

空间天文紫外偏振探测技术研究进展

单睿 董联庆 李康 张牧尧 郑国宪 张琢 杨立欣 邵俊杰

Advances in ultraviolet polarization detection for space astronomy

Shan Ruiyan, Dong Lianqing, Li Kang, Zhang Muyao, Zheng Guoxian, Zhang Zhuo, Yang Lixin, Shao Junjie

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20230547>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

汗潜指纹紫外偏振反射特性研究(特约)

Study on UV polarization reflection characteristics of sweat latent fingerprints(*Invited*)

红外与激光工程. 2020, 49(6): 20201011 <https://doi.org/10.3788/IRLA20201011>

基于超表面操控的偏振信息探测技术研究进展

Progress of polarization-information detection technology based on manipulations of metasurface

红外与激光工程. 2020, 49(9): 20201041 <https://doi.org/10.3788/IRLA20201041>

2π 空间全天空偏振观测系统研制与验证

Design and verification of 2π space all-sky polarization observation system

红外与激光工程. 2018, 47(4): 417002 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0417002>

$\Phi 450$ mm口径空间天文相机轻量化碳化硅主反射镜组件设计

Design of $\Phi 450$ mm light-weighted SiC mirror subsystem in space-based astronomy telescope

红外与激光工程. 2021, 50(2): 20200175 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200175>

偏振光谱仪偏振探测精度分析

Polarization detection accuracy analysis of spectropolarimeter

红外与激光工程. 2018, 47(1): 123002 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0123002>

偏振探测激光引信目标判别技术

Target-recognition of laser fuze based on polarization detection

红外与激光工程. 2018, 47(S1): 5 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.S106002>

空间天文紫外偏振探测技术研究进展

单睿奕, 董联庆, 李康, 张牧尧, 郑国宪, 张琢, 杨立欣, 邵俊杰

(北京空间机电研究所, 北京 100094)

摘要: 新型空间天文探测技术在科学进步和国家发展方面起着至关重要的作用。其高精度的观测提供了独特的机遇, 深化了人们对宇宙的理解, 同时推动了天体物理学和宇宙学的前沿研究。这些探测不仅为理论模型的验证与发展提供了不可或缺的数据, 还在基础物理学领域催生了新理论。在国家层面, 拥有先进的空间天文探测技术不仅凸显了国家在科研领域的实力, 同时为培养高水平的科研人才提供了重要平台, 有助于国家在全球科研舞台上赢得竞争优势。因此, 对新型空间天文探测技术的研究和发展显得十分紧迫。天文紫外偏振作为一种创新的空间天文探测手段, 相较于传统探测手段, 紫外偏振测量技术能够提供多维度的观测数据, 进而实现全方位的宇宙感知能力, 具备巨大地应用潜力。鉴于目前尚未有关于空间天文紫外偏振探测的系统性综述报告和文章, 因此, 文中从紫外偏振科学研究的角度出发, 总结已有的紫外偏振载荷, 挖掘这一领域技术发展的思路和途径, 最后对该技术未来发展方向进行展望与总结, 为我国在该领域的未来研究提供有益参考。

关键词: 紫外偏振; 空间偏振探测; 空间天文

中图分类号: TH751; P141.4

文献标志码: A

DOI: 10.3788/IRLA20230547

0 引言

天文学的发展向来是由观测驱动的, 理论的突破往往建立在新的观测基础之上。望远镜和探测器是天文学发展前进的动力和方向。现今, 天文载荷的发展, 一方面是将探测望远镜做得更大更灵敏, 使得科学家们获得更为精准完善的观测信息, 进而对现有理论进行论证和补充; 另一方面也要思考如何开辟新的探测领域, 使得科学家们可以从不一样的角度对宇宙进行观测, 以实现对现有理论进行完善, 加深人类对于宇宙中事物的理解与研究。

天文紫外偏振作为一种新型空间天文探测手段^[1], 起源于 1976 年前苏联的空间探索试验, 并在哈勃望远镜暗物质摄谱仪 (FOS) 和 ASTRO-1/ASTRO-2 上的威斯康辛紫外偏振仪器 (WUPPE) 上得到了进一步的发展, 并取得了较多的实验数据。尽管后续开展了多次空间探测试验, 获取了许多令人惊奇的发现, 但是受限于在轨载荷较少, 观测数据不足以实现大规模的理论研究突破。

目前, 紫外偏振探测领域正处于高速发展阶段, 在《2016-2030 年中国空间科学发展规划建议》^[2] 中, 我国科学家明确提出了下一步深空探测计划, 在这一规划中, 紫外偏振测量技术被明确指出对我国“太阳显微观测”(包括太阳活动起源、磁场分布等)、“木星系统探测”/“小行星探测”(牵涉大气组分分析、磁场等)、“黑洞探针”/“天体号脉”(包括天体活动、磁场演变等)等观测计划的实施具有重要助力。相对于传统的天文探测技术, 紫外偏振测量技术能够提供不同维度的观测数据, 从而实现全方位的宇宙感知能力。因此, 展开这类高能偏振探测技术的研究刻不容缓, 这对于人类社会解答宇宙起源等重大问题的研究至关重要。此外, 对我国在空间天文理论研究和空间偏振载荷研究等领域的发展也具有同等重要性。

鉴于目前尚未有关于空间天文紫外偏振探测的系统性综述报告和文章, 因此, 文中旨在从紫外偏振科学研究出发, 对已有的紫外偏振载荷进行总结, 挖掘这类偏振技术的发展思路和技术途径, 为我国在该

收稿日期: 2023-09-22; 修订日期: 2023-11-25

基金项目: 深空探测省部共建协同创新中心-2021 年度开放课题项目 (SKTC202101)

作者简介: 单睿奕, 男, 工程师, 博士, 主要从事光学遥感与深空探测方面的研究。

领域的下一步研究提供借鉴。

1 紫外天文偏振探测科学进展

天文偏振探测作为天文学的一个重要分支,旨在通过研究天体发出的光的偏振特性来揭示宇宙中的一些重要信息^[3]。相较于单一的强度探测,对辐射偏振状态的探测可获取到更丰富的天体物理学信息^[4-5],因此偏振测量学在现代天文学的发展中发挥了关键作用^[6]。

与传统天文偏振观测使用的可见光、红外波段相比,紫外偏振探测更注重宇宙中高温、高能过程,例如:恒星大气、活动星系核、射电源和激发态分子等^[7-12]。通过分析紫外偏振特性,研究人员能够深入了解宇宙中各种尺度和能量过程的物理机制,从而为天文学研究和宇宙演化理论提供重要支持。根据当前天文学对紫外偏振的研究进展,其科学意义大致可分为三类:太阳物理、行星科学以及星际物质研究。

1.1 太阳物理研究

紫外偏振探测在太阳物理学中扮演着至关重要的角色。根据 CLASP 和 CLASP2 等任务的结果表明^[13-15],通过散射过程产生的紫外偏振以及一些紫外光谱线中的 Hanle 和 Zeeman 效应具有显著的探测潜能。这些发现对于科学家深入理解太阳高能活动(例如耀斑和日冕物质抛射)的产生和发展机制^[16]、探索太阳活动的起源和演化过程^[17-18]、研究太阳磁场与各种太阳活动之间的相互作用^[19]、揭示太阳黑子和磁活动区的磁场结构、演化过程和相互作用机制等方面具有重要价值^[20-21]。

目前,部分基于太阳紫外偏振探测成果包括:J. M. Davis^[22]等人依据 MTRAP 载荷的观测数据,根据 288 nm Mg II 和 155 nm CIV 偏振数据分别分析了上层色球层和太阳过渡区磁场;L. Belluzzi^[23]等人分析了 Mg II h/k 紫外谱线偏振信息与太阳磁场变化的关系;E. A. West^[24]等人通过 SUMI 紫外偏振载荷开展了相关太阳过渡区研究;R. Kano^[25]等人根据 CLASP 载荷对太阳过渡区的 Ly- α 谱线的偏振信息进行了研究等。

1.2 行星科学研究

紫外偏振探测在行星科学中具有重要作用,为深入了解行星大气、表面和磁场特性提供了关键手段。

通过分析紫外偏振特性,科学家能够揭示行星大气的组成、密度、温度和动力学过程,从而进一步研究大气层的垂直结构和环流^[26]。同时,紫外偏振探测有助于分析行星表面的物质组成、粒度分布和地貌演化,提供了关于行星表面气候和环境变化的重要信息^[27]。此外,紫外偏振探测对于研究行星磁场对大气和周围空间环境的影响具有重要价值,揭示了行星磁层的结构、尺度和动力学特性,以及磁场对大气物质输送和能量传播的影响。

目前,部分成果包括:G. K. Fox^[18]等人通过 WUPPE 紫外偏振载荷对木卫一、月球、火星等行星表面、大气紫外偏振信息进行了分析,对行星表面物质组成、粒度分布等进行了分析;L. W. Esposito^[9]等人通过先驱者金星轨道探测器紫外偏振载荷对金星大气和光学厚度等进行了研究;J. Y. Chaufray^[28]等人对紫外偏振关于木卫三、冥王星、海卫一等星体大气压强、气溶胶含量、大气组分等的探测可能性进行了分析;L. Ben-Jaffel^[29]等人分析了 Ly- α 线偏振辐射对于木星表面磁场测量的可能等;王爽^[26]针对类地行星与小行星偏振特性研究对国外火星、水星、金星大气紫外偏振研究进展进行了总结。

1.3 星际物质研究

紫外偏振探测在星际物质研究中具有重要作用,为人们提供了关于星际尘埃颗粒性质、分布和相互作用的关键信息。通过分析紫外光谱和偏振特性,可以揭示尘埃颗粒的大小、形状、化学组成和空间分布,以及它们在散射和吸收过程中引起的光偏振现象。这些信息有助于人们更准确地描述星际消光的特征,并构建消光曲线以描述光在不同波长下的消光程度^[30]。此外,紫外偏振探测还可为发展和改进星际尘埃模型提供数据支持,进而帮助人们矫正星际消光对天文观测的影响。同时,尘埃颗粒的取向与星际磁场密切相关,紫外偏振探测可以揭示星际磁场的分布、强度和结构,以及其对星际物质和过程的影响。

