

文章编号: 0258-7025(2010)03-0696-07

基于液晶波片的近红外偏振分析器

张志勇^{1,2} 邓元勇^{1,2} 王东光^{1,2} 孙英姿^{1,2} 玄伟佳^{1,2}

(¹ 中国科学院国家天文台, 北京 100012; ² 中国科学院太阳活动重点实验室(国家天文台), 北京 100012)

摘要 应用偏振分析器精确测量太阳光的偏振状态, 并利用塞曼效应原理可以反演出太阳大气中的磁场形态, 进而可以研究太阳黑子、耀斑及日冕物质抛射(CME)等活动现象。近红外波段观测是太阳物理研究的前沿领域, 研制该波段偏振分析器可以获得比可见光更为丰富的信息, 有利于解决太阳物理的基本问题。用一片 $\lambda/2$ 与一片 1λ 可调相位延迟向列液晶波片(LCVR)组合, 作为电光调制系统, 并选用近红外波段消光比为 10^{-5} 的偏振片作为检偏器, 构成近红外偏振分析器。建立了精度为 $\pm 0.01\text{ }^\circ\text{C}$ 恒温控制系统。设计了电光调制方案, 并对液晶波片的相位延迟与驱动电压的对应关系进行了精确定标。误差分析表明该方案交叉串扰(crosstalk)可到 10^{-3} 量级, 满足设计需求; 与传统电光晶体 KD^*P 等相比, 液晶波片具有仅需低压调制、相位延迟连续可调、近红外波段透过率高、能够形成大口径等优势; 同时由于无需机械移动部件, 因而测量各斯托克斯(Stokes)参量间切换速度达到了毫秒量级, 比机械移动调制形式的速度提高了 2 个数量级, 从而可提高仪器测量的时间分辨率。

关键词 应用光学; 偏振分析器; 液晶波片; 近红外

中图分类号 TN216 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103703.0696

Near Infrared Polarimeter Based on Liquid Crystal Variable Retarders

Zhang Zhiyong^{1,2} Deng Yuanyong^{1,2} Wang Dongguang^{1,2} Sun Yingzi^{1,2} Xuan Weijia^{1,2}

¹National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China

²Key Laboratory of Solar Activity, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China

Abstract Measuring the polarization states of the sunlight with a polarimeter, one can obtain the magnetic field information in the solar atmosphere using the principle of Zeeman effect and study the solar activities such as sun spots, flares and coronal mass ejection (CME). Near infrared polarization measurement has been becoming the frontier and hot point in solar physics. Developing polarimeter at this wavelength can help us to get far more information than visible light and redound to resolving the basic problems of the solar physics. A newly developed near infrared Stokes polarimeter is presented in this paper. In this device, a $\lambda/2$ and a 1λ liquid crystal variable retarders (LCVRs) are employed as the electro-optical modulators and a near infrared polarizer whose extinction ratio is about 10^{-5} as the analyzer and the temperature control system can keep the temperature within $\pm 0.01\text{ }^\circ\text{C}$, which satisfies the system designs. Compared to the commonly used KD^*P electro-optical modulators, liquid crystal retarder can reach any retardation between 0 and maximum only with low modulating voltage and has better transmittance and lager aperture. Furthermore, without any movement units, the speed of alternating the Stokes parameters is significantly improved by 10^2 . And theoretical analysis shows that the crosstalk of this design is limited in the order of 10^{-3} .

Key words applied optics; polarimeter; liquid crystal variable retarder; near infrared

1 引 言

光偏振态的精确测量技术被广泛应用于物理学、生物学、医学以及信息科学等诸多研究领域^[1]。在太阳物理领域, 通过精确测量太阳光的偏振状态,

利用塞曼效应等原理可以精确反演出太阳大气中的磁场形态, 从而可以研究太阳黑子、耀斑及日冕物质抛射(CME)等活动现象, 对日地空间环境研究及灾害性空间天气监测和预报有着重要的意义。

