SWIFTS光谱仪, 并且增加散射体数量有望将分辨率提高到800<sup>[63]</sup>. 2017年, 比利时根特大学的Nie等人基于氮化硅材料在900 nm处研制了分辨率为6 nm的SWIFTS光谱仪, 工作带宽大于100 nm, 芯片尺寸仅为0.1 mm<sup>2</sup><sup>[64]</sup>. 在宽带测量上, SWIFTS也有着优异的性能, 2020年, 瑞士苏黎世联邦理工学院的Pohl等人基于铌酸锂薄膜设计了单波导傅里叶变换光谱仪, 配合电光调制, 该光谱仪在红外波段的工作带宽达500 nm, 仪器尺寸仅为10 mm<sup>2</sup><sup>[65]</sup>. 理论上, SWIFTS的分辨率可由以下公式确定 $R = \lambda/\Delta\lambda = n_{\text{eff}}L/\lambda$ <sup>[28]</sup>, 其中,  $R$ 为光谱分辨率、 $\lambda$ 为光波长、 $n_{\text{eff}}$ 为波导有效折射率、 $L$ 为波导的物理长度. 因此, 波导长度越长, 则分辨率越高. 据简单估算, 3 cm长的SWIFTS芯片可提供70000的超高光谱分辨率<sup>[62]</sup>, 而当波导长度达到5 cm时, 分辨率有望达到100000<sup>[61]</sup>.

值得一提的是, SWIFTS技术成熟度已经达到NASA技术成熟度最高标准9级<sup>[66]</sup>, 众多空间任务均考虑配备SWIFTS, SWIFTS样机如图7 (b)所示<sup>[67]</sup>.

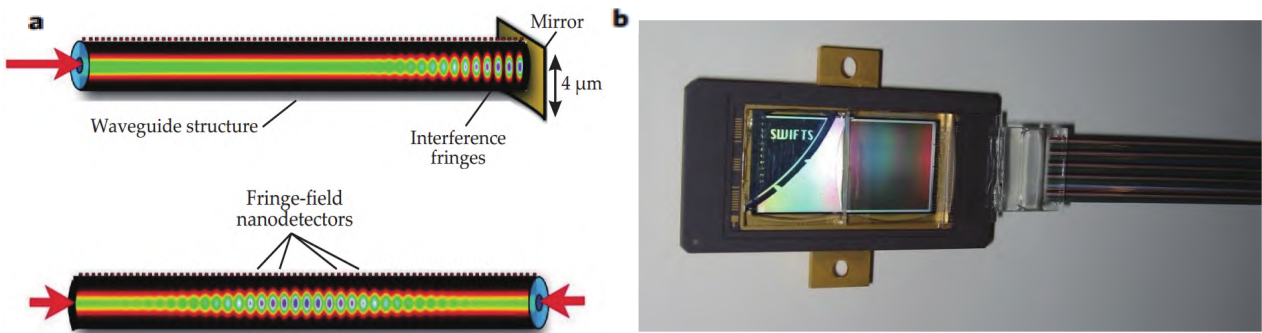


图7 SWIFTS原理图<sup>[61]</sup>及样机<sup>[67]</sup>. (a) SWIFTS李普曼原则, 波导中的前向传播光场在波导端的反射镜上反射并干涉. SWIFTS-Gabor原则, 两个波在波导中以反向传播, 相遇后干涉. (b) SWIFTS样机.

Fig. 7 SWIFTS schematic<sup>[61]</sup> and prototype<sup>[67]</sup>. (a) SWIFTS-Lippmann principle, the forward propagating light field in the waveguide reflects and interferes on the mirror at the end of the waveguide. SWIFTS-Gabor principle, two waves propagate in opposite directions in a waveguide and interfere after encountering. (b) SWIFTS prototype.



除傅里叶变换机制之外, 计算型光谱技术还有各种不同的光谱获取机制及手段, 总结下来, 通常有两种模式, 一是基于具有波长响应的感光器件(探测器), 二是基于具有波长响应的微纳结构或随机结构器件及特殊材料。

第一种模式中最典型代表是单纳米线光谱仪。2019年, 剑桥大学Yang等人以 $\text{CdS}_x\text{Se}_{(1-x)}$ 纳米线作为感光元件来重构光谱<sup>[31]</sup>: 由于不同材料配比( $x$ 值)下的感光元件对波长的响应曲线均不一样, 通过对38个具有不同波长响应曲线的感光元件采集的光强信号进行反演, 在波长560 nm附近获得了7 nm分辨率的光谱。2020年, 基于相同原理, 南京大学的Zheng等人将光谱分辨率提高到5 nm<sup>[68]</sup>。

第二种模式典型代表是无序散斑光谱仪。2015年, 丹麦的Chakrabarti等人通过所设计的粗糙表面来散射信号光, 获得的散斑图样与入射光波长具有一一对应关系, 通过标定每一个波长的散斑图样获得传输矩阵, 进而可利用散斑图样对未知光信号的光谱进行反演。在实测中, 他们在760 nm处获得了分辨率高达100 MHz的光谱<sup>[69]</sup>。2020年, 蒙茨大学的Hartmann等人通过设计芯片的散射区域, 在1550 nm、960 nm及760 nm处分别获得了3 nm、1 nm及0.3 nm的光谱分辨率<sup>[70]</sup>。同年, 基于相同原理, 埃因霍温科技大学的Liu等人将工作波段延展至中红外波段, 在3  $\mu\text{m}$ 处获得了自由光谱范围500 nm, 分辨率约为50 nm的光谱<sup>[71]</sup>。除了通过散射结构来获得相对应的光谱响应外, 某些特殊材料也有很强的波长响应。2021年, 耶鲁大学的Yuan等人通过感光材料黑磷实现了光谱重构, 工作范围为2–9  $\mu\text{m}$ 的中红外波段, 芯片尺寸仅为 $9 \times 16 \mu\text{m}^2$ <sup>[33]</sup>。同年, 普渡大学的Kwak等人基于珍珠材料实现光谱测量, 光谱范围450–700 nm, 分辨率为7.4 nm<sup>[34]</sup>。

### 2.1.3 集成光子滤波器件

近红外光谱是天文光谱探测及研究的重要组

成部分。然而, 海拔约90 km的大气层中氢和臭氧结合而被激发的羟基发射谱对地面近红外光谱探测影响极大: 该发射谱覆盖范围广(0.9–1.8  $\mu\text{m}$ , 数量多至上百条)、亮度高(通常达到星光亮度的近千倍)、谱线分布不均且线宽仅有皮米量级(极难一一滤除), 这使得近红外波段的地基观测变得异常困难<sup>[72]</sup>。天文界一直在寻求滤除羟基发射线的高效率、高选择性方法及器件<sup>[73]</sup>, 如超窄带滤波、条纹光栅和掩膜、全息滤光片等。近些年, 也有不少关于集成光子器件在这方面的应用研究, 主要涉及布拉格光栅及微环腔等。

#### (1) 布拉格光栅

布拉格光栅的工作原理如图8 (a)所示<sup>[74]</sup>, 主要利用多光束干涉过程将特定波长光反射滤除, 从而实现窄线宽滤波。布拉格光栅在天文观测中的应用研究已有20 yr。2004年, Bland-Hawthorn等人首先提出利用光纤布拉格光栅来滤除羟基发射线, 并进行了实验验证<sup>[75]</sup>。GNOSIS正是专门利用这一技术而制作的天文光子仪器, 并在带有IRIS2 (工作在红外波段的多目标光谱仪和相机)摄谱仪的AAT (Anglo-Australian Telescope)上进行了验证观测, 观测结果如图8 (b)所示<sup>[76]</sup>。PRAXIS作为新一代具有羟基发射线抑制功能的光谱仪, 可以同时抑制掉100多条发射线, 总效率为18%<sup>[77]</sup>。随后, 研究人员对现有的PRAXIS进行了优化, 2020年, 在1.47–1.7  $\mu\text{m}$ 波段实现了高分辨率滤波, 波长精度为0.18 nm<sup>[78]</sup>。实际上, 就布拉格光栅本身而言, 其可具有更好的性能, 2011年, Bland-Hawthorn等人在单模光纤中刻蚀的布拉格光栅可以在1–1.8  $\mu\text{m}$ 范围内抑制400多条羟基发射线, 线宽为150 pm, 抑制比达到40 dB<sup>[79]</sup>, 有极大潜力用于天文实测。除了基于光纤的布拉格光栅外, 波导中也可以刻蚀布拉格光栅。2018年, Xie等人在SiN波导中证明了布拉格光栅用于抑制羟基发射线的可行性, 在5个通道中实现了> 40 dB的抑制比, 线宽为1.2 nm<sup>[74]</sup>。