目前,部分成果包括:W. B. Somerville^[11]针对紫外偏振在星际尘埃尺寸、形状分布以及消光曲线等目标信息探测的潜在性进行了分析;P. G. Martin^[31]根据哈勃望远镜 FOS 载荷的探测数据分析了紫外偏振与紫外星际消光现象之间的关系;李墨萍^[32]等人对星际尘埃观测中存在的紫外偏振研究进行了综述;薛梦

瑶^[33] 和王钰溪^[34] 等人总结了大小麦哲伦星云在紫外波段的消光规律并讨论了其尘埃性质等。

2 紫外天文偏振探测载荷进展

我国在天文紫外探测领域起步较晚,目前仅开展了紫外成像仪(CE-3、CE-7、FY-3E、SATech-01、YW-01等)的在轨应用、紫外光谱仪的研制等工作,在紫外偏振领域仍处于关键部组件研制阶段,目前暂无我国

紫外天文偏振载荷的研制以及在轨应用信息。

自 20 世纪以来,欧美等国在空间紫外天文偏振探测领域进行了大量研究,其中 NASA 在规划和研制众多紫外偏振探测载荷方面扮演了主导角色。表 1 总结了国际上典型的空间天文紫外偏振载荷。

以下将针对不同的探测任务(太阳、行星、星际物质等)分别介绍其中一些典型的紫外偏振载荷。

表 1 典型空间天文紫外偏振载荷
Tab.1 Typical space astronomy UV polarization loads

Mission	Main country	Launch time	Instrument	Target
Interkosmos 16	Sweden	1976	UVSP	VUV linear polarization in Solar transition zone, etc. ^[8, 35]
SMM	USA	1980	UVSP	Solar flares, solar active regions, solar corona, etc. ^[36-37]
SUMI	USA	2012	SUMI	Chromosphere, solar transition region magnetic field, etc. ^[19]
CLASP	Japan	2015	CLASP	Upper solar chromosphere, transition region, etc. ^[13, 15]
CLASP-2	Japan	2019	CLASP	Upper solar chromosphere, transition region, etc. ^[38]
CLASP-2.1	Japan	2021	CLASP	Upper solar chromosphere, transition region, etc. ^[38]
Pioneer Venus Orbiter	USA	1978	OCPP	Venus cloud layers, physical characteristics of aerosol particles in the atmosphere, and vertical distribution of aerosols, etc. ^[39]
Hubble telescope	USA	1990	FOS	Active galaxies, quasars, and planetary nebulae, etc. ^[40-43]
ASTRO-1	USA	1990	WUPPE	Interstellar dust, hot stars, material in the solar system, active galaxies, etc. ^[44]
ASTRO-2	USA	1995	WUPPE	Interstellar dust, hot stars, material in the solar system, active galaxies, etc. ^[44]
WISP	USA	1997	WISP	Diffuse nebula, dust nebula, Crab Nebula, etc. ^[1, 45]
CUPID	USA	Unknown	CUPID	Cosmic background, etc. ^[1]
FUSP	USA	Unknown	FUSP	Hot star systems, circumstellar disks, etc. ^[1]
SUNRISE III	Germany	Pending	SUSI	Solar atmosphere, etc. ^[46]
ARAGO	Europe	Under planning	ARAGO	Stellar-planetary interactions, etc. ^[47-48]
LUVOIR	USA	Under planning	POLLUX	Circumstellar disk, interstellar magnetic fields, etc. ^[49-52]
SolmeX	Europe	Under planning	EIP; SUSP; ChroME; CUSP	The structure of the solar outer atmosphere magnetic field, magnetic field variations, and magnetic field-derived effects, etc. ^[53]
Polstar	USA	Under planning	Polstar	Circumstellar disk, interstellar magnetic fields, etc. ^[54-55]

2.1 已发射的太阳观测型紫外偏振任务

1) Interkosmos 16 任务

Interkosmos 16 是 Interkosmos DS-U3-IK 系列的子任务之一,该项目由社会主义国家国际合作组织 Interkosmos 发起,旨在测量太阳辐射及其对大气的影响。Interkosmos 16 搭载了一台由瑞典隆德大学天文学研究所研制的紫外偏振载荷(UVSP),用于对太阳过渡区中的温度梯度和磁场进行测量^[35]。该项目于 1976 年发射升空,在轨运行了 4 个月,成功获取了少

量太阳紫外偏振数据^[8]。

2) 太阳极大期任务

太阳极大期任务(SMM)于 1980 年发射,恰逢当时太阳黑子周期的活动高峰期。其搭载的紫外光谱偏振探测载荷(UVSP)由马里兰州格林贝尔特的戈达德太空飞行中心和阿拉巴马州亨茨维尔的马歇尔太空飞行中心开发^[36]。该任务的科学目标旨在研究紫外线辐射,尤其是来自活动区域、耀斑和日冕的辐射。UVSP 除了具备基本仪器的高分辨率光谱学能力

外,还能够测量全偏振信息,有助于研究太阳磁场在色球层、过渡区和日冕中的分布;以及由共振散射和/或冲击偏振产生的线偏振^[37]。然而,受地磁风暴影响,该任务于 1989 年被提前终止。

3) 太阳紫外线磁力仪调查

太阳紫外线磁力仪调查 (SUMI) 是一项由 NASA 马歇尔飞行中心主导的探空火箭任务,于 2012 年 7 月成功发射。SUMI 是继 SMM-UVSP 后又一台用于研究太阳过渡区紫外偏振信号的天基载荷。该任务的主要目标是通过观测太阳辐射中 Mg II 和 C VI 辐射线,获取太阳磁场强度和方向,从而建立该区域的三维磁图^[19]。SUMI 作为一次试飞任务,其主要目的是确保仪器的正常工作,并评估可能的改进措施,为未来的探空项目提供基础。

4) CLASP 系列

CLASP 系列是由日本国家天文台主导的一项国际合作探测火箭实验,共同研制参与的国家包括美国 NASA 马歇尔太空飞行中心、法国天文研究所和西班牙天文研究所。截至目前,CLASP 系列实验已经经历了 3 个阶段:2015 年发射的 CLASP、2019 年发射的 CLASP2,以及 2021 年发射的 CLASP2.1。CLASP 主要针对太阳色球上层和过渡区的 Ly- α 谱线进行探测;CLASP2 在对 CLASP 任务中存在的问题进行改进的基础上,开展了对太阳色球上层和过渡区 Mg II 谱线的全 Stokes 参数探测研究^[38];CLASP2.1 在探测系统上与 CLASP2 相同,其主要任务是获取完整的色球层磁场的三维图。

2.2 已发射的行星/星系观测型紫外偏振任务

1) 先锋金星轨道器

先锋金星轨道器,也被称为先锋金星 1 号或先锋 12 号,是 NASA 进行的一项前往金星的任务,是先锋金星项目的一部分。该航天器于 1978 年被送入围绕金星的椭圆形轨道。先锋号金星轨道器携带了 17 项实验,其中云层光偏振仪 (OCP) 由 NASA 和休斯飞行器公司共同研制^[39]。OCP 在近紫外、可见光和近红外区域有 4 个光谱带,用于对金星大气进行偏振测量和辐射测绘,以获取金星详细的大气组成与结构信息^[9]。

2) 哈勃望远镜

暗天体摄谱仪 (FOS) 由加利福尼亚大学圣地亚

哥分校以及马丁·玛丽埃塔公司 (MMC) 联合研制而成,是哈勃太空望远镜 (HST) 上 4 个原始观测载荷之一^[40-41]。FOS 的设计目的是为了对暗的、通常是非常遥远的天体的物理条件进行光谱分析,波段从近紫外延伸到近红外。FOS 在轨期间主要执行以下科学任务,包括对活跃星系 (Active galaxies)、类星体 (Quasars)、星系化学丰度分析、行星状星云等宇宙物质的研究^[12,42-43]。

3) ASTRO 系列

威斯康辛紫外光偏振仪实验 (WUPPE) 是目前探索偏振和紫外光谱光度测定能力最全面的载荷之一,20 世纪 80 年代由美国威斯康辛大学空间天文实验室设计和建造。WUPPE 于 1990 年、1995 年分别搭载 ASTRO-1 哥伦比亚号和 ASTRO-2 奋进号航天飞机入轨探测^[44]。在 ASTRO-1 任务和 ASTRO-2 任务期间,WUPPE 获得了各种天体的光谱偏振数据,包括星际介质的遥远恒星、热恒星、具有周围物质的恒星、相互作用的双星、新星、太阳系天体和活动星系等^[18]。

4) 宽视场成像测偏仪

宽视场成像测偏仪 (WISP) 是一项 NASA 资助项目,由美国威斯康星-麦迪逊分校空间天文实验室主导的亚轨道火箭有效载荷望远镜,其目的是为了获得第一幅紫外光下的天文广域偏振图像而建造的^[1]。该项任务共发射 4 次,先后对昴宿星团、大麦哲伦星云、M81/M82 等目标进行了偏振观测,获取了大量有关反射星云、漫射星系光、系外行星的观测数据^[45]。

2.3 待发射/规划中紫外偏振探测任务

1) 日出三号 (SUNRISE III)

SUNRISE 是一项由德国马克斯普朗克研究所牵头的探空气球太阳观测站任务,该项任务已于 2009、2013 年先后发射两次,计划于 2023 年发射 SUNRISE III。该气球搭载紫外光谱偏振载荷 SUSI,将探索太阳 300~410 nm 近紫外辐射,为研究太阳大气各层之间的耦合提供独特的机会^[46]。

2) ARAGO

ARAGO 是欧空局 M7 任务候选项目,其探测任务将包括对数千颗恒星的大型调查和对 60 颗精心挑选的恒星的详细 3D 绘图。ARAGO 配备紫外、光学偏振模块,将实现 119~888 nm 波段范围内的光谱偏振探测功能^[47-48]。该项目已于 2022 年通过了欧空局