收稿日期: 2009-04-17; 收到修改稿日期: 2009-07-08

基金项目: 国家自然科学基金天文联合基金(10778723, 10878016), 青年基金(10803012)和中国科学院国家天文台青年人才基金资助课题。

作者简介: 张志勇(1972—), 男, 博士, 工程师, 主要从事太阳光学仪器方面的研究。E-mail: polarimetry@163.com

导师简介: 邓元勇(1965—), 男, 博士, 研究员, 主要从事太阳物理及太阳观测仪器等方面的研究。E-mail: dyy@bao.ac.cn

近年来随着红外探测器技术的发展,红外太阳偏振观测以其不可取代的优越性,成为太阳物理研究的前沿和热点。例如美国 1.7 m 口径 NST^[2] 及 4 m 口径 ATST 望远镜计划^[3] 等项目,均以红外偏振测量作为主要科学目标。我国红外波段太阳偏振观测尚处于起步阶段,太阳物理学家提出了研制近红外磁像仪的计划,期望在太阳中高层大气磁场测量等前沿领域取得突破性进展。近红外偏振分析器就是该计划的关键技术之一。

地基太阳偏振观测首先需克服大气宁静度的影响,因此通常以快速调制的方法,采集多幅图像进行叠加处理。因此除偏振精度外,调制速度是偏振分析器另一重要指标。KD*P 晶体是可见光波段应用最为成熟的电光调制器件,其特点是光学响应快(微秒量级),目前已为国际上多台太阳磁场望远镜所采用。例如国家天文台怀柔基地的 35 cm 太阳磁场望远镜在偏振测量方面取得了巨大的成功^[4]。

但 KD*P 晶体近红外波段的透过率偏低,只有 80% 左右,而且没有成熟的市场供应,加工很不方便,很难实现大口径;此外,其视场效应、电极老化等问题以及需要几千伏的高压驱动等都给使用带来了不便。这些因素促使人们寻找新型调制元件取而代之^[5,6]。

近年来随着液晶(LC)技术的发展,由液晶材料制作的电光元件——液晶波片倍受关注。该元件最大优点是低压驱动和近红外波段有较好的透过率,且已实现商品化生产,使得终端使用极为方便。目前国内许多项目已经或计划将此项技术应用于偏振分析器中^[7~16]。本文选用两片可调谐向列液晶波片(LCVR)及一片近红外偏振玻璃研制一台偏振分析器,并建立了恒温控制系统,在此基础上对两应用波段进行了精确定标,误差分析显示交叉串扰(crosstalk)可达 10^{-3} 量级。

2 向列液晶波片原理及光电特性

所选用的美国 Meadowlark 公司的液晶波片,结构如图 1(a)所示。由熔融的硅材料(fused silica)制成的基底平行放置,间距约数微米。其间各向异性的向列液晶分子构成单轴双折射介质层。基底的内表面镀有氧化铟锡(ITO)导电膜,导电膜涂有绝缘的电介质层。电介质膜层上加工的微沟纹(micro-grooves)起到液晶分子配向作用,使分子长轴沿着沟纹方向排列。

液晶是介于液态和固态之间的相态,既具有液体的流动性又具有晶体的各向异性结构。不加驱动

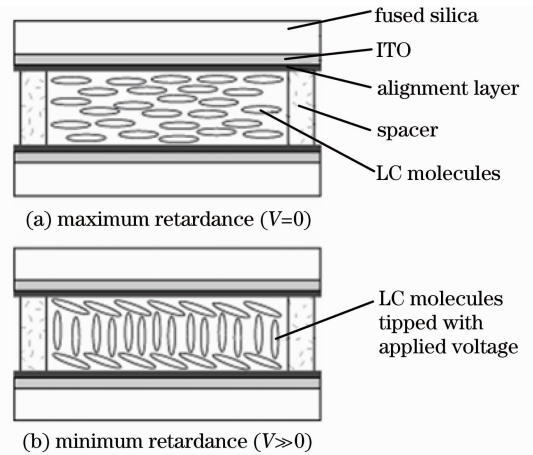


图 1 LCVR 结构与电压调制原理

Fig. 1 LCVR construction showing molecular alignment without (a) and with (b) applied voltage

电压时,棒状向列液晶分子沿长轴方向平行排列且平行于基底,液晶波片取得最大相位延迟值。液晶分子的长轴方向决定了 e 光轴的指向。在驱动电压的作用下,液晶分子长轴向外加电场的方向发生倾斜[如图 1(b)],相位延迟值随电压增加而减小。因而液晶波片相位延迟可通过改变驱动电压而实现连续可调,故向列液晶波片被称为“variable retarder”。由于液晶分子对外界电压极为敏感,所以驱动液晶波片仅需几伏到十几伏电压。