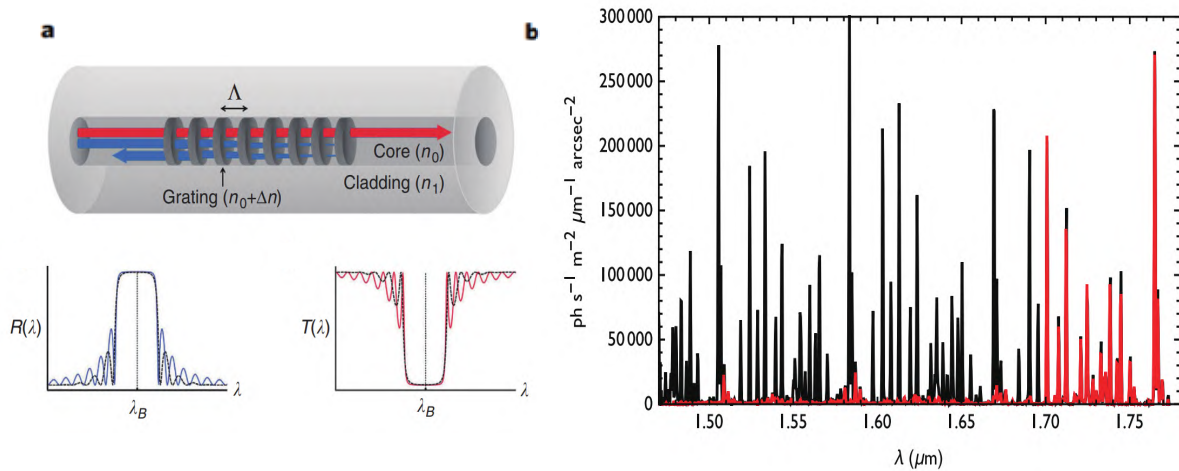


图 8 布拉格光栅工作原理及其代表GNOSIS的天文观测结果. (a)布拉格光栅工作原理, 入射信号光(红色箭头线)被光栅的各结构依次反射, 形成多束反射光(蓝色箭头线)并进行相干叠加, 在某一波长实现相干增强从而从信号光的相反方向反射滤除<sup>[74]</sup>. (b) GNOSIS天文观测结果, 可以看到大量羟基发射线被滤除(黑色和红色谱线分别代表滤除前后的实测光谱)<sup>[76]</sup>.

Fig. 8 The working principle of Bragg gratings and the results of astronomical experiments that represent GNOSIS: (a) The working principle of the Bragg grating is that the incident signal light (red arrow line) is successively reflected by each structure of the grating to form multiple beams of reflected light (blue arrow line) and coherently superimposed. The coherent enhancement is realized at a certain wavelength to filter the reflection from the opposite direction of the signal light<sup>[74]</sup>. (b) According to the observation results of GNOSIS astronomical experiment, a large number of hydroxyl emission lines can be filtered (the black and red spectral lines represent the measured spectra before and after filtering respectively)<sup>[76]</sup>.

## (2) 环形谐振器

由微环腔构成的环形谐振器也具有滤波效果, 其谐振波长与微环腔半径相关. 因此, 通过级联多个不同半径的微环腔, 可以滤除多根谱线. 环形谐振滤波器有许多优点, 如紧凑的尺寸, 可集成化度高, 可调谐滤波波长等, 但也有其自身的局限性, 如工作波段较窄, 仅有10–20 nm<sup>[80–81]</sup>. 在最近的报道中, Ellis等人通过并联两个微环增大了FSR (Free Spectral Range), 实现FSR > 30 nm, 自耦合系数 > 0.9, Q值(描述光学谐振腔质量的品质因数, Q值越高则谐振腔质量越高)为4000, 抑制比约为10 dB<sup>[82]</sup>.

### 2.1.4 波长定标—光子光梳

高分辨率光谱探测一般都需要高精度波长定标. 1973年, Griffin<sup>[83]</sup>利用地球大气吸收线作为定标基准对天文光谱进行高精度波长定标, 而后定标技术及定标源技术一直在不断发展. 1979年Campbell等人提出使用氟化氢(HF)吸收盒作为定标基准, 并在加法夏望远镜折轴光谱仪进行恒星视向

速度测量, 视向速度精度达到 $13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>[84]</sup>. 1987年, Butler等人使用碘吸收盒对天文光谱进行波长定标<sup>[85]</sup>. 1995年, Mayor等人则利用钍氩空心阴极灯作为定标源进行视向速度测量, 发现了第一颗太阳系外行星, 并且避免了元素吸收盒对天体光谱的污染<sup>[86]</sup>. 2003年, 由Mayor主导研制的HARPS (High Accuracy Radial velocity Planet Searcher)光谱仪首次应用同步定标技术, 消除曝光期间的仪器误差, 将视向速度测量精度提高到 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>[87]</sup>. 但是, 元素特征谱线具有强度不一、间隔不均匀及特征线数量不足等问题, 限制了波长定标精度的进一步提高. 2007年, 第一台天文光梳安装到HARPS光谱仪上, 其能提供频率间隔均匀且可控、强度均匀、数量均匀覆盖整个光谱范围的特征谱线, 可将波长定标精度推进到 $\sim \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 量级. 下一代类地行星探测仪器ESPRESSO (Echelle SPectrograph for Rocky Exoplanets and Stable Spectroscopic Observations)于2018年装备在欧洲南方天文台8.2 m甚大望远镜(Very Large Telescope, VLT)

上,也配备有天文光梳同步定标模块.但作为当前最高精度波长定标源,天文光梳结构复杂、庞大,制造及运维成本均较高,且对工作环境具有较高要求,由环境变化及器件损坏引起的故障率也较高,不利于在天文观测中的广泛应用.

鉴于天文光梳面临的问题,近年来,基于光波导芯片的小型化集成光子光梳得到广泛研究.2010年,Levy等人基于氮化硅微腔的光参量振荡器,在1450 nm到1750 nm的光谱范围内产生87个标准频率,覆盖了K、O、H、J天文波段<sup>[88]</sup>.此后,宽带光子光梳<sup>[89]</sup>、小自由光谱范围(低于100 GHz)光子光梳<sup>[90]</sup>、350 nm带宽的超连续谱光梳<sup>[91]</sup>等工作被陆续报道.2015年1月的《Science》杂志出版了有关氮化硅微环谐振结构的切伦科夫辐射光孤子产生光频率梳的报道<sup>[92]</sup>.2019年,装载在10 m级望

远镜Hobby-Eberly上的集成光子光梳实现了精度为 $10 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的测量<sup>[93]</sup>.2019年,Suh等人设计并研制了一种基于微环腔的光子光梳(图9所示),其谱线间隔约20 GHz,且具有低噪声和短脉冲的优点;在Keck II望远镜高分辨近红外光谱仪NIRSPEC(Near-InfraRed SPECtrograph)上进行了试观测,获得了优于 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的定标精度<sup>[94]</sup>.但是,微腔光梳能够覆盖的光谱范围通常小于100 nm,为解决这一问题,2021年,Cheng等人基于光参量振荡器研制的集成光子光梳谱线可覆盖J波段和H波段<sup>[95]</sup>.

由上可见,集成光子光梳近10 yr有较大进展,已经在10 m级望远镜有试观测结果,有望在5–10 yr内在天文观测中得到实用.目前世界最主要的光梳提供商Menlo System公司也在积极布局光子光梳研究.

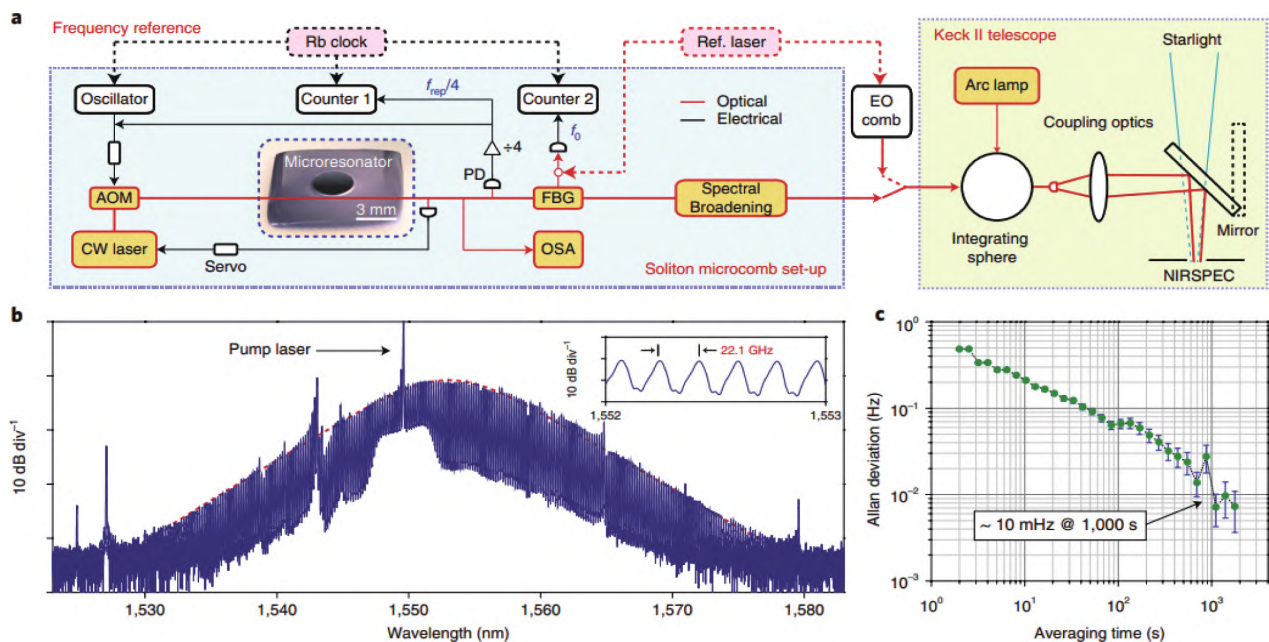


图9 微环光子光梳在Keck II望远镜高分辨近红外光谱仪NIRSPEC上试观测光路及主要试观测数据。(a)微环光子光梳及其在NIRSPEC上试观测光路示意图;(b)微环光子光梳光谱,放大区域显示谱线间距为22.1 GHz;(c)1000 s时,微环光子光梳频率稳定性为10 mHz<sup>[94]</sup>.