第一阶段项目筛选, 计划于 2025 年进行最终确认。若通过, Arago 将在 2037 年发射。

3) 大型紫外/光学/红外巡天望远镜

大型紫外/光学/红外巡天望远镜 (LUVOIR) 是 NASA 在 2016 年征集到的未来新一代太空天文台的项目之一^[49-50]。该天文台计划在 21 世纪 30 年代中期发射, 并将驻留在日地拉格朗日 L2 点, 其中, POLLUX 紫外光谱偏振载荷由欧洲科研机构提供, 用于研究星周盘、星际磁场等现象中存在的极化、去极化现象^[51-52]。

4) SolmeX

SolmeX 是 ESA 一项拟议的面向太阳上层大气磁场探测的综合探测卫星项目, 其科学目标主要针对对外大气磁场结构、磁场变化以及磁场衍生效应进行研究。SolmeX 卫星计划搭载五台科学载荷, 其中具备紫外偏振探测能力的载荷包括日冕紫外光谱偏振仪 (CUSP)、极紫外成像偏振仪 (EIP) 和扫描式紫外光谱偏振仪 (SUSP)^[53]。

5) MIDEX-Polstar

Polstar 是 NASA 一项拟议的中级探险家 (MIDEX)

空间探测任务, 由威斯康辛麦迪逊大学、NASA 戈达德太空飞行中心等研究机构提出, 拟使用高分辨率光谱偏振测量技术研究恒星和行星的磁场^[54]。该任务旨在为天体磁场结构、动力学和演变提供新的发现, 将对理解恒星和行星的形成、空间天气和系外行星的可居住性等科学研究起到至关重要的作用^[55]。

3 紫外偏振探测载荷关键技术

基于上述内容, 表 2 对目前已有和规划中的天文紫外偏振载荷性能指标进行了归纳总结。清晰可见, 当前紫外偏振探测主要以偏振+光谱探测相结合为主, 单一紫外偏振信息已无法满足天文观测的需求。随着观测需求的不断提高, 需要更高精度的光谱分辨率和偏振测量精度, 因此对于紫外偏振器件也提出了更高的要求。此外, 由于宇宙中的紫外辐射信号主要集中在极远紫外波段, 辐射强度相较于可见、红外波段较弱, 因此对系统整体透过率和探测效率的要求也极高。基于上述分析, 可以提炼出 3 个关键技术方面的应用于紫外偏振探测载荷的要点, 下面将对其进行详细介绍。

表 2 典型空间天文紫外偏振载荷指标参数

Tab.2 Parameters of typical space astronomy UV polarization load

Parameter instrument	Instrument type	Wavelength/nm	Spectral resolution/nm	Stokes parameter	Polarimetry precision
Interkosmos 16	Spectro-polarimeter	120-150	3.9	I Q U	10 ⁻²
SMM-UVSP	Spectro-polarimeter	115-360	0.002-0.004	I V	10 ⁻²
SUMI	Spectro-polarimeter	C IV(155) Mg II(280)	0.05@ C IV 0.08@ Mg II	I Q U V	10 ⁻³
CLASP	Spectro-polarimeter	Ly- α (121.6)	0.01	I Q U	10 ⁻³
CLASP2/2.1	Spectro-polarimeter	Mg II(280)	0.01	I Q U V	10 ⁻³
Pioneer Venus Orbiter-OCPP	Photo-polarimeter	270, 365	~18	I Q U	10 ⁻³
HST-FOS	Spectro-polarimeter	115-850	>0.25	I Q U V	10 ⁻²
ASTRO1/2-WUPPE	Spectro-polarimeter	135-330	0.6	I Q U V	10 ⁻³
WISP	Photo-polarimeter	135-260	40	I Q U	-
CUPID	Photo-polarimeter	118-161	20	I Q U	10 ⁻²
FUSP	Spectro-polarimeter	105-150	0.07	I Q U	10 ⁻³
SUNRISE III-SUSI	Spectro-polarimeter	300-410	0.001	I Q U V	10 ⁻³
ARAGO	Spectro-polarimeter	119-888	>0.009	I Q U V	-
LUVOIR-POLLUX	Spectro-polarimeter	90-400	0.002	I Q U V	10 ⁻⁴
SolmeX-CUSP	Spectro-polarimeter	95-125	0.009	I Q U	10 ⁻²
SolmeX-EIP	Photo-polarimeter	Fe X(17.4)	0.35	I Q U	10 ⁻³
SolmeX-SUSP	Spectro-polarimeter	115-155	0.006 6	I Q U V	10 ⁻³
SolmeX-ChroME	Spectro-polarimeter	Mg II(279)	0.005	I Q U V	10 ⁻³
MIDEX-Polstar	Spectro-polarimeter	122-320	>0.005	I Q U V	10 ⁻³

3.1 紫外薄膜

鉴于紫外波段可使用的光学折射材料较为有限,且在真空紫外波段难以应用,因此目前天文紫外偏振探测系统主要采用反射式光学设计。为了实现系统在紫外波段的高光学透过效率和宽波段响应,需要在光学镜面上涂覆高性能的紫外反射薄膜。通过对上

述紫外偏振载荷的调研,总结了不同偏振载荷所采用的薄膜类型及其响应波段,如表 3 所示。所使用的薄膜大致可以分为三类:金属、金属+保护性外涂层、多层介电膜^[56]。图 1 展示了一些目前常用的紫外反射薄膜的反射率曲线。

表 3 典型空间天文紫外偏振载荷工作谱段及关键部组件

Tab.3 Typical spectral range of space astrophysical UV polarization payloads and key components

Parameter instrument	Wavelength/nm	UV coating	Detector
Interkosmos 16	120-150	Al+MgF ₂ Au	PMT
SMM-UVSP	115-360	Al+MgF ₂	PMT
SUMI	C IV(155) Mg II(280)	HfO ₂ /SiO ₂ /MgF ₂ /LaF ₃ Dielectric coating	BICCD
CLASP	Ly- α (121.6)	Al+MgF ₂	Frame-transfer CCD
CLASP2/2.1	Mg II(280)	Al+MgF ₂	CCD
Pioneer Venus Orbiter-OCPP	270, 365	SiO ₂ /MgF ₂ +Al	UV-enhanced silicon photodiode
HST-FOS	115-850	Al+Al ₂ O ₃	Digicon photon detector
ASTRO1/2-WUPPE	135-330	Al+MgF ₂	Reticon photodiode array
WISP	135-260	Al+MgF ₂	Thinned CCD
CUPID	118-161	Al+MgF ₂	Thinned CCD
FUSP	105-150	Al+LiF	Thinned CCD
SUNRISE III-SUSI	300-410	Al	BICCD
ARAGO	119-888	Al+MgF ₂	δ -CMOS
LUVOIR-POLLUX	90-400	Al+MgF ₂ +SiC	δ -CCD
SolmeX-CUSP	95-125	-	ICCD
SolmeX-EIP	Fe X(17.4)	Al+B ₄ C+Mo	BTCCD
SolmeX-SUSP	115-155	-	ICMOS
SolmeX-Chrome	Mg II(279)	-	-
MIDEX-Polstar	122-320	Al +MgF ₂	CCD

在常见的金属镜面涂层(金、银、铝)中,只有铝能够在波长小于 90 nm 的极紫外波段提供高反射率^[57],然而,由于铝金属化学特性较为活泼,当暴露在空气中(即便是在非常低的压力下),在涂层表面会形成一个氧化膜,大大降低其在紫外波段的性能,因此单质铝薄膜在实际工程中需要对载荷进行真空设计,通过在光机腔体充氮、氦等惰性气体来防止铝膜层的氧化,但是此类系统设计难度大、成本高。

目前,最常见的紫外薄膜是在金属膜层表面涂覆保

护性膜层^[58](通常采用氟化物,如 LiF、MgF₂、AlF₃)^[59-61]来阻止金属膜层的氧化,使得金属膜层的适用范围和场景大大拓宽,减低了载荷的设计难度。然而,保护性膜层的使用带来了问题,即会降低金属膜层在短波段的反射率。图 2 展示了几种常见的紫外薄膜在波段小于 200 nm 的反射率曲线。根据曲线趋势,可以明显看出金属+保护性外涂层在 120 nm 以上的波段提供了出色的反射率(大于 85%),而在 120 nm 以下时,反射率急剧下降到 20%,远低于金属单质薄膜。

这就需要在设计载荷时权衡考虑,根据具体的波段要求来选择适当的薄膜设计。

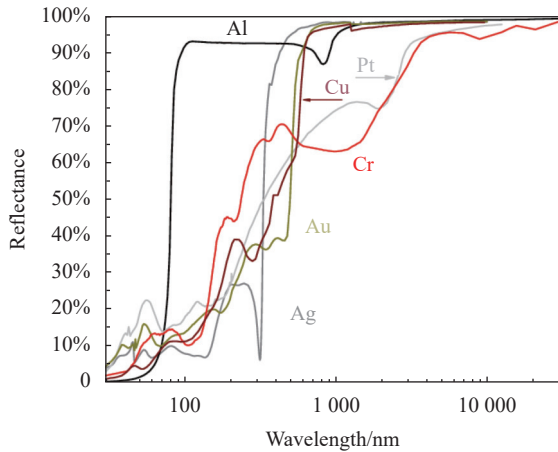


图 1 金属薄膜紫外波段反射率曲线

Fig.1 Reflectance curve of metal film in UV band

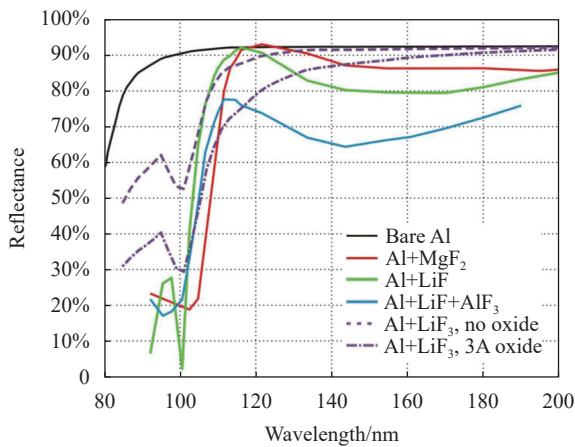


图 2 金属+保护型外涂层紫外波段反射率对比图

Fig.2 Comparison of metal + protective coating UV reflectance

针对 200 nm 以下的真空波段,除了使用常规的 Al 或 Al+氟化物膜之外,科学家们针对不同特定谱段探测需求(如 C IV、Fe X、Ly- α 等),研制出了适用于该谱段的高性能多层介电反射膜,例如 10~20 nm 下采用 Mo/Si 多层膜^[62]; 17~20 nm 下采用 Al/Zr 多层膜; 17~34 nm 采用 Al/Mo/B₄C 多层膜^[63]; 25~40 nm 下采用 Mg 基多层膜; 105~130 nm 下采用 LaF₃/MgF₂ 多层膜等,如图 3 所示^[64]。这些多层介电反射膜能够在特定波段下提供高反射率,从而提高整体探测系统的光学效率,对于偏振测量精度和探测效率的提升具有显著作用^[65]。