但因为贴近基底表面的液晶分子由于受到基底的限制而不能自由转动,所以随着电压的增加,延迟值不能减小至 0,因而通常采用一片塑料波片来补偿液晶波片剩余延迟值。

透过率曲线如图 2 所示,近红外波段均在 90%。所购波片通光口径大于 43 mm。响应速度在毫秒量级。温度升高时液晶波片的延迟值下降,变化率约为 $-0.4\% / ^\circ\text{C}$ 。液晶波片制作时,可以控制液晶层的厚度,从而可以制成真正的 0 级波片(true zero-order),因此液晶波片具有较宽的视场

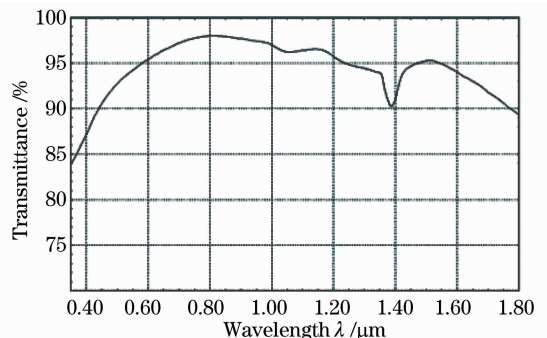


图 2 液晶波片透过率曲线

Fig. 2 Internal transmittance of LC variable retarder

(FOV)。液晶波片与 KD*P 性能参数比较如表 1 所示。

表 1 液晶波片与 KD*P 晶体的性能比较

Table 1 Comparison between LCVR and KD*P

	LCVR	KD*P
Transmittance /%	>90	~80
Thickness / μm	~1	(2~2.5) $\times 10^3$
Aperture /mm	>43	<40
Phys-chemical property	stable	liable to deliquesce
Processing	easy	difficult
Control voltage /V	~10	~ 1×10^3
Response time /s	~ 10^{-3}	~ 10^{-6}

3 偏振分析器方案及原理

3.1 偏振分析器构成

根据液晶波片的特性,购置了两片美国 Meadowlark 公司的近红外液晶波片及 D3040 电压控制器。两液晶波片的标称值分别为 $\lambda/2$ 和 1λ 。并购置德国 Codixx 公司近红外偏振片作为检偏器,其消光比可达 10^{-5} 。偏振分析器的构成如图 3 所示,两片液晶波片光轴方向分别置于 0° 和 45° ,检偏器透光轴位于 0° 方向。精确的定位与调整结构可以保证波片光轴的方位角精度在 $\pm 1'$ 。光路最前端的窄带前置滤光片起到限制通光带宽,同时也避免强烈阳光导致液晶波片损毁。D3040 电压驱动器可为两液晶波片同时提供独立控制,其电压分辨率可达 1 mV。用计算机程序来控制电压驱动器输出的电压波形,同时也将控制 CCD 的曝光速度与驱动电压调制速度保持同步。

为控制温度飘移,整个光路置于恒温控制系统

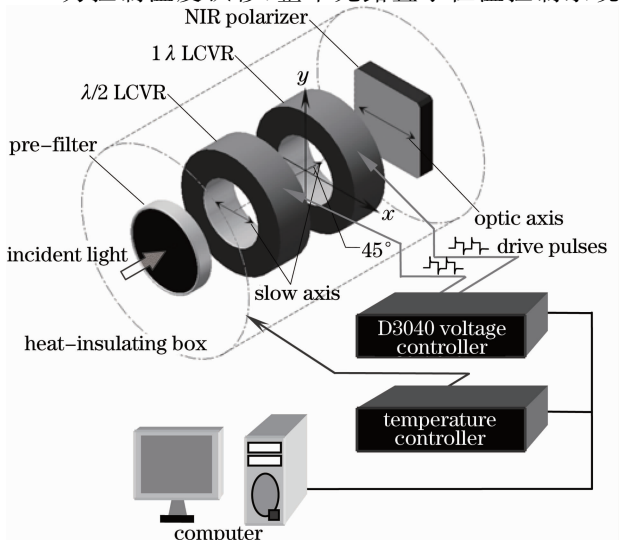


图 3 液晶偏振分析器构成示意图

Fig. 3 Sketch of liquid crystal polarimeter

内。恒温控制点设为 42°C ,略高于环境最高温度,以使恒温系统只需要加热装置,而不需要昂贵复杂的制冷装置。根据普朗克绝对黑体的辐射出射度公式, 42°C 恒温环境所辐射能量集中于中远红外 $3\sim 50\mu\text{m}$,而偏振分析器所处工作波段为 $1.0\sim 1.6\mu\text{m}$,其辐射出射度低于 10^{-4} 量级,与太阳辐射强度相比其影响可以忽略。