Fig. 9 The optical path and main test data of the microring photonic optical comb were tested on the Keck II telescope's high-resolution near-infrared spectrometer NIRSPEC. (a) Schematic diagram of the microring photonic comb and its test optical path on NIRSPEC; (b) the spectrum of the micro-ring photonic comb, the enlarged area shows that the spectral line spacing is 22.1 GHz; (c) at 1000 s, the frequency stability of microring photonic comb is 10 mHz<sup>[94]</sup>.

## 2.2 集成光子技术在天文成像中的应用

天文望远成像自古以来就是天文观测最重要手段之一,在很长时间内甚至是唯一手段.对于望远成像而言,角分辨率或者空间分辨率是最重要的参数指标.天文技术研究人員陆续解决像差、大镜面技术及工程、镜面拼接及主动光学、大气湍流的自适应光学校正、光干涉等关键技术及问题,不断提升天文成像分辨率.本节主要介绍集成光子技术及器件在高分辨天文成像中的应用情况,主要涉及光干涉核心器件集成光合束器以及自适应光学中的关键技术—波前探测.

### 2.2.1 干涉/合束

#### (1)长基线光干涉

长基线光干涉通过测量来自两个或多个独立望远镜的光干涉信号,重构出分辨率远超出单望远镜口径所决定的衍射极限分辨率的图像.长基线光干涉的角分辨率由干涉阵列中最长的基线决定,因此,其原则上可以获得非常高的角分辨率,是目前宇宙天体精细结构成像的最佳解决方案之一.

在长基线光干涉过程中,如何将来自多个望远镜的信号光合束并获得想要的各种干涉信号是最关键问题之一.长基线干涉阵中望远镜数量一般较多,对应需要的干涉信号种类也会较多,同时,干涉信号也极易受温度漂移、振动等环境因素影响.因此,光合束器应当同时兼顾结构紧凑、稳定性好及相位易操控等多个因素,这对基于常规光学元器件的解决方案带来极大挑战.在这里略举一例说明基于常规光学元器件的合束器在应对多望远镜光干涉时面临的问题:如光干涉阵列中望远镜数目为10个,要获得两两相干信号,至少需要 $C_{10}^2 = 45$ 个合束器,每个合束器需要至少5个光学元件(包含分束和合束镜、反射镜等),则至少需要225个独立的光学元器件,如再加上ABCD法(每个光束组合器设计为具有4个输入和24个输出,允许6个干涉式成对组合)需要的4种相位信息,则要么需要将光学元器件数目增加到至少900个(这将会组成一个十分庞大的光学系统,极难进行环境控制),要么就需要用到相位扫描机构,对精度、稳定性提出了较高要求,而且扫描需要花费额外时间.可以看出,常规光学合束器已无法满足多望远镜光干涉要求.为解决此

问题,基于集成光子学的干涉/合束技术得到了深入研究.

1997年,FLUOR (Fiber Linked Unit for Optical Recombination)/IOTA (Infrared and Optical Telescope Array)使用光纤交叉耦合器(使用氟化物光纤)成功获得干涉测量结果,光效率> 80%,精度1%<sup>[96]</sup>.90年代后期,基于二氧化硅工艺的用于两台望远镜H波段的集成光子合束器研制成功<sup>[97]</sup>,并在IOTA干涉仪上进行了天文试观测<sup>[98]</sup>,这种合束器的面积只有几分之一平方厘米,却提供了出色的条纹可见度和效率,在波长1.54  $\mu\text{m}$ 的激光光源下获得了高于93%的稳定对比度,在天文H波段白光下,对比度为78%,效率最高能达43%.

鉴于集成光子合束器在光干涉天文观测中展现出的巨大潜力,人们进一步考虑扩大集成组件规模,以便于组合更多的望远镜<sup>[99]</sup>.2003年,应用于3台望远镜的集成光合束器在IOTA设备上进行实验<sup>[100]</sup>,该合束器采用闭合相位测量,能够实现最基本的干涉成像.2009年,基于4台望远镜,工作在H波段的集成光子合束器在实验室得到验证<sup>[101]</sup>,该合束器随后用于VLTI (Very Large Telescope Interferometer)的干涉仪器PIONIER (Precision Integrated-Optics Near-infrared Imaging Experiment)进行天文观测,成功测得了近距离双星和原行星盘的高质量干涉图像<sup>[102]</sup>.此外,VLTI工作在K波段的长基线光干涉仪GRAVITY配备的集成光子合束器能够将VLT的4个8 m级望远镜采集到的光信号组合在一起,实现了对星等为17的暗弱天体的相干探测<sup>[103]</sup>,也对银河系中心超大质量黑洞(Sgr A\*)附近的恒星运动进行了超高分辨成像观测<sup>[104]</sup>,如图10所示.还在K波段凭借高达毫角秒的分辨率,观测确认了恒星HD163296的内盘形态<sup>[105]</sup>.近年来,实现更多望远镜的干涉成像一直是集成光子合束器发展的重点.2021年,Cvetojevic等人提出了同时具有8个输入通道、28种基线长度及120个干涉信号输出的集成光子合束器,在实验室条件下,闭合相位稳定性降至0.9°,总效率为26%<sup>[106]</sup>.

上面所介绍的工作均为平面波导合束器,当参与干涉的望远镜数目增多到一定程度,难以避免波导间的交叉,这将为干涉测量引入串扰,从而



影响干涉信号的对比度. 为解决这一问题, 三维集成的合束器成为必要, 离散合束器(Discrete Beam Combiner, DBC)应运而生, 如图11所示<sup>[107]</sup>. 2010年, Beličev等人首次提出并仿真计算了离散合束器, 该方案中, 波导同通过三维排布来进行光能量耦合<sup>[108]</sup>, 能够显著简化后续传感器的设置<sup>[109]</sup>. 近年来, 随着飞秒激光直写技术的发展, 波导排布可不再局限在一个平面上, 三维集成光子合束器加工成为可能. 2018年, Pedretti等人通过激光直写实现J波段六孔径DBC的制备<sup>[110]</sup>. 2021年, 德国Nayak等人首次将DBC用在天文观测中, 他们基于4.2 m的威廉赫歇尔望远镜在H波段对牛郎星和织女星进行了试观测, 但受限于信噪比, 得到的结果与预期有一定差距<sup>[111]</sup>.

## (2) 消零干涉仪

消零干涉仪(Nulling Interferometer)是天文高对比度成像的一种重要实现手段, 是在众多望远镜上已有的常规观测仪器. Keck干涉仪<sup>[107]</sup>和大型双目望远镜干涉仪(Large Binocular Telescope Interferometer, LBTI<sup>[112]</sup>)均通过常规光学装置实现了消零干涉. 其中, LBTI的测试结果表明其对比度能达到 $10^{-4}$ <sup>[113]</sup>, 而Keck干涉仪也完成大约50颗恒星的外黄道尘埃水平的测试<sup>[107]</sup>.

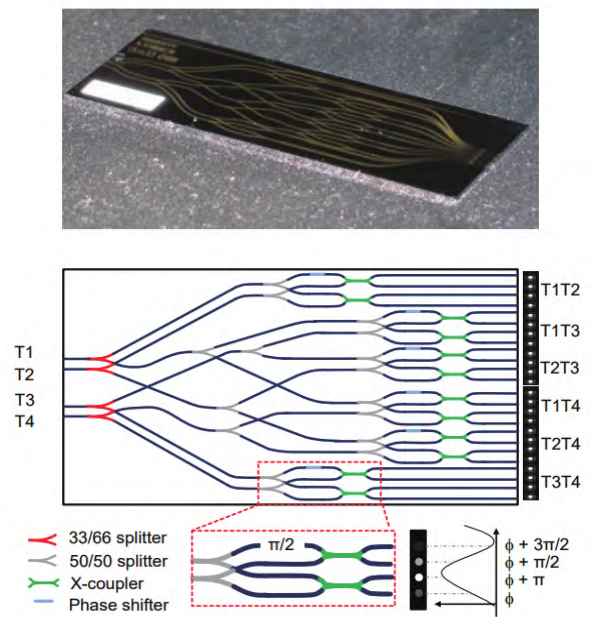


图 10 GRAVITY上基于波导阵列的集成光子合束器<sup>[103]</sup>. 将4台望远镜所采集信号光两两组合, 并结合不同相位差, 同时获得24种相干信息输出.