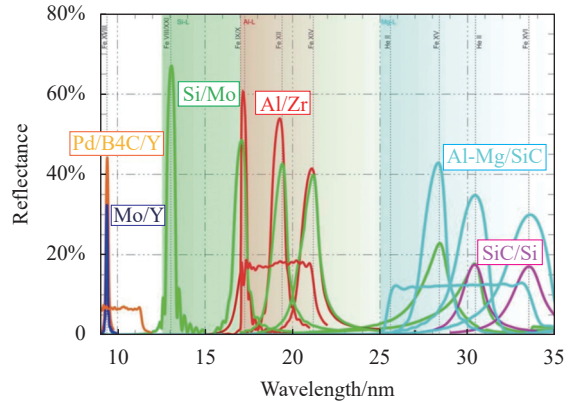


图 3 极紫外波段光学薄膜反射率曲线^[64]

Fig.3 Reflectance curve of optical film in EUV band^[64]

3.2 紫外偏振器件

偏振系统是系统实现获取偏振光以及检测偏振光的关键。在太阳观测、行星大气等天文研究领域,需要对目标光线特性进行测量,改变偏振态,以及利用其偏振特性进行一些物理量(如磁场、元素组成等)的测量^[3,5]。

偏振系统按照测量所得 Stokes 参数的个数可划分为一维、二维、三维和四维 Stokes 偏振系统。一维、二维偏振系统主要用于提高目标与背景之间的对比度,携带的目标有用信息较少,因此在天文偏振观测中很少应用^[6]。在绝大多数被动测量应用中,很少会用到圆偏振分量,而且圆偏振参数的测量最为困难,因此在早期紫外天文偏振载荷设计中,通常以三维偏振系统设计为主。随着天文学研究不断深入,发现地外生物分子、太阳活动等天文观测目标中蕴含大量的圆偏振光,这些信息可用于揭示地外生命、太阳活动起源等未解之谜,配合其他偏振态信息可获取目标更为详尽的辐射信息,因此,四维偏振系统成为目前国际上最为主流的偏振测量设备,文中也将着重对四维偏振系统的组成和发展进行介绍和分析。

四维偏振系统在设计上主要由偏振光相位调制器 (Modulator) 和偏振分析仪 (Analyzer) 两部分组成。其中,根据不同的相位调制方法,偏振系统可划分为时间调制型 (Temporal modulation)、空间调制型 (Spatial modulation)、时空调制型 (Spatiotemporal modulation) 以及光谱调制型 (Spectropolarimetric modulation) 四类 Stokes 偏振系统^[66],如图 4 所示。

1) 时间调制型偏振系统

时间调制型偏振系统通过引入动态元件来采集

不同时刻下,不同偏振方向的强度图像,然后反解出偏振信息。目前适用性较广的动态元件包括旋转波片(RWP)、电光调制器^[67-68](LCVR、FLC、DFLC)以及弹光调制器^[69](PEM),如表 4 所示。其中,由于紫外谱

段的光学特殊性,电光调制器和弹光调制器在紫外波段的研究和应用较少,因此大多紫外天文偏振系统采用旋转波片^[70-72]。

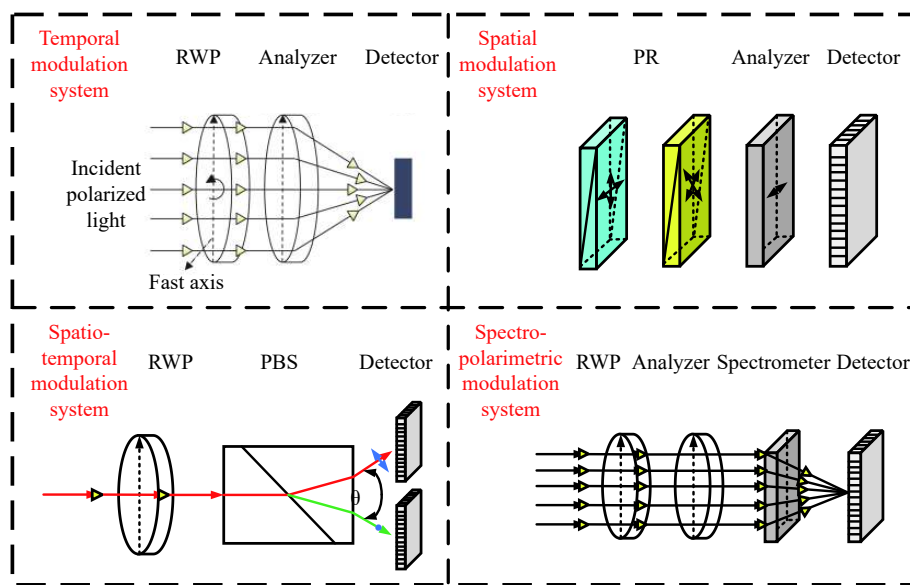


图 4 不同相位调制方法偏振系统工作原理图

Fig.4 Working principle diagram of polarization system with different phase modulation methods

表 4 常用偏振调制方式优缺点

Tab.4 Advantages and disadvantages of common polarization modulation methods

Polarization modulation	Modulation device	Advantages	Disadvantages
Mechanical Modulation	RWP	Broader working spectral range, suitable for most UV regime; Stable in time	Moving parts increase mass, power consumption and vibrations; Modulation frequency is mechanically limited by the retarder rotating speed
Electro-optic modulation	LCVR, FLC, DFCL	High modulation frequency; Large aperture; Low power consumption	Limited in-orbit application; Not suitable for most UV regime
Acousto-optic modulation	PEM	Broader working spectral range(VUV-IR)	No full-Stokes modulator has been developed; Small aperture
Reflective modulation	Brewster angle reflectors	Suitable for FUV/EUV regime	Complex structure, hard to install; large weight and volume

在波片材料选择上,根据探测波段需求,多采用 MgF₂、CaF₂、LiF 等紫外光透材料,上述材料所制旋转波片在 > 110 nm 波段有着较好的透过效率,而 < 110 nm 的极远紫外光无法透过旋转波片,因此基于旋转波片的偏振系统不适用于 110 nm 以下谱段^[73-74]。

在选择波片材料时,通常根据探测波段的需求进行考虑。常用的材料包括 MgF₂、CaF₂、LiF 等紫外光透明材料。这些材料制成的旋转波片在波长大于

110 nm 的范围内表现出较好的透过效率。然而,在波长小于 110 nm 的极远紫外光下,旋转波片失去透过的能力。因此,基于旋转波片的偏振系统在 110 nm 以下的谱段并不适用^[73-74]。

在 LUVOIR-POLLUX 任务中,欧美等国科学家针对远紫外谱段的观测选择了一种先进的技术方,即旋转式三反射相位调制器(K 镜)。该系统采用了 3 个镀有 FUV 膜的反射镜,通过它们的巧妙组合,能

够在光束不偏离光轴的情况下实现最佳强度^[51], 具体结构见图 5。在该技术方案中, 每次反射时, 由于入射角度的变化, 光束会在 P 偏振和 S 偏振之间发生相移。通过将这 3 个反射镜整体旋转, 可以实现对光束的时间调制。这一创新技术方案旨在满足对极远紫外偏振的探测需求的同时, 最大限度地减少反射镜的数量, 从而提高光学系统的效率。这种方法不仅使得光学系统更加精细和高效, 同时也为极/远紫外波段观测提供了一种更为先进的技术手段。

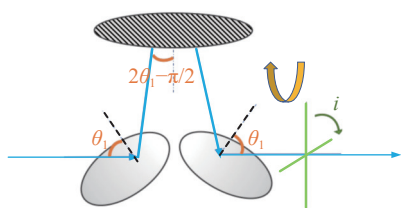


图 5 旋转式三反射镜相位调制器
Fig.5 Rotating 3-mirror phase modulator

2) 空间调制型偏振系统

空间调制型偏振系统以光楔、Savart 偏光镜等光学元件作为空间调制模块, 将 Stokes 矢量的 4 个参数 (I、Q、U、V) 信息调制到不同频率的载波上, 用于实现对同一目标不同偏振分量的同时探测。空间调制型系统相较于其他偏振系统来说, 由于系统中不包含机械转动部件, 无需分时多次采集来获取目标完整的 Stokes 矢量信息, 因此可对运动目标偏振信息进行精细观测^[6]。空间调制元件除了常规的 Savart 偏光镜外, 科学家还尝试使用基于方解石楔形晶体的傅里叶变换调制器、沃拉斯顿棱镜组, 但由于通光口径小、光学效率低、质量体积大等因素并未应用于空间探测。

当前空间调制型偏振系统发展以片上偏振光探测器研制为主, 通过在焦平面前端放置 4 个方向 (0°、45°、90°、135°) 的线栅偏振片, 让在垂直于偏振片的方向振动的光透过, 同时阻断在水平方向上振动的光^[75], 见图 6。借此, 偏振图像传感器会根据每个方向的偏振强度计算出探测所需的 Stokes 矢量信息。由于目前偏振探测器的研制主要以可见光和红外波段为主, 因此对于紫外波段的使用需做进一步研究。