恒温控制系统如图 4 所示。以锰铜丝作为加热装置。电阻丝采用双线绕行以减少电磁场干扰。选用 Shimaden 公司 SR253 型比例积分微分 (PID) 调节器与单相无源数字调压器 (SPDR) 相配合,实现对交流电力的调压控制。实验表明,该控制系统精度可达 $\pm 0.01^\circ\text{C}$,保证偏振测量精度。

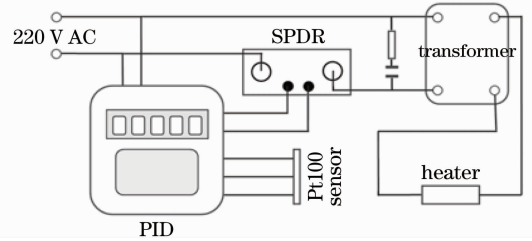


图 4 恒温控制系统示意图

Fig. 4 Sketch of temperature control system

3.2 偏振分析器调制方案

对本偏振分析器系统,其斯托克斯 (Stokes) 列向量可以表示为

$$\mathbf{S}_{\text{out}} = \mathbf{M}_p \cdot \mathbf{M}_{r2} \cdot \mathbf{M}_{r1} \cdot \mathbf{S}_{\text{in}}, \quad (1)$$

式中 \mathbf{S}_{in} 为入射光 Stokes 列向量,表示为 $\mathbf{S} = [I_{\text{in}} \quad Q_{\text{in}} \quad U_{\text{in}} \quad V_{\text{in}}]^T$; \mathbf{M}_{r1} , \mathbf{M}_{r2} 及 \mathbf{M}_p 分别为两液晶波片和偏振片 Muller 矩阵;则系统出射光强可以表示为

$$I_{\text{out}} = M_{11} \cdot I_{\text{in}} + M_{12} \cdot Q_{\text{in}} + M_{13} \cdot U_{\text{in}} + M_{14} \cdot V_{\text{in}}, \quad (2)$$

当考虑偏振片方位角为 0° , $\lambda/2$ LCVR 方位角为 0° 及 1λ LCVR 方位角为 45° 时,则各项系数为

$$M_{11} = \frac{1}{2}, M_{12} = \cos \varphi_2, M_{13} = -\sin \varphi_2 \cdot \sin \varphi_1,$$

$$M_{14} = -\sin \varphi_2 \cdot \cos \varphi_1,$$

式中 φ_1 与 φ_2 分别表示 $\lambda/2$ 及 1λ LCVR 的相位延迟。将上述各系数代入 (2) 式则有

$$I_{\text{out}} = \frac{I_{\text{in}}}{2} + \frac{Q_{\text{in}}}{2} \cdot \cos \varphi_2 - \frac{U_{\text{in}}}{2} \cdot \sin \varphi_2 \cdot \sin \varphi_1 - \frac{V_{\text{in}}}{2} \cdot \sin \varphi_2 \cdot \cos \varphi_1. \quad (3)$$

测量 Q 分量时,可令 $\varphi_1 = 0$, φ_2 在 0 与 π 两值间调制,代入 (3) 式,可见出射光强值分离出,为了区分起

见,分别用 I_{+Q} 和 I_{-Q} 表示两种延迟状态下的光强值:

$$I_{+Q} = \frac{I_{in}}{2} + \frac{Q_{in}}{2} \text{ 及 } I_{-Q} = \frac{I_{in}}{2} - \frac{Q_{in}}{2},$$

于是可以计算出归一化的 Q 分量为

$$Q_{in} = \frac{I_{+Q} - I_{-Q}}{I_{+Q} + I_{-Q}}, \quad (4)$$

同理,选择两液晶波片相应的调制方式,可以测量 V 分量与 U 分量。具体调制方案见表 2。

表 2 两液晶波片的调制方案

Table 2 Observational modes of the polarimeter based on LCVRs

$\lambda/2$ LCVR		1λ LCVR		Stokes parameters
Optical axis azimuth	Retardation	Optical axis azimuth	Retardation	
0°	0	45°	0	$-Q$
	0		π	$+Q$
	$\pi/2$		$\pi/2$	$+U$
	$\pi/2$		$3\pi/2$	$-U$
	0		$\pi/2$	$-V$
	0		$3\pi/2$	$+V$