Fig. 10 Integrated photonic beam combiner based on waveguide array on GRAVITY<sup>[103]</sup>. Combine the signal light collected by the four telescopes in pairs and combine different phase differences to obtain 24 kinds of coherent information output at the same time.

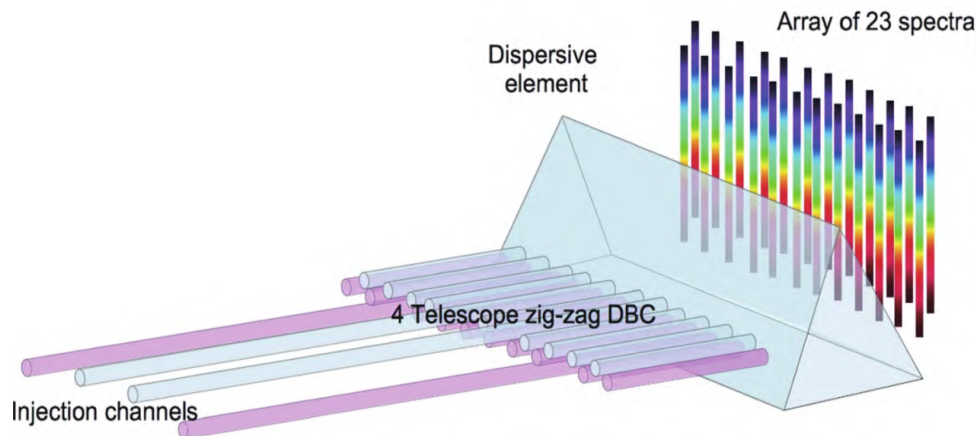


图 11 离散合束器示意图<sup>[107]</sup>. 4台望远镜收集到的光分别注入4根输入波导, 并连接到23根锯齿状分布的波导中进行倏逝波耦合并发生干涉, 上下层以不同的颜色显示方便区别.

Fig. 11 Schematic diagram of the discrete beam combiner<sup>[107]</sup>. The light collected by the four telescopes are injected into the four input waveguides respectively, and is connected to 23 zig-zag waveguides for evanescent wave coupling and interference. The upper and lower layers are displayed in different colors for easy distinction.

近年来, 得益于系外行星直接成像探测的关注度持续提高, 消零干涉技术作为一种能够对行星直接成像的技术受到广泛关注, 并取得重要进展<sup>[114]</sup>. 在此情况下, 用于消零干涉仪的集成光子合束器(如图12所示<sup>[115]</sup>)也得到广泛关注. 2015年, Errmann等人设计并制造的基于集成光子器件的合束器在4台望远镜消零干涉试验中获得原理验证, 消零深度达到 $10^{-3}$ <sup>[116]</sup>, 2017年, 基于硫化物玻璃的 $2 \times 2$ 多模干涉耦合器在实验上也获得成功<sup>[117]</sup>, 该实验旨在实现L波段的深度宽带调零, 消零深度约为50 dB<sup>[118]</sup>. 从理论上讲, 上述研究结果可为系外行星直接成像提供高性能光束合束器. 2014年, 通过飞秒激光直写<sup>[119]</sup>成功制造了集成光子合束器, 随后, 2020年, 该器件应用在Subaru望远镜上的消零干涉仪GLINT (Guided-Light Interferometric Nulling Technology)中<sup>[120]</sup>, 据实验测试, GLINT在H波段实现了 $10^{-4}$ 的消零深度, 并能以毫秒精度确定恒星的角直径. 在消零干涉仪中, 入射光的快速相位波动通常会导致耦合区域中干涉和色度的不稳定, 从而影响深宽带应用. 为解决这一问题, 2021年, Martinod等人提出以超快激光制备集成光子耦合器, 数值模拟表明, 该类耦合器能将GLINT的消零深度再提高45倍, 达到 $10^{-5}$ , 这一性能水平已经可以满足系外行星直接成像探测<sup>[121]</sup>.

### 2.2.2 波前探测技术

波前测量在光学检测, 图像重建和自适应光学领域有着广泛应用. Shack-Hartmann传感器是目前应用最广的波前传感器, 其能够利用单帧图像测量并重建波前, 速度快且不受环境振动等噪声影响. 但同时, 它也存在一些问题, 例如, 重建波前的空间分辨率不能小于 $100 \mu\text{m}$  ( $100\text{--}200 \mu\text{m}$ ), 波前倾斜角度不大于 $15^\circ$ 等. 近年来, 随着天文光子学的发展, 基于新测量原理的低成本、高集成度的光纤及集成光子器件的波前传感器受到广泛关注.

2015年, Valente等人提出一种基于光子晶体光纤的新型波前传感器, 其基于空间模式(波前)与光波导模式之间的对应耦合关系实现了波前信息的

直接探测. 这种测量方法将重建波前的空间分辨率提高到 $12.7 \mu\text{m}$  (约2–3个像素大小). 同时, 具备较大的动态观测范围, 能够实现 $0^\circ\text{--}16^\circ$ 的波前倾斜测量, 其中 $2.5^\circ\text{--}5.5^\circ$ 的区间为线性响应<sup>[122]</sup>.

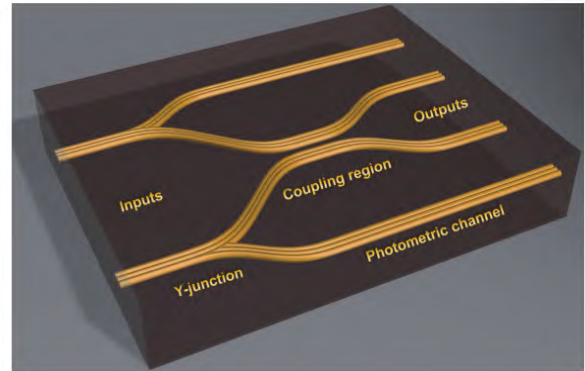


图 12 用于消零干涉仪的集成光子合束器原理示意图. Y型分光器将信号光输入到监控通道和干涉测量通道, 中间的耦合区域实现不同入射角度下信号光的干涉相消和干涉相长<sup>[115]</sup>.

Fig. 12 Schematic diagram of the integrated photonic beam combiner for the null-eliminating interferometer. The Y-type beam splitter inputs the signal light into the monitoring channel and the interferometric measurement channel, and the coupling area in the middle realizes the interference cancellation and interference constructiveness of the signal light under different incident angles<sup>[115]</sup>.

2020年, Norris等<sup>[123]</sup>提出一种基于光子灯笼(光子灯笼原理可参考本文§2.3.1)和深度学习的波前传感器, 将光子灯笼放置在望远镜焦面上, 通过标定不同已知像差的输入光通过光子灯笼的输出光强分布, 结合深度学习实现光强分布与像差(波前)的关联, 从而实现未知输入光的振幅与波前信息的重建, 原理示意图如图13所示. 有别于对波前进行单元采样的方法, 基于深度学习的光子灯笼波前传感器能够直接反演出连续波前, 得到小于 $5.1 \times 10^{-3} \pi$ 均方根误差的波前重建精度, 并且动态观测范围可以达到 $-21.6^\circ$ 至 $+21.6^\circ$ . 这种传感器不仅能够同时实现入射波前相位与振幅的测量, 还能给望远镜终端仪器提供单模光输入.