3) 时空调制型偏振系统

时空调制型偏振系统由时间调制模块和空间调

制模块构成, 入射的偏振光线经旋转波片等动态组件调制后, 通过偏振分束器将光束分成两个正交偏振分量, 由两个探测器或同一探测器的两个部分对两个正交光束进行成像^[76]。

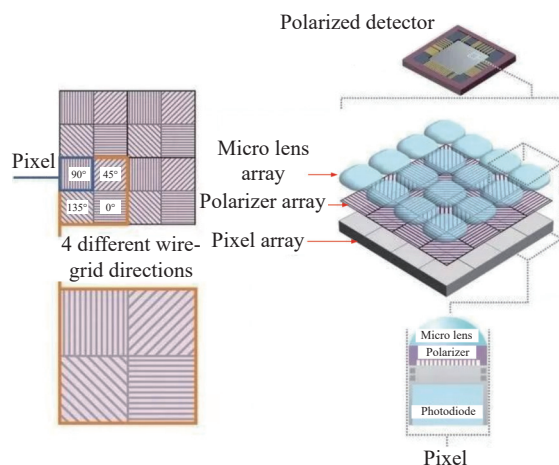


图 6 片上偏振光探测器原理图
Fig.6 Schematic of polarization detector

在空间紫外天文偏振测量中使用的大多数分束器主要为以下几种不同的实现形式^[77-79], 包括偏振分束立方体 (Beam Splitter Cubes)^[46]、沃拉斯顿棱镜 (Wollaston Prisms)^[80]、线栅偏振器 (Wire-grid Polarizer)^[81-82]、布儒斯特平面 (Brewster Plane)^[13] 等, 且上述器件针对不同特定载荷的需求进行了不同程度的优化, 其中包括分光程度、波长范围、消光比, 表 5 列出了紫外波段最常用的偏振分束器以及定制设计或组件。

4) 光谱调制型偏振系统

前文介绍的三类偏振设计主要针对准单色光进行探测的。近年来, 偏振探测技术与光谱探测技术的融合成为了未来空间天文光学探测手段的发展趋势。光谱调制型偏振系统结合上述三类载荷设计, 将时空调制与光谱分析相融合, 这种多维信息获取方法不仅提高了光学遥感探测获取的信息量, 在针对动态变化目标的测量时, 还能够克服传统分时偏振测量和分孔径偏振测量的时间匹配和空间匹配问题^[83-84]。

目前, 在紫外波段常用的光谱调制型偏振系统为: 1) 光谱+偏振双通道系统 (独立获取偏振或光谱信息, 例如 CLASP 系列、Polstar 等); 2) 偏振光谱单通道系统 (获取不同偏振状态下光谱信息, 例如 SUMI、SUNRISE III-SUSI 等), 如图 7 所示。

表 5 紫外波段常用偏振分束器

Tab.5 Commonly used polarizing beam splitters in the UV band

Device	Discription	Working diagram	Application
Beam splitter cube	Two beams output at a large angle and imaged in two separate detectors		SUNRISE III-SUSI, SolmeX-Chrome
Wollaston prism	Output beams are refracted at nearly opposite angles		HST-FOS, ASTRO1/2-WUPPE, ARAGO, LUVOIR-POLLUX(MUV/NUV), MIDEX-polstar
Double Wollaston prism	Two Wollaston prisms are combined, the first one acts as beam splitter while the second one produces two parallel beams at the output		SUMI, Pioneer venus orbiter-OCPP
Brewster plane	Beamsplitting is accomplished by two reflections on two MgF ₂ birefringent plates placed at the Brewster angle		Interkosmos 16, SMM-UVSP, SolmeX-SUSP, LUVOIR-POLLUX(FUV), CLASP
Wire-grid polarizer	By employing a structure with fine metal grids, selectively allow light of specific orientations to pass through		CLASP2/2.1, SolmeX-EIP

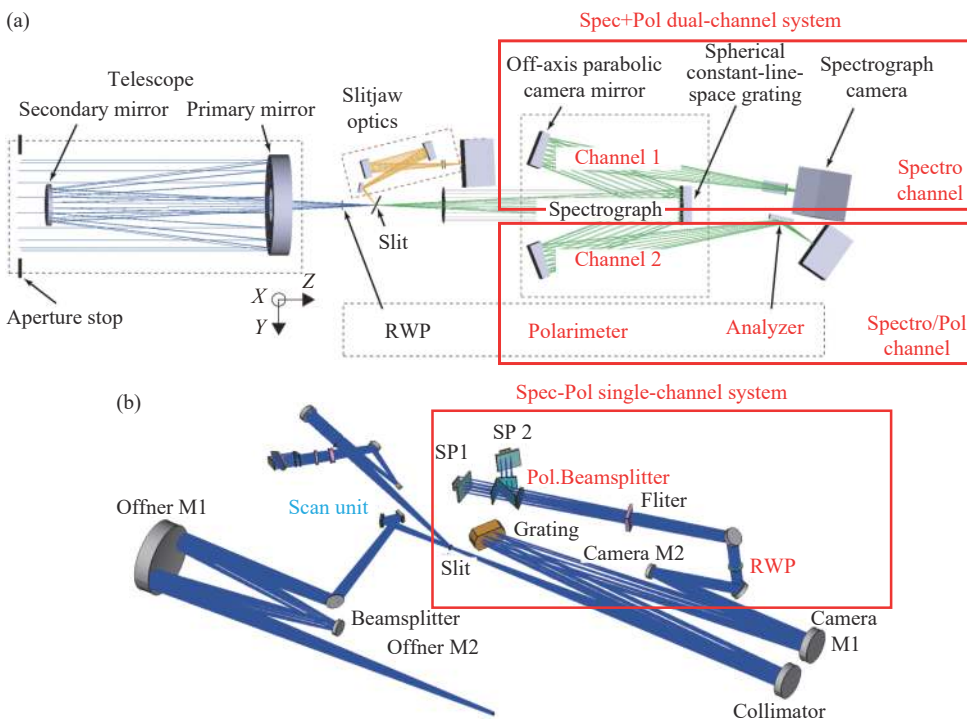


图 7 (a) CLASP 光谱+偏振双通道系统^[13]; (b) SUNRISE III-SUSI 偏振光谱单通道系统^[46]

Fig.7 (a) CLASP spectroscopy+polarization double channels system^[13]; (b) SUNRISE III-SUSI spectropolarimeter single channel system^[46]

在过去的 10 年, 基于光谱调制型偏振系统的探测载荷在太阳观测和深空探测等天文学领域得到了快速地发展与应用, 是目前紫外偏振天文观测领域中应用最广、观测效果最好的偏振探测系统^[66], 具体应用载荷见表 2。

3.3 紫外探测器

紫外探测器在宇宙天文偏振信号的可视化中扮演着关键的角色, 其性能直接影响着紫外偏振载荷的优劣。根据工作原理的不同, 紫外探测器可以划分为真空型紫外探测器和固态紫外探测器, 表 3 列举出了当前紫外偏振载荷所用的探测器。

1) 真空型紫外探测器

目前, 应用于天文紫外偏振探测载荷的真空型紫外探测器主要有紫外像增强器、紫外像增强型 CCD/CMOS 等。这类探测器由于具有电子倍增器件, 如像管、微通道板 (MCP), 因此探测灵敏度高, 可实现对微弱信号放大检测^[85]。通过选择合适的光阴极材料 (碘化铯 (CsI)、碲化铯 (Cs₂Te) 等), 可满足极紫外到近紫外宽波段响应。其缺点在于, 受到电子加速轰击影响, 真空型紫外探测器寿命约 10 000 h; 且由于探测器中存在高压模块, 导致太空中的微粒、尘埃等通过静电作用吸附在探测器内, 导致探测器件降效或失效, 严重影响真空器件的使用寿命; 此外, 体积和成本也是制约真空器件使用的因素之一。

2) 固体紫外探测器

随着天文观测载荷逐渐向轻小型、高鲁棒性趋势发展, 体积小、寿命长、可靠性高的紫外固态探测器随着半导体技术的出现得以发展。目前空间紫外常用的是硅基半导体, 其中以像元规模大、量子效率高、读出噪声低、动态范围宽、像质均匀性高^[86]的紫外型 CCD 和读出噪声低、帧频快、功耗低、量子效率高、低成本^[87]的 CMOS 器件为主。

传统设计的 CCD 和 CMOS 探测器件在紫外波段使用时存在几大问题, 导致其紫外探测效能较差, 例如: 1) 由于表面的多晶电极、金属电极和钝化层对紫外辐射产生强烈吸收或散射, 阻碍紫外辐射到达光敏二极管; 2) 硅材料对于紫外波段吸收深度浅, 在表面电势作用下光生电荷更易被俘获或复合; 3) 硅在紫外波段的折射率比可见光波段更高且变化大^[88]。

针对上述问题, 科学家们对 CCD 和 CMOS

进行了紫外改进设计, 按照技术路线分为两类: 1) 通过背照射探测器^[89]设计和紫外增透窗口来避免电极和钝化层对于紫外光子的吸收, 具体应用包括 SUMI、SUNRISE; 2) 通过表面浅层离子注入和外延生长原子级厚度的 δ 掺杂层技术在硅材料表面形成新的内建电场, 收集近入射面的光生电荷^[90], 该技术原理图如图 8 所示, 具体应用包括 WISP、CUPID、FUSP、ARAGO 等。图 9 比较了不同类型探测器紫外波段的量子效率, 经 δ 掺杂技术处理后的探测器相较于传统前照式设计在 400 nm 以下波段具有更高的响应效率。