与怀柔基地 35 cm 望远镜基于 KD^*P 调制的偏振分析器相比,上述液晶偏振分析器方案无需机械平移或转动部件,因而测量 Q, U 及 V 各分量之间的切换速度可以提高至毫秒量级,有效地提高了偏振分析器的时间分辨率;同时也减小了机械移动造成的误差。当考虑在多个波段观测需要时,由于液

晶波片相位延迟连续可调的特性,只需调整液晶波片的驱动电压,便可调整到相应工作波长所对应的延迟值。此外液晶波片为低压调制方式,这为未来空间磁场望远镜计划提供了新的思路。

4 液晶波片相位延迟驱动电压对应关系定标

液晶波片的相位延迟值与驱动电压一一对应。在实际应用中,仅能靠驱动电压来确定波片的延迟值,因而精确定标液晶波片相位延迟驱动电压对应关系对偏振测量精度至关重要。为此调研了延迟测量方法^[17,18],建立了高精度实验室偏振测量系统^[19,20],并用光强法及索来尔(Soleil)补偿器方法对液晶波片在观测所需要 1083.0 和 1564.85 nm 波段进行了精确定标。

定标系统如图 5 所示。以溴钨灯作为光源,配合以单色仪作为单色器。选用两格兰(Glan)棱镜作为起偏器和检偏器,可保证近红外波段的消光比需求。液晶波片连同恒温控制结构可放置于两正交 Glan 棱镜之间的精密转台上。NCL 是与单色仪配套的数据采集系统,计算机可以通过它实现对单色仪的控制,并记录测量数据。选用硫化铅及锁相放大器构成探测器系统。选用高精度近红外 Soleil 补偿器作为测量工具。

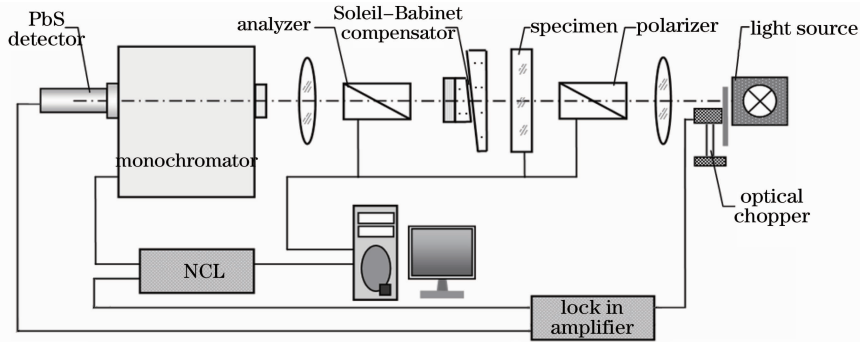


图 5 近红外波片测试系统仪器设备及光路图

Fig. 5 Schematic diagram of experimental apparatus and optical configuration for retardation measurements

为减少定标工作量,可先从透过率曲线初步确定范围。首先将 Soleil 补偿器移出光路,令待测液晶波片光轴置于与偏振器光轴夹角为 45° 的位置,此时系统出射光强满足规律

$$I = I_0 \sin^2 \frac{\varphi(\psi)}{2}. \quad (5)$$

改变液晶波片驱动电压,记录系统出射光强值随电压变化曲线。由(5)式可见,曲线最大值所对应

的相位延迟为 π ,最小值所对应的延迟为 0 或 2π ;而最小值与最大值中间的位置则对应的是 $\pi/2$ 或 $3\pi/2$ 。以 $\lambda/2$ 液晶波片为例,定标曲线如图 6,7 所示。图 6,7 中(a)图为 $0 \sim 10$ V 整体扫描结果,电压间隔 0.2 V;(b),(c)图分别为最大值和最小值附近小范围高分辨率扫描拟合曲线。扫描驱动电压间隔 0.05 V,每点数据为等时间间隔记录 200 个光强的平均值。