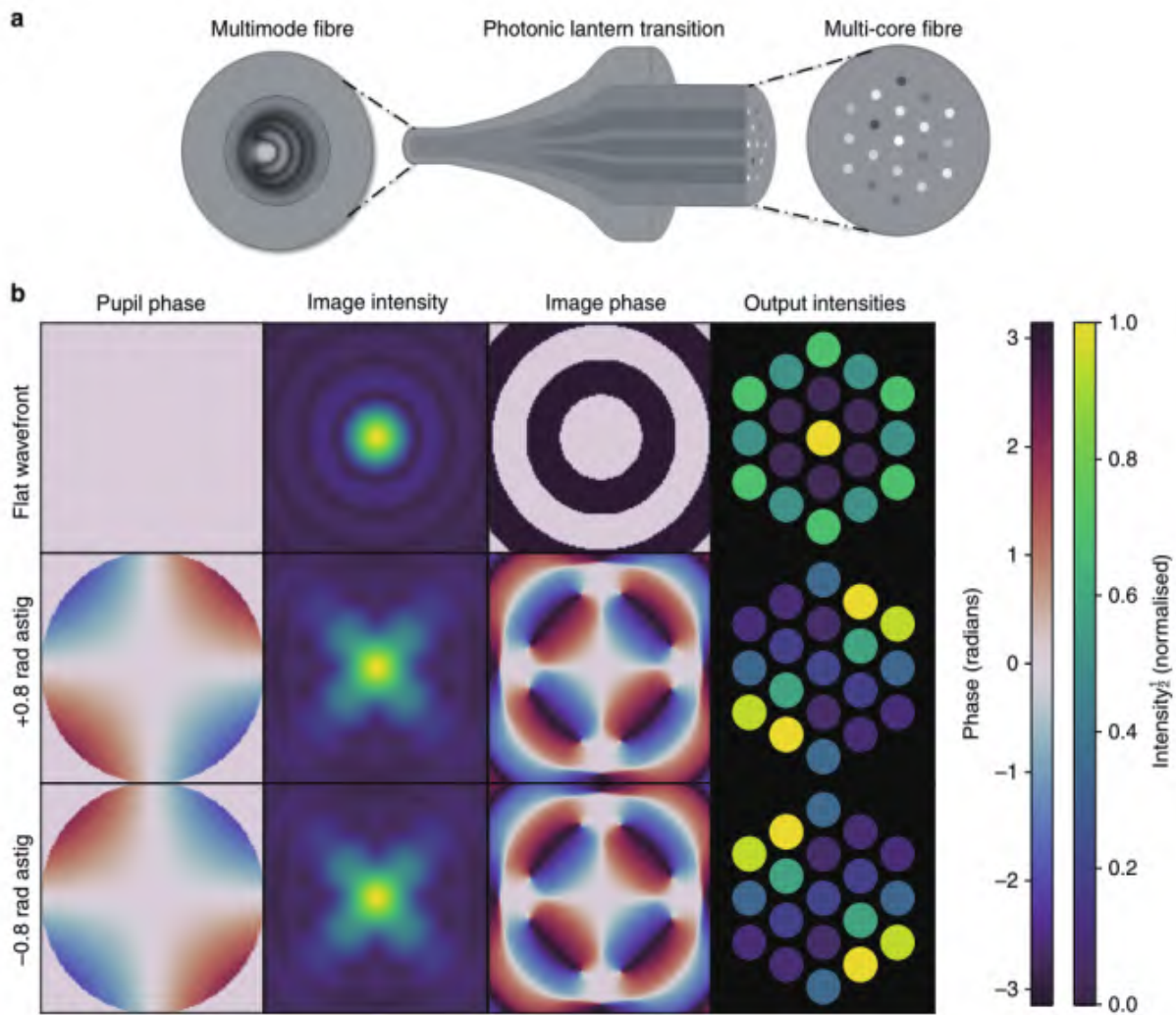


图 13 光子灯笼实现波前传感的过程. 图(a)给出了光子灯笼结构示意图, 其输入端为多模光纤, 输出端为单模光纤束或多芯光纤. 图(b)给出具有不同像差(波前)的输入光束的相位分布、像面上的振幅、像面上的相位以及光子灯笼输出端的光强分布. 由图(b)可知, 不同像差下的输入光在光子灯笼输出端强度分布不同, 结合深度学习的方法能基于次强度分布反演出波前信息<sup>[123]</sup>.

Fig. 13 The photonic lantern realizes the process of wavefront sensing. Panel (a) is a schematic diagram of the structure of the photonic lantern, the input end is a multi-mode fiber, and the output end is a single-mode fiber bundle or a multi-core fiber. Panel (b) gives the phase distribution of the input beam with different aberrations (wavefronts), the amplitude on the image plane, the phase on the image plane and the light intensity distribution at the output of the photonic lantern. It can be seen from panel (b) that the intensity distribution of the input light under different aberrations is different at the output end of the photon lantern. Combined with the deep learning method, the wavefront information can be inverted based on the sub-intensity distribution<sup>[123]</sup>.

### 2.2.3 探测增强/频率转换

在红外探测器性能达到天文观测要求之前, 人们考虑过将红外光通过非线性频率转换到可见光波段进行探测的方案<sup>[124-125]</sup>. 近年来, 红外探测器

性能的长足进步使得相关研究逐渐趋少, 但红外探测器与可见波段探测器相比, 性能及造价仍有不小差距; 尤其是我国受自身半导体工业水平及外部禁运的影响, 无法获取高性能红外探测器. 因此, 基



于频率转换的红外探测研究仍然具有一定价值. 尤其是集成光子学的发展, 为这类研究提供了新的活力.

为推进频率转换技术在天文上的使用, 2008年 Brustlein等<sup>[126]</sup>研究了周期性极化铌酸锂晶体(Periodically Poled Lithium Niobate, PPLN)波导中未转换光的相干特性, 实验表明, 频率转换方案保留了光的相干特性, 而随后的三通道光纤干涉仪实验证实闭合相位也得以保留<sup>[127]</sup>. 2016年, 长基线干涉仪CHARA (Center for High Angular Resolution Astronomy)上也做了相应测试, 利用PPLN晶体将星等为 $-0.6$ 的星源所发出的H波段 $1.55\ \mu\text{m}$ 星光转化为 $631\ \text{nm}$ 的可见光, 并采集到干涉图样, 在 $400\ \text{s}$ 时间积分下, 图像信噪比达到 $60\ \text{dB}$ , 光谱平均分辨率为 $2600$ , 但整体量子效率只有 $6\%$ <sup>[128]</sup>. 这些工作进展为非线性频率转换在天文观测中的应用提供了可能, 例如, 将中远红外光转换成近红外光<sup>[129]</sup>. 2021年, Chen等人基于等离子体纳米微腔实现了将光从中红外波段( $9.3\ \mu\text{m}$ )转化到可见波段( $685\ \text{nm}$ ), 其中双波段的纳米微腔使每个分子的上转换效率提高了13个数量级, 具有天文应用的潜力<sup>[130]</sup>.

### 2.3 其他相关应用

除天文成像和天文光谱观测外, 集成光子器件也可天文观测提供一些辅助性功能, 如模式转换及光束重排等. 这些辅助性功能实际上也和成像及光谱应用密切相关.

#### 2.3.1 模式转换与光子灯笼

地基天文观测受大气湍流影响, 一般需要使用多模光纤集光才能将光效率维持在可接受水平. 但多模光纤集光会带来众多问题, 如焦比退化现象<sup>[131]</sup>, 高分辨光谱仪还不得不面对狭缝损光、光谱仪尺寸巨大及光束空间相干性的降低所导致的光干涉测量无法实现等问题. 这使得将多模传输光高效率转换到单模传输光的研究成为必要. 另一方面, 天文光子器件目前大多为单模传输, 其要在天文观测中得到广泛应用, 模式转换研究更具紧迫性.

2005年, Leon-Saval等人首次提出光子灯笼

(Photonic Lantern, PL)这一概念<sup>[132]</sup>, 这为模式转换提供了可能. PL具体结构可参考图14所示, 可以看出, 其输入端一般为多模光纤, 能实现复杂波前光束(多模光束)的高效率耦合及传输, 而中间基于光纤拉锥来实现的多模光纤(Multi-Mode Fiber, MMF)到单模光纤(Single-Mode Fiber, SMF)的渐变转化结构能高效率地将多模光耦合到多根单模光纤中, 从而在端面实现单模光束输出.

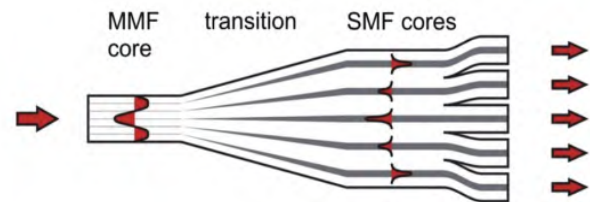


图 14 光子灯笼结构示意图<sup>[132]</sup>. 将多模光输入光子灯笼, 经过逐渐变窄的传输区域, 转化为单模在每个端口输出.

Fig. 14 Schematic diagram of the photon lantern structure<sup>[132]</sup>. The multi-mode light is input into the photonic lantern, and through the gradually narrowed transmission area, it is converted into single-mode output at each port.

鉴于光子灯笼在天文应用中的潜力, 众多团队开展了相关研究. 这里介绍近 $2\ \text{yr}$ 的进展. 2021年, Moraitis等人提出一种新型光子灯笼, 并进行了实验室验证, 在宽带转换时效率还能达到 $91\%$ <sup>[133]</sup>. 同年, Diab等人模拟了一种模式选择光子灯笼, 在 $1 \times 6$ 的6根波导中, 两根模式匹配的输出波导携带了 $95\%$ 的耦合光<sup>[134]</sup>. 在波导排布方面, 2021年, Davenport等人证明了拓扑最优圆堆积排列能获得最佳性能的PL, 对于具有17和39根的SMF的PL, 堆积密度能达 $95\%$ 和 $99\%$ <sup>[135]</sup>.

受大气湍流影响, 地基天文观测装置的光信号传输光纤中一般具有几百甚至上千个模式, 为应对此现实情况, PL在模式转换数目方面还有较大提升空间. 基于光波导的PL在结构排布及紧凑性方面较光纤优势明显, 后续应获得更多关注. 另一方面, 自适应光学系统的使用(即便性能受限, 无法达到衍射极限成像)将大大降低传输光纤中的模式数目, 从而使得模式转化数目在100以内的PL也将天文观测中具有实用价值.



### 2.3.2 光束重排

为方便探测, 光束的重新排布在某些天文观测中不可或缺, 如光干涉、积分视场光谱、光谱仪狭缝处的光瞳重排<sup>[106, 136-137]</sup>等过程基本都涉及到光束的重新排布. 集成光子学在这方面也有一些相应研究.