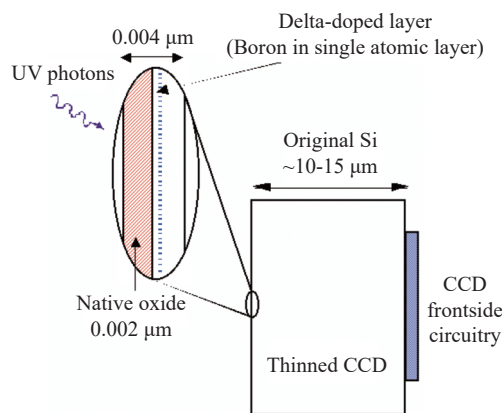


图 8 δ 掺杂探测器原理图

Fig.8 Schematic diagram of δ -doped detector

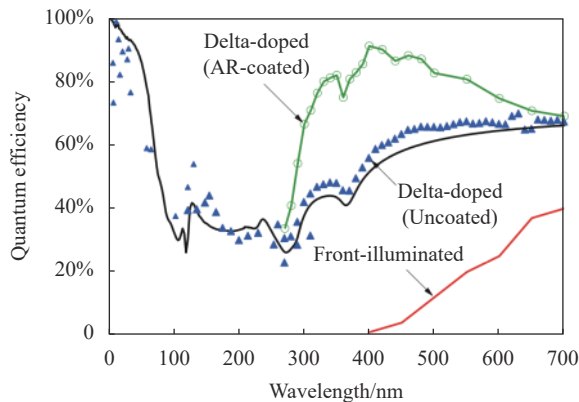


图 9 不同类型探测器紫外波段量子效率对比

Fig.9 Comparison of quantum efficiency in the UV band for different types of detectors

在偏振探测应用中, CCD 存在一些不足之处。由于 CCD 的工作特性, 多个像元共用一个电荷读出放大器来实现信号读出, 导致 CCD 难以实现高帧频工

作,并且随着探测器面阵规模的扩大,其帧频呈指数下降^[66]。因此,在时间调制型偏振系统中存在 CCD 与偏振调制器速度不匹配的问题。此外,随着大口径空间望远镜的不断发展,CCD 器件已经无法满足天文载荷对于探测器高帧频、高性能、低成本等要求。CMOS 在实际测量中也存在一些问题,因为 CMOS 器件在设计上将电荷阱与放大器集成在同一个像元上,导致探测器响应呈现较高的非线性度,使得在高偏振

精度探测 ($<10^{-4}$) 时 CMOS 的探测效能难以保证,从而限制了其在某些高精度天文探测任务中的应用^[66]。

除此之外,电子倍增 CCD(EMCCD)、科学级 CMOS (sCMOS) 等器件的快速发展以及在轨应用也为未来空间天文紫外偏振载荷设计提供了更多地选择^[91],文中在表 6 中总结了各类固体探测器的优缺点。

表 6 各类固体紫外探测器优缺点

Tab.6 Advantages and disadvantages of different solid UV detectors

Device	Advantages	Disadvantages
EMCCD	High sensitivity; low noise; high frame rate; high dynamic range	High cost; limited dynamic range compared to CCD and sCMOS; limited lifespan; limited resolution
sCMOS	High sensitivity; high frame rate; high dynamic range; large FOV	High cost; limited lifespan; limited resolution; sensitivity to cosmic rays, leading to potential image artifacts or data loss
CCD	High sensitivity; high dynamic range; low noise	Low readout speed; high power consumption; high cost; limited resolution
CMOS	Low power consumption; low cost; high frame rate; high resolution; large FOV	Low sensitivity; low dynamic range; high noise

鉴于当前空间天文学的研究热点以及中国在深空探测方面的布局,文中对空间天文紫外偏振探测技术的研究进展进行了概述,针对其科学意义、载荷发展以及载荷关键技术组成进行剖析,针对紫外偏振探测器件未来发展方向提出以下建议:

4 总结与展望

随着天文观测领域的不断拓展,紫外偏振探测技术在天文学领域展现出巨大的潜能,该技术的发展不仅能够为宇宙观测提供更全面的视角,还有望揭示更多关于宇宙起源、星系演化和行星环境等方面的信息。

目前,紫外偏振探测技术相较于其他光学探测手段,存在以下几点不足,包括: 1) 光学探测效率低 ($<10\%$, 受限于光学薄膜、偏振测量器件、探测器综合光学性能); 2) 偏振测量精度差 (最高可实现 10^{-3} , 偏振测量器件以机械调制 RWP 为主, 响应速度慢、调制精度差); 3) 器件研制成本高/难度大 (探测器、光学薄膜、偏振测量器件等需要特殊定制, 传统光学器件在紫外波段响应差), 限制了该技术在空间应用中的进一步发展。

1) 紫外薄膜

①发展原子层沉积技术 (ALD) 等新型镀膜技术有利于提升薄膜光学反射属性^[59, 92]。当前紫外反射薄膜以金属+保护型金属氧化物的形式为主,金属氧化物的引入会造成极远紫外光的部分吸收,大幅降低薄膜的反射效率。ALD 技术通过在金属薄膜表面沉积一层非常薄 (~1 nm) 的无缺陷保护型膜层,可以在避免金属薄膜氧化前提下,对金属薄膜反射率无影响或影响较小,对于提升紫外偏振载荷整体光学效率有着极大地帮助。

②开展多层反射膜在高反射率性能上的提升。多层反射膜由不同折射率材料交替生长而成,利用多界面反射光的相干叠加,大幅提升其在极远紫外波段在正入射条件下的反射效率,是目前极远紫外光学发展中重要的组成部分。目前多层膜在反射效率上与 Al 等纯金属薄膜存在较大的差距,严重影响极远紫外光学载荷设计选型和响应阈值。因此,下一步研究工作需要在多层膜材料选型、膜系设计、膜厚调控及制备工艺上进一步突破。

2) 紫外偏振系统

①拓展电光调制器等新兴动态元件在 UV 谱段

的应用。以液晶相位可变延迟器(LCVR)为代表的电光调制器可改善传统机械调制手段体积大、响应速度慢、控制精度低等问题,有利于提升目前偏振系统测量精度。目前用于偏振控制用途的液晶技术已扩展至中紫外波段(230~400 nm),未来需要在材料制备以及工艺提升上加大研究,拓宽其在极紫外-真空紫外波段的应用。

②开展紫外敏感的片上偏振探测器研制。片上偏振探测器可在单一孔径下同时同地对同一动态目标进行偏振成像,且在进行偏振图像信息处理时无需进行配准直接融合,具有体积小、质量低以及能耗低等优势。然而,受限于纳米制造工艺的精度,很难制造出集成了亚波长金属光栅的UV偏振敏感探测器,而且偏振消光比相对较低。目前,基于新材质金属光栅的偏振探测器研究已实现近紫外波段响应。为了实现更宽紫外波段的应用,需要在光栅选材、光栅结构设计、集成工艺等核心技术上进行进一步突破。

3) 紫外探测器

①拓宽紫外固体探测器在EUV波段响应。当前EUV波段探测主要以真空型器件为主,传统紫外增透处理和背照式/表面处理工艺复杂、成本高,且在EUV波段应用较少。因此,需要对硅器件表面钝化处理工艺进行进一步研究突破。

②提升探测器探测灵敏度。发展基于EMCCD和sCMOS等的高灵敏探测技术,增强器件的在紫外波段的高灵敏响应。

③开展新型紫外探测器研制。基于荧光转换材料的紫外增强探测器和宽禁带半导体探测器是目前紫外探测器发展的重要技术路线之一。针对荧光转换材料探测器,发展真空紫外高光谱响应效率的荧光材料以及提升材料荧光产率是下一步需要解决的问题;针对宽禁带半导体探测器,其自身具备暗电流低、可见光抑制、抗辐照能力强等优势,南京大学等科研单位对其在探测领域开展了部分工作,但是由于技术成熟度的原因,需要后续开展进一步的研制试验工作。

综上所述,就空间天文紫外偏振探测的发展现状而言,我国目前仍处于探索阶段。在紫外偏振系统研制方面,我国与西方国家在器件性能和研制成熟度上存在较大差距。因此,有必要将紫外偏振系统的研制

作为优先发展方向进行深入研究。值得一提的是,我国在紫外光学薄膜和紫外探测器方面积累了较为扎实的研制基础,在多个空间应用中取得了验证。为了进一步提升探测性能,可将其作为下一阶段研究的重点。

空间天文紫外偏振探测技术的发展对我国在太阳探测、深空探测等天文领域的深入研究具有积极意义,有助于扩大我国在天文学领域的影响力。关键部件技术的突破将推动我国在极紫外光刻机、紫外大气偏振导航、紫外军事侦察/预警等相关领域和产业的发展。

参考文献:

- [1] Nordsieck K H, Harris W M. Ultraviolet astronomical polarimetry: Some results and prospects [C]//Ultraviolet and X-Ray Detection, Spectroscopy, and Polarimetry III. SPIE, 1999, 3764: 124-133.
- [2] Wu Ji, Sun Lilin, You Liang, et al. Prospect for Chinese space science in 2016-2030 [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2015, 30(6): 707-720. (in Chinese)
- [3] Zhang Chaoyang, Cheng Haifeng, Chen Zhaohui, et al. The present research and developing trend of polarization remote sensing [J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(12): 1237-1240. (in Chinese)
- [4] Sun Xiaobing, Qiao Yanli, Hong Jin. Review of polarization remote sensing techniques and applications in the visible and infrared [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2010, 5(3): 175-189. (in Chinese)
- [5] Zhou Qiangguo, Huang Zhiming, Zhou Wei. Research progress and application of polarization imaging technology [J]. *Infrared Technology*, 2021, 43(9): 817-828. (in Chinese)
- [6] Dai Hu. Investigation and optimization of polarimetry and polarimetric imaging system [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese)
- [7] Coffeen D L. Wavelength dependence of polarization XVI atmosphere of venus [J]. *Astronomical Journal*, 1969, 74: 446-460.
- [8] Stenflo J O, Dravins D, Wihlborg N, et al. Search for spectral line polarization in the solar vacuum ultraviolet [J]. *Solar Physics*, 1980, 66: 13-19.
- [9] Esposito L W, Travis L D. Polarization studies of the venus UV contrasts: Cloud height and haze variability [J]. *Icarus*, 1982, 51(2): 374-390.