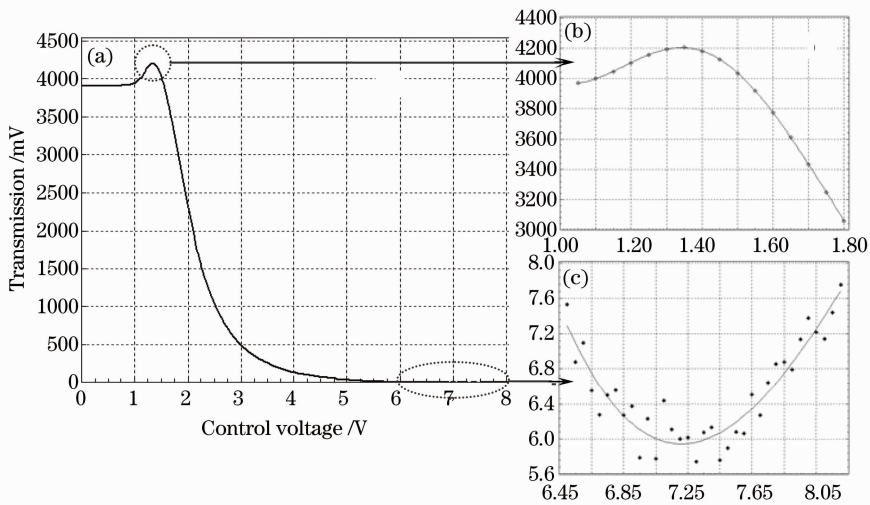


图 6 $\lambda/2$ LCVR 在波长 1564.85 nm 处的透过率随驱动电压的变化规律
Fig. 6 Relationship of transmission and voltage of $\lambda/2$ LCVR at 1564.85 nm

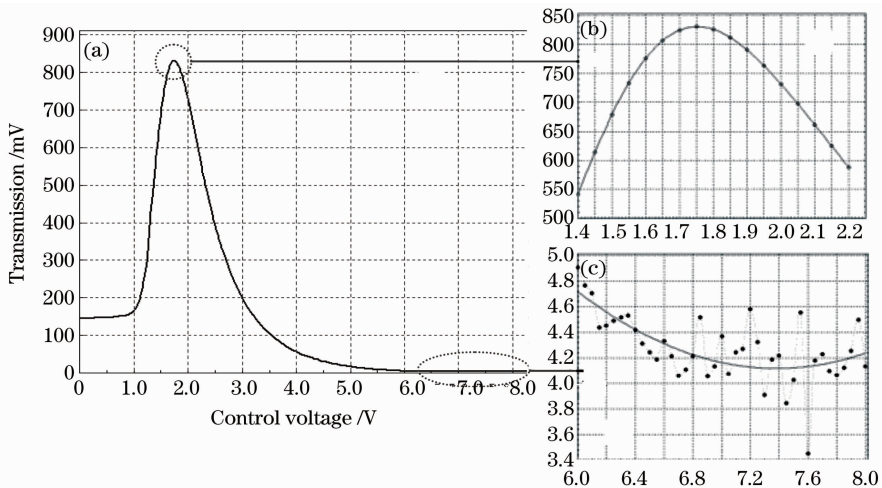


图 7 $\lambda/2$ LCVR 在波长 1083.0 nm 处的透过率随驱动电压的变化规律
Fig. 7 Relationship between transmission and voltage of $\lambda/2$ LCVR at 1083.0 nm

初步确定范围后再利用 Soleil 补偿器进行精确测定,定标结果见表3。由定标数据可见,液晶波片具有极高的延迟分辨率,比普通晶体波片或塑料波片至少高出 1 个数量级。

表 3 $\lambda/2$ LCVR 在波长 1564.85 和 1083 nm 处的 Soleil 补偿器精确标定相位延迟与驱动电压的对应关系
Table 3 Relationship of retardation and control voltage calibrated with Soleil compensator for $\lambda/2$ LCVR at 1564.85 and 1083.0 nm

	Wavelength /nm	Control voltage /V	Retardation /(°)	Wavelength /nm	Control voltage /V	Retardation /(°)
Neighborhood of 180°		1.344	180.13		1.751	180.16
		1.345	180.03		1.752	179.89
		1.346	179.89		1.753	179.79
Neighborhood of 90°	1564.85	2.059	90.09	1083.0	2.462	90.09
		2.060	90.01		2.463	90.02
		2.061	89.89		2.464	89.89
Neighborhood of 0		7.160	0.10		7.160	0.12
		7.180	0.030		7.180	0.022
		7.200	-0.050		7.20	-0.13