2010年, 由前澳大利亚天文台团队领导的Dragonfly项目<sup>[138]</sup>提出并实现了光束重排装置的小型化(如图15所示). 这种用于重新成像的望远镜光瞳分割的光束重排装置可以直接写入波导, 并实现将光束重新映射为一系列非冗余基线, 这些基线可以组合产生不同相干信号. Dragonfly不再如常规仪器一样使用光纤来重新映射阵列中子孔径, 而是在石英玻璃衬底上利用激光直接写入波导来制造紧凑的2D-1D光瞳映射器<sup>[139]</sup>. 除了能减小器件规模外, 集成光子器件也使得仪器传递函数更稳定. 这类集成仪器能够在J波段和H波段运行, 并在AAO (Australian Astronomical Observatory)的4 m望远镜上进行了测试<sup>[140]</sup>: 该光束重排芯片尺寸为30 mm × 20 mm × 1.1 mm, 在实验室条件下, 7根干涉基线精度在2.2%以内; 在试观测实验中, 受大气湍流影响较大, 无AO (Adaptive Optics)时, 其弗莱德参数比理论值小2.5倍, 与极端AO配合使用时有望能实现天文实测.

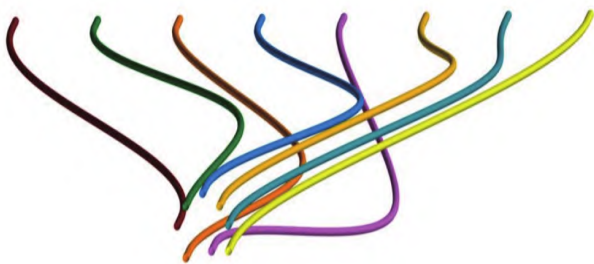


图 15 八通道光瞳重排示意图<sup>[139]</sup>. 前端为输入端, 后端为输出端, 实现2D-1D的重新排布.

Fig. 15 Schematic diagram of eight-channel pupil remapper<sup>[139]</sup>. The front end is the input and the back end is the output, enabling a 2D-1D rearrangement.

此外, 光束重排器在成像方面还有一些其他应用, 2021年, Sarah等人提出将光束重排与计算相位矫正法相结合, 不仅能减小仪器尺寸, 还能有效减

小相关度, 增加分辨率<sup>[141]</sup>.

## 3 天文光子学的挑战与展望

上面已回顾天文光子学近年来的主要研究情况. 可以看出, 集成光子技术及器件在天文光谱及望远镜成像观测中均有相关研究, 部分已经得到实际应用(如§2.2.1所介绍的光合束器). 其集成度高、体积小、能耗低、造价低、易操控等优势使得天文光子器件及仪器相对传统天文光学仪器更适合未来天文观测的需求. 但是, 就目前而言, 作为一个新兴学科, 天文光子学还面临着一些挑战.

### 3.1 天文光子学面临的主要挑战

首先, 天文观测对仪器的极端参数需求使现有集成光子技术面临挑战. 由于天文观测手段有限, 因此, 对每种可能的手段都利用到了极致. 如天文光谱观测需要高光谱分辨率(夜天文通常需达到 $5 \times 10^4 - 10 \times 10^4$ , 而太阳观测可能需要 $50 \times 10^4 - 100 \times 10^4$ 的分辨率)及高光谱对比度(至少大于30 dB), 有时也需要极多目标同时观测(如大规模光谱巡天及积分视场光谱观测); 而天文成像观测中基于消零干涉仪的高对比度成像一般也至少需要30 dB的成像对比度. 部分应用, 如类太阳恒星周边的类地系外行星高对比度直接成像甚至需要70 dB以上的成像对比度. 这些极致需求对现有的集成光子器件设计及加工均带来极大挑战. 如AWG芯片对于光通信领域的波分复用功能而言, 只需要5000以内光谱分辨率及20 dB以内的光谱对比度, 而实际加工出来的器件也通常为这种水平. 但是, 这种参数水平远远无法满足天文观测的实际需求. 而另一方面, 用集成光子器件来实现类似于FASOT (Fiber Array Solar Optical Telescope)<sup>[142]</sup>这种具备积分视场功能的光谱观测装置, 几千个目标同时采集光谱在设计及加工方面还具有不小的挑战, 暂时还未有研究去评估实现的可行性及后续的方案、设计制造周期及造价. 就高对比度应用(包括光谱及成像)而言, 波导中的模式失配以及缺陷和粗糙表面散射引入的杂散光影响巨大, 这就要求针对天文应用的集成光子器件的设计及加工相对于其他应用领域有更高要求, 需要做

到更极致。

其次, 现有集成光子器件大多为单模器件, 这不适合目前地面天文观测, 无法有效规避大气湍流影响而不得不使用多模器件的现实情况, 带来的直接问题是单模天文光子器件光效率较低, 这个问题对于大望远镜孔径和短波长观测尤其严重。面对此问题, 光子灯笼能提供部分解决方案, 如现有研究结果显示已能实现几十个模式的高效转换, 但面对目前天文观测通常使用100  $\mu\text{m}$ 光纤传光而引入的上千个模式的情况, 光子灯笼目前还有些乏力。性能优异的自适应光学系统也能解决部分问题, 如在红外波段能获得近衍射极限成像, 基本解决单模光子器件光耦合问题, 但对于自适应光学系统工作状况不佳的波段, 如可见光波段, 将不得不面临光耦合效率低的问题。为了拓宽集成光子器件在天文应用范围, 基于多模光子器件来发展天文观测仪器可能将是不得不面临的问题。

再者, 现有集成光子器件大多光谱覆盖范围相对较窄(100 nm以内), 无法满足一些天文观测动辄需要几百纳米光谱覆盖范围的实际情况。这与器件本身的光谱响应相关(如, 波导单模传输条件与波长直接相关), 天文以外领域对这方面的需求较低(如光通信领域一般只关注1550 nm附近将近100 nm的光谱范围)也会导致人们并无动力去提高这一参数。如何去设计、加工宽光谱器件是天文光子学研究需要面临的问题与挑战。

上面所述只是天文光子学现有研究阶段所显现的问题和挑战, 随着研究深入, 将会有更多挑战需要天文领域来解决, 部分可以依靠集成光子学本身的发展来解决, 但还有很多问题需要天文领域自身来解决, 尤其是那些其他领域并不涉及的问题。天文领域对观测仪器的极端参数需求使得后面这一类挑战将占据更重要位置。

### 3.2 天文光子学发展趋势

自天文光子学作为一门学科被提出及得到天文领域的广泛认同以来, 其发展才不过经历10 yr, 还处于发展的最初阶段。同时, 天文光子学作为一门交叉学科, 其问题来源于天文实测(更深层次应该是天文科学对天文观测的实际需求), 而其技术

手段来源于集成光子技术, 其发展必定受天文观测需求及集成光子技术发展双重驱动。在这一节中作者基于上述考虑, 对后续天文光子学的发展趋势作简要展望。

首先, 从天文观测需求而言, 如本文§2天文光子学发展现状所述, 光谱色散、滤波、波长定标源、波前探测、光分束/合束及干涉、模式转换等天文观测中的常用功能已能使用集成光子器件来实现, 但是, 除了少部分器件(如集成光分束合束器), 绝大多数器件的分辨率、精度、对比度等主要参数还并未达到相应的常规天文观测仪器水平及观测需求, 如光谱色散芯片目前色散能力还普遍停留在 $10^4$ 以内, 集成光子光梳目前光谱覆盖范围、谱线均匀性、谱线稳定性暂时还不如常规天文光梳。因此, 在未来较长时期内, 天文光子学研究还将聚焦单一功能天文光子器件研究, 可优化已有集成光子器件设计及制造水平来提高参数, 也可以提出新原理新器件来获取更高性能参数。可以预期的是, 未来10 yr内, 光谱芯片、定标源芯片将会继集成光分束合束器之后在天文实测中得到使用, 波前探测芯片等会在天文试观测中得到更进一步研究, 而更多还未实现的天文光子器件将得到研究及展示, 如基于集成光子技术的积分视场单元及波前矫正器件等。

其次, 从实现手段而言, 目前的天文光子器件几乎均基于光波导器件。光波导尺寸一般为微米量级, 其设计及制造成熟度高, 大部分情况下可直接借用产业常用的硅基工艺。而激光直写加工由于低成本及可实现三维结构排布也是重要制造手段, 但其加工精度一般不会优于1  $\mu\text{m}$ , 这阻碍了其在高精度结构加工中的应用。因此, 在激光直写加工精度提高到100 nm量级以前, 光刻工艺还将是主流。常规硅基光刻工艺大多面向光通信需求, 其工作波段一般在1.5  $\mu\text{m}$ 附近, 所以, 现有天文光子器件大部分也工作在这个波段。但是, 这并不能充分满足天文观测的需求, 而需求必然会对技术带来推动, 可以预期, 可见波段及更长波红外的天文光子技术及器件研究会在未来占据较重要位置。同时, 天文观测对仪器参数的极端需求会对光波导器件的设计及制造提出新要求, 这中间涉及的更高工艺水平器

件制造研究对天文光子学发展将起到至关重要作用,也将影响到其他研究领域.另一方面,光子晶体等纳米结构在集成度等方面展示出的优势,将使得未来基于纳米结构的天文光子技术及器件研究在天文光子学研究中占据一席之地.