- [10] Fineschi S, Hoover R B, Fontenla J M, et al. Polarimetry of extreme ultraviolet lines in solar astronomy [J]. *Optical Engineering*, 1991, 30(8): 1161-1168.
- [11] Somerville W B. Ultraviolet interstellar polarization [J]. *Vistas in Astronomy*, 1991, 34: 51-59.
- [12] Bjorkman K S. Recent results from ultraviolet and optical spectropolarimetry of hot stars [C]//Symposium-International Astronomical Union, Cambridge University Press, 1994, 162: 219-229.
- [13] Narukage N, Tsuneta S, Bando T, et al. Overview of chromospheric lyman-alpha spectropolarimeter (CLASP) [C]//Solar Physics and Space Weather Instrumentation IV, SPIE, 2011, 8148: 200-216.
- [14] Giono G, Ishikawa R, Narukage N, et al. Polarization calibration of the chromospheric lyman-alpha spectropolarimeter for a 0.1% polarization sensitivity in the VUV range. Part II: In-flight calibration [J]. *Solar Physics*, 2017, 292: 1-19.
- [15] Ishikawa R, Kano R, Winebarger A, et al. CLASP: A UV spectropolarimeter on a sounding rocket for probing thechromosphere-corona transition regio [J]. *IAU General Assembly*, 2015, 29: 2254536.
- [16] Fox G K, Code A D, Anderson C M, et al. Solar system observations by the wisconsin ultraviolet photopolarimeter experiment. II. The first linear ultraviolet spectropolarimetry of Io [J]. *Astronomical Journal*, 1997, 113(3): 1158-1160.
- [17] Kubo M, Kano R, Kobayashi K, et al. A sounding rocket experiment for the chromospheric lyman-alpha spectropolarimeter (CLASP) [J]. *Solar Polarization* 7, 2014, 489: 307.
- [18] Kano R, Ishikawa R, Winebarger A, et al. Ultraviolet spectropolarimetric observations to probe the solar chromosphere and transition region [C]//1st Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, 2017, 9: SA-O1.
- [19] West E A, Porter J G, Davis J M, et al. Overview of the solar ultraviolet magnetograph investigation [C]//Instrumentation for UV/EUV Astronomy and Solar Missions, SPIE, 2000, 4139: 350-361.
- [20] Li Hao. Scattering polarization property of solar spectrum [D]. Kunming: Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
- [21] Li Hao, Qu Zhongquan. Progressed in studying scattering polarization in solar atmosphere [J]. *Progress in Astronomy*, 2014, 32(4): 423-440. (in Chinese)
- [22] Davis J M, West E A, Moore R L, et al. MTRAP: The magnetic transition region probe [C]//Solar Physics and Space Weather Instrumentation, SPIE, 2005, 5901: 273-280.
- [23] Belluzzi L, Bueno J T. The polarization of the solar Mg II h and k lines [J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2012, 750(1): L11.
- [24] West E A, Porter J G, Davis J M, et al. Development of a polarimeter for magnetic field measurements in the ultraviolet [C]//Polarization Analysis and Measurement IV, SPIE, 2002, 4481: 109-117.
- [25] Kano R, Bueno J T, Winebarger A, et al. Discovery of scattering polarization in the hydrogen Ly α line of the solar disk radiation [J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2017, 839(1): L10.
- [26] Wang Shuang. Polarmetric study of earth-like exoplanets and asteroids [D]. Kunming: Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)
- [27] Song Wei, Qu Zhongquan. Study of polarimetries of the earth-like exoplanet [J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2016, 57(2): 165-180. (in Chinese)
- [28] Chaufray J Y, Lamy L, Rousselot P, et al. UV exploration of the solar system [J]. *Experimental Astronomy*, 2021, 54: 1-18.
- [29] Ben-Jaffel L, Harris W, Bommier V, et al. Predictions on the application of the Hanle effect to map the surface magnetic field of Jupiter [J]. *Icarus*, 2005, 178(2): 297-311.
- [30] Meng Meiniang, Sun Xiaohui. A revisit to the optical starlight polarization catalogue by heiles: Distance update [J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2021, 62(1): 31-38. (in Chinese)
- [31] Martin P G, Clayton G C, Wolff M J. Ultraviolet interstellar linear polarization V Analysis of the final data set [J]. *The Astrophysical Journal*, 1999, 510(2): 905.
- [32] Li Moping, Zhao Gang, Li Aigen. Interstellar dust: Current status and perspectives [J]. *Progress in Astronomy*, 2006, 24(3): 260-276. (in Chinese)
- [33] Xue Mengyao, Jiang Biwei, Gao Jian. Interstellar extinction in the magellanic clouds [J]. *Progress in Astronomy*, 2014, 32(2): 194-209. (in Chinese)
- [34] Wang Yuxi, Gao Jian, Jiang Biwei, et al. The extinction laws and dust properties of the milky way and external galaxies [J]. *Progress in Astronomy*, 2018, 36(3): 283-305. (in Chinese)
- [35] Calvert J, Griner D, Montenegro J, et al. An ultraviolet polarimeter for the solar maximum mission [J]. *Optical Engineering*, 1979, 18(3): 287-290.
- [36] Woodgate B E, Tandberg-Hanssen E A, Bruner E C, et al. The ultraviolet spectrometer and polarimeter on the solar maximum mission [J]. *Solar Physics*, 1980, 65: 73-90.
- [37] Tsuzuki T, Ishikawa R, Kano R, et al. Optical design of the chromospheric layer spectro-polarimeter (CLASP2) [C]//Space Telescopes and Instrumentation 2020: Ultraviolet to Gamma Ray, SPIE, 2020, 11444: 1088-1099.
- [38] Russell E E, Watts L A, Pellicori S F, et al. Orbiter cloud

- photopolarimeter for the pioneer venus mission [C]//Optical Polarimetry: Instrumentation and Applications, SPIE, 1977, 112: 28-44.
- [39] Keyes C D, Koratkar A P, Dahlem M, et al. Faint object spectrograph instrument handbook [D]. US: HST Instrument Handbook, 1995.
- [40] Somerville W B, Allen R G, Carnochan D J, et al. Ultraviolet interstellar polarization observed with the hubble space telescope [J]. *The Astrophysical Journal*, 1994, 427: L47-L50.
- [41] Nordsieck K H, Code A D, Anderson C M, et al. Exploring ultraviolet astronomical polarimetry: Results from the wisconsin ultraviolet photo-polarimeter experiment (WUPPE) [C]//X-Ray and Ultraviolet Polarimetry, SPIE, 1994, 2010: 2-11.
- [42] Stenflo J O, Biverot H, Stenmark L. Ultraviolet polarimeter to record resonance-line polarization in the solar spectrum around 130–150 nm [J]. *Applied Optics*, 1976, 15(5): 1188-1198.
- [43] Harne R J. Astronomical capabilities of the faint object spectrograph on space telescope [C]//NASA Conference Publication. 1982, 2244: 55-75.
- [44] Taylor M, Code A D, Nordsieck K H, et al. First ultraviolet spectropolarimetry of hot supergiants [J]. *The Astrophysical Journal*, 1991, 382: L85-L88.
- [45] Harris W M, Nordsieck K H, Scherb F, et al. UV photopolarimetric imaging of C/1995 O1 (hale-bopp) with the wide field imaging survey polarimeter (WISP) [J]. *Earth, Moon, and Planets*, 1997, 78: 161-167.
- [46] Feller A, Gandorfer A, Iglesias F A, et al. The SUNRISE UV spectropolarimeter and imager for SUNRISE III [C]//Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VIII, SPIE, 2020, 11447: 2260-2267.
- [47] Pertenais M, Neiner C, et al. Optical design of Arago's spectropolarimeter [C]//International Conference on Space Optics-ICSO 2016, SPIE, 2017, 10562: 658-664.
- [48] Pertenais M, Neiner C, Petit P. Full-Stokes polychromatic polarimeter design for Arago [C]//Space Telescopes and Instrumentation 2016: Ultraviolet to Gamma Ray, SPIE, 2016, 9905: 959-966.
- [49] Muslimov E, Bouret J C, Neiner C, et al. POLLUX: A UV spectropolarimeter for the LUVUOIR space telescope project [C]//Space Telescopes and Instrumentation 2018: Ultraviolet to Gamma Ray, SPIE, 2018, 10699: 33-45.
- [50] Muslimov E, Bouret J C, Neiner C, et al. Precision requirements for the POLLUX-LUVUOIR spectropolarimeter [C]//Space Telescopes and Instrumentation 2020: Ultraviolet to Gamma Ray, SPIE, 2020, 11444: 1050-1059.
- [51] Gal M L, Ariste A L, Neiner C. A far ultra-violet polarimeter by reflection for pollux on board LUVUOIR [J/OL]. [2019-07-29]https://arxiv.org/abs/1907.12281
- [52] Bouret J C, Neiner C, de Castro A I G, et al. The science case for POLLUX: A high-resolution UV spectropolarimeter onboard LUVUOIR [C]//Space Telescopes and Instrumentation 2018, Ultraviolet to Gamma Ray, SPIE, 2018, 10699: 851-861.
- [53] Peter H, Abbo L, Andretta V, et al. Solar magnetism eXplorer (SolmeX) exploring the magnetic field in the upper atmosphere of our closest star [J]. *Experimental Astronomy*, 2012, 33: 271-303.
- [54] Scowen P A, Gayley K, Ignace R, et al. The polstar high resolution spectropolarimetry MIDEX mission [J]. *Astrophysics and Space Science*, 2022, 367(12): 121.
- [55] Andersson B G, Clayton G C, Doney K D, et al. Ultraviolet spectropolarimetry with Polstar: Interstellar medium science [J]. *Astrophysics and Space Science*, 2022, 367(12): 127.
- [56] Keski-Kuha R A M, Larruquert J I, Gum J S, et al. Optical coatings and materials for ultraviolet space applications [C]//Ultraviolet-Optical Space Astronomy Beyond HST. 1999, 164: 406.
- [57] Sembach K, Beasley M, et a. Technology investments to meet the needs of astronomy at ultraviolet wavelengths in the 21st century [C]//Astro 2010 Technology Development White Paper, 2009.
- [58] Wang F, Li S, Zhou H, et al. Al mirrors in vacuum ultraviolet region [C]//Optical Design and Testing IX, SPIE, 2019, 11185: 70-75.
- [59] Quijada M A, de Marcos L V R, Del Hoyo J G, et al. Advanced Al mirrors protected with LiF overcoat to realize stable mirror coatings for astronomical telescopes [C]//Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation V, SPIE, 2022, 12188: 674-682.
- [60] Wang J, Zhang J, Jiao H, et al. The reflectance of the Al+ MgF2 film in the far-ultraviolet [C]//Optical Interference Coatings. Optica Publishing Group, 2019.
- [61] Nordsieck K H, Code A D, Meade M R, et al. The wisconsin ultraviolet photo-polarimeter experiment (WUPPE) [C]//Bulletin of the American Astronomical Society, 1991.
- [62] Windt D L. EUV multilayer coatings for solar imaging and spectroscopy [C]//Solar Physics and Space Weather Instrumentation VI, SPIE, 2015, 9604: 161-172.
- [63] Qi Runze, Zhang Jinlong, Wu Jiali, et al. Thin film optical elements in extreme ultraviolet and vacuum ultraviolet [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(11): 1134003. (in Chinese)
- [64] Zhang Lichao. Progress in EUV multilayer coating technologies [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2010, 3(6): 554-565. (in Chinese)