5 误差分析

偏振测量中主要误差是测量 Stokes 某一分量时,其他分量对它的交叉串扰,称其为 crosstalk。

存在 crosstalk 的主要原因在于实际的测试系统中,各偏振元件误差的必然存在。非理想偏振器的 Mueller 矩阵可以表示为

$$\mathbf{M}_p = t_x^2 \cdot \begin{bmatrix} 1 + \epsilon^2 & 1 - \epsilon^2 & 0 & 0 \\ 1 - \epsilon^2 & 1 + \epsilon^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2\epsilon & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\epsilon \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中 $\epsilon^2 = \left(\frac{t_y}{t_x}\right)^2$ 为该偏振器的消光比。而任意延迟、任意方位角波片的 Mueller 矩阵则可以表示为

$$\mathbf{M}_r = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2(2\Omega) + \sin^2(2\Omega) \cdot \cos \varphi & \cos(2\Omega) \cdot \sin(2\Omega) \cdot (1 - \cos \varphi) & -\sin(2\Omega) \cdot \sin \varphi \\ 0 & \cos(2\Omega) \cdot \sin(2\Omega) \cdot (1 - \cos \varphi) & \sin^2(2\Omega) + \cos^2(2\Omega) \cdot \cos \varphi & \cos(2\Omega) \cdot \sin \varphi \\ 0 & \sin(2\Omega) \cdot \sin \varphi & -\cos(2\Omega) \cdot \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中 Ω 表示光轴方位角, φ 表示延迟值。从而(2)式中 Stokes 各参量系数变为

$$M_{11} = 1 + \epsilon^2$$

$$M_{12} = (1 - \epsilon^2)[\cos^2(2\Omega_2) + \sin^2(2\Omega_2) \cdot \cos \varphi_2][\cos^2(2\Omega_1) + \sin^2(2\Omega_1) \cdot \cos \varphi_1] + (1 - \epsilon^2)\cos 2(\Omega_2) \cdot \sin(2\Omega_2) \cdot (1 - \cos \varphi_2)\cos(2\Omega_1) \cdot \sin 2(\Omega_1) \cdot (1 - \cos \varphi_1) - (1 - \epsilon^2)\sin(2\Omega_2) \cdot \sin \varphi_2 \cdot \sin(2\Omega_1) \cdot \sin \varphi_1$$

$$M_{13} = (1 - \epsilon^2)[\cos^2(2\Omega_2) + \sin^2(2\Omega_2) \cdot \cos \varphi_2]\cos(2\Omega_1) \cdot \sin(2\Omega_1) \cdot (1 - \cos \varphi_1) + (1 - \epsilon^2)\cos(2\Omega_2) \cdot \sin(2\Omega_2) \cdot (1 - \cos \varphi_2)[\sin^2(2\Omega_1) + \cos^2(2\Omega_1) \cdot \cos \varphi_1] + (1 - \epsilon^2)\sin(2\Omega_2) \cdot \sin \varphi_2 \cdot \cos(2\Omega_1) \cdot \sin \varphi_1$$

$$M_{14} = -(1 - \epsilon^2)[\cos^2(2\Omega_2) + \sin^2(2\Omega_2) \cdot \cos \varphi_2]\sin(2\Omega_1) \cdot \sin \varphi_1 + (1 - \epsilon^2)\cos(2\Omega_2) \cdot \sin(2\Omega_2) \cdot (1 - \cos \varphi_2) \cdot \cos(2\Omega_1) \cdot \sin \varphi_1 - (1 - \epsilon^2)\sin(2\Omega_2) \cdot \sin \varphi_2 \cdot \cos \varphi_1$$

按照前述各 Stokes 分量的测量方法,可知各分量的表示方法为

$$Q = (I_{+Q} - I_{-Q}) / (I_{+Q} + I_{-Q}) = \frac{Q_{in} \cdot \Delta M_{12}(\pm Q) + U_{in} \cdot \Delta M_{13}(\pm Q) + V_{in} \cdot \Delta M_{14}(\pm Q)}{I_{+Q} + I_{-Q}}, \quad (8)$$

$$U = (I_{+U} - I_{-U}) / (I_{+U} + I_{-U}) = \frac{Q_{in} \cdot \Delta M_{12}(\pm U) + U_{in} \cdot \Delta M_{13}(\pm U) + V_{in} \cdot \Delta M_{14}(\pm U)}{I_{+U} + I_{-U}}, \quad (9)$$

$$V = (I_{-V} - I_{+V}) / (I_{+V} + I_{-V}) = \frac{Q_{in} \cdot \Delta M_{12}(\mp V) + U_{in} \cdot \Delta M_{13}(\mp V) + V_{in} \cdot \Delta M_{14}(\mp V)}{I_{+V} + I_{-V}}. \quad (10)$$