最后,从观测仪器角度而言,在各类单功能天文光子器件研究成熟的基础上,仪器集成研究将占据较重要位置.在这里,作者将从多功能集成、三维集成、光机电集成3个方面来对仪器集成方面的发展趋势稍加展望.所谓多功能集成,即将更多观测功能集成在同一芯片内,尽量减少光的空间传输及可移动部件,将仪器的紧凑性、稳定性做到极致,真正充分利用集成光子学的优点.在这方面,可以预期,未来的天文终端仪器尺寸可能只需要 $1\text{ dm}^3$ 尺寸甚至 $\sim 100\text{ cm}^3$ 量级,这时,天文光子学才真正展现出它的威力.目前研究的天文光子器件一般为二维光子芯片(平面波导器件),这还无法满足积分视场光谱观测及大规模光谱巡天等有大规模集成需求的应用,未来基于三维架构来设计及制造复杂天文观测仪器无疑是天文光子学发展的必要部分.另一方面,对于天文观测仪器而言,一般涉及到光学、机械及电子学3部分.而光机电集成则是在集成光子学的基础上,结合Micro-Electro-Mechanical System (MEMS)技术实现光机电一体化集成,做到真正仪器小型化.建立在这“三个集成”基础上的未来的天文观测终端仪器将从根本上解决现有仪器大尺寸、高造价、难操控运维的问题,使得各种极端环境、极端参数下的天文观测都将成为可能.

天文光子学目前还处于发展的初级阶段,但是,作为下一代天文观测技术及仪器的基石,其未来的发展前景是可预见的.随着其研究的深入及集成光子学本身的不断发展,完全集成的天文观测仪器只是时间问题.在这里,以一句稍有偏颇但作者深信不疑的话作为本文的结束语:21世纪的光学在于集成光子学,而21世纪的天文光学技术在于天文光子学.

## 参考文献

- [1] Skidmore W, Mao S D. RAA, 2015, 15: 1674
- [2] Johns M W. SPIE, 2004, 5382: 85
- [3] Gilmozzi R, Spyromilio J. Msngr, 2007, 127: 11
- [4] Cui X Q, Zhao Y H, Chu Y Q, et al. RAA, 2012, 12: 1197
- [5] Doel P, Sholl M J, Liang M, et al. SPIE, 2014, 9147: 91476R
- [6] Chang J, Ambrosi G, An Q, et al. APh, 2017, 95: 6
- [7] Zhang S N, Li T P, Lu F J, et al. SCPMA, 2020, 63: 249502
- [8] Kole M, Li Z H, Produit N, et al. NIMPA, 2017, 872: 28
- [9] Sun Y, Deng D S, Yuan H B. RAA, 2021, 21: 92
- [10] Gan W Q, Deng Y Y, Li H, et al. SPIE, 2015, 9604: 96040T
- [11] Corcoran B, Tan M X, Xu X Y, et al. NatCo, 2020, 11: 2568
- [12] Zhong H S, Wang H, Deng Y H, et al. Science, 2020, 370: 1460
- [13] Song Q H, Baroni A, Sawant R, et al. NatCo, 2020, 11: 2651
- [14] Xu X Y, Tan M X, Corcoran B, et al. Nature, 2021, 589: 44
- [15] Hsu C P, Li B D, Solano-Rivas B, et al. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2021, 27: 8300416
- [16] Bland-Hawthorn J, Kern P. OExpr, 2009, 17: 1880
- [17] Bland-Hawthorn J, Leon-Saval S G. OExpr, 2017, 25: 15549
- [18] 王传晋, 王德隆. 紫金山天文台台刊, 1989, 8: 121
- [19] Hubbard E N, Angel J R P, Gresham M S. ApJ, 1979, 229: 1074
- [20] Wildey R L, Pohn H A. AJ, 1964, 69: 619
- [21] Beckers J M. ARA&A, 1993, 31: 13
- [22] Gatkin P, Veilleux S, Mather J, et al. Astro 2020 State of the Profession: Astrophotonics White Paper. Matthew Greenhouse, 2019
- [23] Grabarnik S, Wolffenbuttel R, Emadi A, et al. OExpr, 2007, 15: 3581
- [24] Gatkin P, Veilleux S, Hu Y W, et al. SPIE, 2016, 9912: 991271
- [25] Avrutsky I, Chaganti K, Salakhutdinov I, et al. ApOpt, 2006, 45: 7811
- [26] Kosaka H, Kawashima T, Tomita A, et al. PhRvB, 1998, 58: R10096
- [27] Diard T, de la Barrière F, Ferrec Y, et al. SPIE, 2016, 9836: 98362W
- [28] le Coarer E, Blaize S, Benech P, et al. NaPho, 2007, 1: 473

- [29] Martin B, Morand A, Benech P, et al. *OptL*, 2009, 34: 184
- [30] Florjańczyk M, Cheben P, Janz S, et al. *OExpr*, 2007, 15: 18176
- [31] Yang Z Y, Albrow-Owen T, Cui H X, et al. *Science*, 2019, 365: 1017
- [32] Wan N H, Meng F, Schröder T, et al. *NatCo*, 2015, 6: 7762
- [33] Yuan S F, Naveh D, Watanabe K, et al. *NaPho*, 2021, 15: 601
- [34] Kwak Y, Park S M, Ku Z, et al. *NanoL*, 2021, 21: 921
- [35] Smit M K. *ELL*, 1988, 24: 385
- [36] 马春生, 秦政坤, 张大明. 光波导器件设计与模拟. 北京: 高等教育出版社, 2012: 132-161
- [37] Stoll A, Zhang Z Y, Haynes R, et al. *Photonics*, 2017, 4: 30
- [38] Cvetojevic N, Lawrence J S, Ellis S C, et al. *OExpr*, 2009, 17: 18643
- [39] Cvetojevic N, Jovanovic N, Betters C, et al. *A&A*, 2012, 544: L1
- [40] Gatkine P, Veilleux S, Hu Y W, et al. *OExpr*, 2017, 25: 17918
- [41] Jovanovic N, Cvetojevic N, Norris B, et al. *OExpr*, 2017, 25: 17753
- [42] Dai D X, Fu X, Shi Y C, et al. *OptL*, 2010, 35: 2594
- [43] Dai D X, He S L. *OptL*, 2006, 31: 1988
- [44] Cheng Y Q, Sun H D, Wu Z, et al. *OptSp*, 117: 480
- [45] Lin D, Zhu Z Z, Zhu X M, et al. *SPIE*, 2021, 12069: 1206919
- [46] Melati D, Verly P G, Delàge A, et al. *Electronics*, 2019, 8: 687
- [47] Watson F G. *SPIE*, 1995, 2476: 68
- [48] Pathak S, Dumon P, Van Thourhout D, et al. *IEEE Photonics Journal*, 2014, 6: 4900109
- [49] Bland-Hawthorn J, Horton A. *SPIE*, 2006, 6269: 62690N
- [50] Xie S J, Meng Y, Bland-Hawthorn J, et al. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10: 4502207
- [51] Sander D, Müller J. *SeAc*, 2001, 88: 1
- [52] Calafiore G, Koshelev A, Dhuey S, et al. *Light: Science & Applications*, 2014, 3: e203
- [53] Faraji-Dana M, Arbabi E, Arbabi A, et al. *NatCo*, 2018, 9: 4196
- [54] Nezhadbaddeh S, Neumann A, Zarkesh-Ha P, et al. *OExpr*, 2020, 28: 24501
- [55] Lupu A, Cassan E, Laval S, et al. *OExpr*, 2004, 12: 5690
- [56] Gao B S, Shi Z M, Boyd R W. *OExpr*, 2015, 23: 6491
- [57] Ridgway S T, Brault J W. *ARA&A*, 1984, 22: 291
- [58] Herrero-Bermello A, Velasco A V, Podmore H, et al. *OptL*, 2017, 42: 2239
- [59] Akca B I. *OExpr*, 2017, 25: 1487
- [60] Kita D M, Miranda B, Favela D, et al. *NatCo*, 2018, 9: 4405
- [61] Bland-Hawthorn J, Kern P. *PhT*, 2012, 65: 31
- [62] Bonneville C, Thomas F, de Mengin Poirier M, et al. *SPIE*, 2013, 8616: 86160M
- [63] Ferrand J, Custillon G, Kochtcheev S, et al. *SPIE*, 2008, 7010: 701046
- [64] Nie X M, Ryckeboer E, Roelkens G, et al. *OExpr*, 2017, 25: A409
- [65] Pohl D, Escalé M R, Madi M, et al. *NaPho*, 2020, 14: 24
- [66] Blind N, Le Coarer E, Kern P, et al. *OExpr*, 2017, 25: 27341
- [67] le Coarer E, Venancio L G, Kern P. *SPIE*, 2017, 10565: 105651B
- [68] Zheng B J, Li L F, Wang J Z, et al. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8: 2000191
- [69] Chakrabarti M, Jakobsen M L, Hanson S G. *OptL*, 2015, 40: 3264
- [70] Hartmann W, Varytis P, Gehring H, et al. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8: 1901602
- [71] Liu T R, Fiore A. *Optica*, 2020, 7: 934
- [72] Piche F, Parry I R, Ennico K A, et al. *SPIE*, 1997, 2871: 1332
- [73] Blais-Ouellette S. *SPIE*, 2004, 5578: 23
- [74] Xie S J, Zhan J H, Hu Y W, et al. *OptL*, 2018, 43: 6045
- [75] Bland-Hawthorn J, Englund M, Edvell G. *OExpr*, 2004, 12: 5902
- [76] Trinh C Q, Ellis S C, Bland-Hawthorn J, et al. *AJ*, 2013, 145: 51
- [77] Ellis S C, Bauer S, Bland-Hawthorn J, et al. *SPIE*, 2016, 9908: 99084A
- [78] Ellis S C, Bland-Hawthorn J, Lawrence J S, et al. *MNRAS*, 2020, 492: 2796
- [79] Bland-Hawthorn J, Ellis S C, Leon-Saval S G, et al. *NatCo*, 2011, 2: 581
- [80] Robertson G, Ellis S, Yu Q S, et al. *ApOpt*, 2021, 60: D122
- [81] Liu P F, Czaplowski D A, Ellis S, et al. *ApOpt*, 2021, 60: 3865
- [82] Ellis S C, Kuhlmann S, Kuehn K, et al. *OExpr*, 2017, 25: 15868
- [83] Griffin R. *MNRAS*, 1973, 162: 243
- [84] Campbell B, Walker G A H. *PASP*, 1979, 91: 540
- [85] Butler R P, Cohen R D, Duncan D K, et al. *ApJ*, 1987, 319: L19
- [86] Mayor M, Queloz D. *Nature*, 1995, 378: 355
- [87] Mayor M, Pepe F, Queloz D, et al. *Msngr*, 2003, 114: 20
- [88] Levy J S, Gondarenko A, Foster M A, et al. *NaPho*, 2010, 4: 37