- [65] Qi Runze, Zhang Jinlong, Huang Qiushi, et al. Research progress of multilayer optical elements in extreme ultraviolet and vacuum ultraviolet [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(21): 2639-2654. (in Chinese)
- [66] Iglesias F A, Feller A. Instrumentation for solar spectropolarimetry: State of the art and prospects [J]. *Optical Engineering*, 2019, 58(8): 082417.
- [67] Hou Junfeng, Sun Yingzi, Lin Jiaben, et al. In situ calibration of the tunable liquid-crystal birefringent filter(Invited) [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2023, 52(5): 104-113. (in Chinese)
- [68] Hou Junfeng, Deng Yuanyong, Wang Dongguang, et al. Application and prospect of liquid crystal modulation technology in solar magnetic field detection [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2021, 38(3): 296-304. (in Chinese)
- [69] Hu Jianming, Zeng Aijun, Wang Xiangzhao. Method to measure phase retardation of wave plate based on photoelastic modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(11): 1681-1686. (in Chinese)
- [70] Jia Rong, Wang Feng, Liu Xiao. Design and experiment of time-sharing ultraviolet polarization imaging detection system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(2): 021105. (in Chinese)
- [71] Li Hao, Li Yuan, Hou Qi. Polarization imaging technology of near ultraviolet band in severe weather [J]. *Computer Measurement & Control*, 2023, 31(1): 230-236. (in Chinese)
- [72] Liu Biliu, Shi Jiaming, Zhao Dapeng, et al. Mechanism of infrared polarization detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 29(5): 777-781. (in Chinese)
- [73] Liu Ying, Li Zhigang, Li Futian. Polarization characteristic of Al+MgF₂ film at VUV [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2002, 22(5): 724-727. (in Chinese)
- [74] Liu Ying, Li Futian. Polarization characteristic of lif polarizer at UV-VUV spectral range [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2002, 22(4): 552-555. (in Chinese)
- [75] Zhou Jian, Zhou Yi, Ni Xinyue, et al. Research progress and applications of polarization integrated infrared photodetector [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2021, 50(5): 67-84. (in Chinese)
- [76] Li Xinkai. Calibration method research for time divided polarimetric imaging system [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2021. (in Chinese)
- [77] Dhez P. Polarizers and polarimeters in the X-UV range [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1987, 261(1-2): 66-71.
- [78] Gutiérrez-Luna N, Capobianco G, Malvezzi A M, et al. Multilayer beamsplitter polarizers for key UV-FUV spectral lines of solar polarimetry [J]. *Optics Express*, 2022, 30(16): 29735-29748.
- [79] Larruquert J I, Malvezzi A M, Rodríguez-de Marcos L, et al. Polarizers tuned at key far-UV spectral lines for space instrumentation [C]//EUV and X-ray Optics: Synergy between Laboratory and Space V, SPIE, 2017, 10235: 90-97.
- [80] Wang Xiaodan. Research on image processing technology based on wollaston prisms polarization camera [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2020.
- [81] Hardi P, Rochus P. Measuring magnetic field in the outer atmosphere-solar magnetism eXplorer (SolmeX) [C]//European Solar Physics Meeting (ESPM-13) in Rhodes, 2011.
- [82] Zhang Chong, Hu Jingpei, Zhou Ruyi, et al. Design and analysis of inverse polarization grating devices for deep ultraviolet light [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(3): 0301005. (in Chinese)
- [83] Shi Jingjing, Hu Yadong, Li Mengfan, et al. Research and accuracy verification of linear polarization measurement technology based on spectral modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(2): 141-150. (in Chinese)
- [84] Ji Haiyue, Li Shuang, Xiang Guanghui, et al. Research on information extraction of spectrum polarization measurement technology based on spatial amplitude modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(12): 0212003. (in Chinese)
- [85] Wang Guangming, Zhao Baosheng, Wei Peiyong, et al. The research of WSZ Extreme ultraviolet detector and the data acquisition circuits [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 12: 1823-1826. (in Chinese)
- [86] Huang Qiaolin. Aerospace Optical Remote Sensor CCD/CMOS Photoelectric Imaging Technology [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2021. (in Chinese)
- [87] Luo Lei, Tang Libin, Zuo Wenbin. Research progress in ultraviolet enhanced image sensors [J]. *Infrared Technology*, 2021, 43(11): 1023-1033. (in Chinese)
- [88] Zhang Mengjiao, Cai Yi, Jiang Feng, et al. Silicon-based ultraviolet photodetection: Progress and prospects [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(1): 19-37. (in Chinese)
- [89] Gao Guolong. Back-illuminated CCD device with integrated UV filter [J]. *Infrared*, 2002(10): 42. (in Chinese)
- [90] Hoenk M. Delta doping technology for UV photon counting detector arrays [C]//KISS Single Photon Counting Detectors Workshop, 2010.
- [91] Buchin M P. Low-light imaging-ICCD, EMCCD, and sCMOS compete in low-light imaging [J]. *Laser Focus World*, 2011, 47(7): 51.

[92] Rodríguez-de Marcos L V, Boris D R, Del Hoyo J, et al.
Advanced AlF₃-passivated aluminum mirrors for UV astronomy

[C]//Astronomical Optics: Design, Manufacture, and Test of
Space and Ground Systems III, SPIE, 2021, 11820: 1182005.

Advances in ultraviolet polarization detection for space astronomy

Shan Ruiyan, Dong Lianqing, Li Kang, Zhang Muyao, Zheng Guoxian, Zhang Zhuo, Yang Lixin, Shao Junjie

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

Abstract:

Significance In the realm of scientific advancement and national development, emerging space-based astronomical detection technologies play a pivotal role. Their high-precision observations afford unique opportunities, deepening our comprehension of the universe and propelling the forefronts of astrophysics and cosmology. These detections not only furnish indispensable data for the validation and development of theoretical models but also instigate the emergence of novel theories in fundamental physics. On the national scale, possessing advanced space-based astronomical detection capabilities not only underscores a nation's prowess in the scientific domain but also provides a crucial platform for nurturing high-caliber research talent. This, in turn, contributes to the nation's competitive edge on the global scientific stage. Therefore, the imperative nature of researching and developing novel space-based astronomical detection technologies is evident.

Progress This article delivers a comprehensive examination across three dimensions: the advancement of ultraviolet polarization space observations, the current global landscape of ultraviolet polarization payloads in both domestic and international contexts, and the pivotal technologies associated with ultraviolet polarization payloads. Addressing the progress in ultraviolet polarization space observations, the study elucidates the significance of ultraviolet polarization within the domains of solar physics, planetary science, and interstellar matter research. Furthermore, the article provides an overview of the prevailing global scientific research developments in this field. Concerning the development status of ultraviolet polarization payloads both at home and abroad, given the absence of relevant payloads in China, the emphasis is placed on introducing typical international space-based astronomical ultraviolet polarization payloads, elucidating their detection targets, and summarizing their prospective development directions. Regarding the key technologies associated with ultraviolet polarization payloads, the article synthesizes the performance indicators of both existing and planned astronomical ultraviolet polarization payloads. It is evident that contemporary ultraviolet polarization detection primarily hinges on the fusion of polarization and spectroscopic detection, and a singular ultraviolet polarization datum falls short of meeting the demands of astronomical observations. With escalating observational requisites, the necessity for heightened precision in spectral resolution and polarization measurement accuracy is underscored, thereby imposing heightened demands on ultraviolet polarization devices. Furthermore, given the concentration of ultraviolet radiation signals in the far-ultraviolet wavelength range in the cosmos, which exhibits weaker intensity compared to the visible and infrared bands, there exists a stringent requirement for high overall transmittance and detection efficiency of the system. Building upon these considerations, the article furnishes a

forward-looking and succinct perspective on specific key technologies and future directions across three focal areas of ultraviolet optical coatings, ultraviolet polarization systems, and ultraviolet detectors.

Conclusions and Prospects Following an in-depth analysis and synthesis of advancements in ultraviolet polarization space observations both at home and abroad, this review delineates current challenges in ultraviolet polarization detection. These challenges encompass suboptimal optical detection efficiency, subpar polarization measurement accuracy, and the high complexity and cost associated with device development. In response to these challenges, this study puts forth future development directions for space-based ultraviolet polarization detection technology. These directions encompass the exploration of cutting-edge coating technologies, such as Atomic Layer Deposition (ALD), advancements in the high-reflectance performance of multilayer reflective films, the application of emerging dynamic components like electro-optic modulators in the UV spectrum, the development of on-chip ultraviolet-sensitive polarization detectors, the expansion of ultraviolet solid-state detectors into the EUV wavelength range, enhancements in detector sensitivity, and the exploration of innovative ultraviolet detector technologies. This forward-looking perspective is geared towards not only addressing existing challenges but also propelling significant advancements in space-based ultraviolet polarization detection technology.

Key words: UV polarization; space polarization detection ; space astronomy

Funding projects: Jointly Constructed Collaborative Innovation Center for Deep Space Exploration - Annual Open Topic Project for the Year 2021(SKTC202101)