- [89] Johnson A R, Mayer A S, Klenner A, et al. *OptL*, 2015, 40: 5117
- [90] Johnson A R, Okawachi Y, Levy J S, et al. *OptL*, 2012, 37: 875
- [91] Halir R, Okawachi Y, Levy J S, et al. *OptL*, 2012, 37: 1685
- [92] Brasch V, Geiselmann M, Herr T, et al. *Science*, 2015, 351: 357
- [93] Metcalf A J, Anderson T, Bender C F, et al. *Optica*, 2019, 6: 233
- [94] Suh M G, Yi X, Lai Y H, et al. *NaPho*, 2019, 13: 25
- [95] Cheng Y S, Xiao D, McCracken R A, et al. *JOSAB*, 2021, 38: A15
- [96] Coudé du Foresto V, Perrin G, Mariotti J M, et al. The FLUOR/IOTA Fiber Stellar Interferometer//Kern P, Malbet F. *Integrated Optics for Astronomical Interferometry*. Grenoble: Bastianelli-Guirimand, 1997: 115-125
- [97] Berger J P, Rousselet-Perraut K, Kern P, et al. *A&AS*, 1999, 139: 173
- [98] Berger J P, Haguenaier P, Kern P, et al. *A&A*, 2001, 376: L31
- [99] Berger J P, Benech P, Schanen-Duport I, et al. *SPIE*, 2000, 4006: 986
- [100] Berger J P, Haguenaier P, Kern P Y, et al. *SPIE*, 2003, 4838: 1099
- [101] Benisty M, Berger J P, Jocou L, et al. *A&A*, 2009, 498: 601
- [102] Le Bouquin J B, Berger J P, Lazareff B, et al. *A&A*, 2011, 535: A67
- [103] Abuter R, Accardo M, Amorim A, et al. *A&A*, 2017, 602: A94
- [104] Eisenhauer F, Perrin G, Brandner W, et al. *Msngr*, 2011, 143: 16
- [105] Sanchez-Bermudez J, Caratti O, Garatti A, Garcia Lopez R, et al. *A&A*, 2021, 654: A97
- [106] Cvetojevic N, Norris B R M, Gross S, et al. *ApOpt*, 2021, 60: D33
- [107] Minardi S, Harris R J, Labadie L. *A&ARv*, 2021, 29: 6
- [108] Beličev P P, Ilić I, Stepčić M, et al. *OptL*, 2010, 35: 3099
- [109] Thomson R R, Kar A K, Allington-Smith J. *OExpr*, 2009, 17: 1963
- [110] Pedretti E, Piacentini S, Corrielli G, et al. *SPIE*, 2018, 10701: 1070116
- [111] Nayak A S, Labadie L, Sharma T K, et al. *ApOpt*, 2021, 60: D129
- [112] Millan-Gabet R, Serabyn E, Mennesson B, et al. *ApJ*, 2011, 734: 67
- [113] Defrére D, Hinz P M, Mennesson B, et al. *ApJ*, 2016, 824: 66
- [114] Weinberger A J, Bryden G, Kennedy G M, et al. *ApJS*, 2015, 216: 24
- [115] Gretzinger T, Gross S, Arriola A, et al. *OExpr*, 2019, 27: 8626
- [116] Errmann R, Minardi S, Labadie L, et al. *ApOpt*, 2015, 54: 7449
- [117] Goldsmith H D K, Cvetojevic N, Ireland M, et al. *OExpr*, 2017, 25: 3038
- [118] Goldsmith H D K, Ireland M, Ma P, et al. *OExpr*, 2017, 25: 16813
- [119] Norris B, Cvetojevic N, Gross S, et al. *OExpr*, 2014, 22: 18335
- [120] Norris B R M, Cvetojevic N, Lagadec T, et al. *MNRAS*, 2020, 491: 4180
- [121] Martinod M A, Tuthill P, Gross S, et al. *ApOpt*, 2021, 60: D100
- [122] Valente D, Rativa D, Vohnsen B. *OExpr*, 2015, 23: 13005
- [123] Norris B R M, Wei J, Betters C H, et al. *NatCo*, 2020, 11: 5335
- [124] Abbas M M, Kostiuik T, Ogilvie K W. *ApOpt*, 1976, 15: 961
- [125] Ceus D, Tonello A, Grossard L, et al. *OExpr*, 2011, 19: 8616
- [126] Brustlein S, Del Rio L, Tonello A, et al. *PhRvL*, 2008, 100: 153903
- [127] Lehmann L, Darré P, Boulogne H, et al. *MNRAS*, 2018, 477: 190
- [128] Darré P, Baudoin R, Gomes J T, et al. *PhRvL*, 2016, 117: 233902
- [129] Lehmann L, Darré P, Szemendera L, et al. *ExA*, 2018, 46: 447
- [130] Chen W, Roelli P, Hu H T, et al. *Science*, 2021, 374: 1264
- [131] Birks T A, Gris-Sánchez I, Yerolatsitis S, et al. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, 7: 107
- [132] Leon-Saval S G, Birks T A, Bland-Hawthorn J, et al. *OptL*, 2005, 30: 2545
- [133] Moraitis C D, Alvarado-Zacarias J C, Amezcua-Correa R, et al. *ApOpt*, 2021, 60: D93
- [134] Diab M, Tripathi A, Davenport J, et al. *ApOpt*, 2021, 60: D9
- [135] Davenport J J, Diab M, Madhav K, et al. *JOSAB*, 2021, 38: A7
- [136] Huby E, Perrin G, Marchis F, et al. *A&A*, 2012, 541: A55
- [137] Minardi S, Lacour S, Berger J P, et al. *SPIE*, 2016, 9907: 99071N
- [138] Tuthill P, Jovanovic N, Lacour S, et al. *SPIE*, 2010, 7734: 77341P
- [139] Charles N, Jovanovic N, Gross S, et al. *ApOpt*, 2012, 51: 6489
- [140] Jovanovic N, Tuthill P G, Norris B, et al. *MNRAS*, 2012, 427: 806
- [141] Krug S E, Rabb D J. *JOSAA*, 2021, 38: 1866
- [142] Qu Z Q. *Astronomical Society of the Pacific (ASP) Conference Series - Solar Polarization 6*, Ashton Ave: ASP, 2011, 437: 423

## Research Status and Application Prospects of Astrophotonics

TONG Xue<sup>1,2,3</sup> LIN Dong<sup>1,2,3</sup> HE Jin-ping<sup>1,2</sup>

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

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

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

**ABSTRACT** Astronomy is an observational discipline, and its improvement is driven by the progress of observation technology and instruments. The advancement of astronomy also constantly puts forward new requirements for observation instruments. Since the development of astronomy, the requirements for observing instruments have gradually become extreme, which brings great challenges in both cost and difficulty. In order to tackle the challenges, a future generation of astronomical optical technology and observation instruments based on new principles and technologies has become an inherent need to promote the advancement of astronomy. In recent years, the growth of integrated photonics has presented revolutionary opportunities for that of astronomical optical technology. On the basis, Astrophotonics, an emerging interdisciplinary subject, can provide a new generation of high-performance optical terminal instruments with low cost and high integration (chip-based) for astronomical observation. Such instruments will play a vital role in space astronomical observation, large-scale spectral survey, high-resolution and high-precision spectral imaging and other applications. This paper mainly introduces the main research contents and status quo of astronomical photonics starting from the instruments/device functions, and briefly discusses the major problems in its development and eventually forecasts its development prospect.

**Key words** astronomy, astronomical optics technology, astrophotonics, integrated photonics