如果近似认为 $I_+ + I_- \approx 2$,则(8)~(10)式中, $\Delta M_j/2(j=2,3,4)$ 能够反映偏振精度及各参量 crosstalk 的大小。将液晶波片延迟和方位角存在误差代入各式,对各系数的变化进行计算,可得到各单项误差对 crosstalk 的影响。将各单项误差综合考虑,结果见表 4。由数据可见设计方案的 crosstalk 可以控制在 10^{-3} 的量级,满足实际观测需求。

表 4 液晶波片延迟及方位角误差对偏振精度及 crosstalk 的影响

Table 4 Precision and crosstalk caused by the errors of retardation and azimuth of LCVRs

Errors	$\Delta M_{12}/2$	$\Delta M_{13}/2$	$\Delta M_{14}/2$
Error of retardation: 0.1°	Q -0.00116	0.000584	0.00174
Error of azimuth: $1'$	U 0.99995	0.99995	-0.00175
	V 0.0023	-0.00174	0.99995

6 结 论

采用液晶波片研制了工作在近红外波段1083.0及1564.85 nm的偏振分析器。该仪器仅通过对液晶波片的低压调制就可以完成各 Stokes 参量的测量, Q, U 及 V 各分量之间的切换速度可以提高至毫秒量级, 有效地提高了偏振分析器的时间分辨率。由于整个光路不需要机械平移或转动部件, 因而可以减小机械移动造成的误差。当考虑在多个波段观测需要时, 只需调整液晶波片的驱动电压, 便可调整到所需要工作波长所对应的延迟值。

对液晶波片的相位延迟与驱动电压的关系进行了精确定标, 定标数据可见液晶波片延迟的精度及延迟分辨率都远高出晶体波片及塑料波片, 其中延迟精度至少要提高1个数量级。

对该仪器进行了 crosstalk 分析, 结果表明设计方案的 crosstalk 可以控制在 10^{-3} 的量级, 满足实际需求。

参 考 文 献

- 1 Sun Yufen, Li Yinmei, Lou Liren. Optical rotation of crystal CaCO_3 micro-particle in optical tweezers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(3): 315~318
孙玉芬, 李银妹, 楼立人. 光阱中的 CaCO_3 晶体微粒的光致旋转[J]. *中国激光*, 2005, **32**(3): 315~318
- 2 Cao Wenda, C. J. Denker, Wang Haimin *et al.*. Characteristic evaluation of a near-infrared Fabry-Perot filter for the infrared imaging magnetograph (IRIM) [C]. *SPIE*, 2004, **5171**: 307~315
- 3 J. Wagner, T. R. Rimmele, S. Keil *et al.*. Advanced technology solar telescope: a progress report [C]. *SPIE*, **6267**: 626709
- 4 Ai Guoxiang, Hu Yuefeng. The $\text{KD}^* \text{P}$ modulator in the solar magnetic field telescope [J]. *Publications of the Beijing Astronomical Observatory*, 1986, **8**: 86~97
艾国祥, 胡岳风. 太阳磁场望远镜中 $\text{KD}^* \text{P}$ 光电调制器[J]. *北京天文台台刊*, 1986, **8**: 86~97
- 5 E. A. West. Extending the field of view of $\text{KD}^* \text{P}$ electrooptic modulators[J]. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(18): 3010~3013
- 6 L. J. November, L. M. Wilkins. Liquid crystal polarimeter: a solid state image for solar vector magnetic fields[J]. *Opt. Engng.*, 1995, **34**(6): 1659~1668
- 7 D. L. Mickey, R. C Canfield, B. J. Labonte *et al.*. The imaging vector magnetograph at haleakala [J]. *Solar Physics*, 1996, **168**(2): 229~250
- 8 T. Horn, A. Hofmann. Liquid crystal imaging stokes polarimeter [C]. *Third Advances in Solar Physics Euroconference: Magnetic Fields and Oscillations*, ASP Conference Series, 1999, **184**: 33~37
- 9 A. Hofmann. Liquid-crystal-based Stokes polarimeter [C]. *SPIE*, 2000, **4133**: 44~54
- 10 T. J. Spirock, C. Denker, J. Varsik *et al.*. Results from the big bear solar observatory's new digital vector magnetograph [C]. *American Geophysical Union, Spring Meeting*, 2001
- 11 H. Lin, J. R. Kuhn, R. Coulter. Coronal magnetic field measurements [J]. *The Astrophysical Journal*, 2004, **613**: L177~L180
- 12 S. Jakob. SST polarization model and polarimeter calibration [D]. Master Thesis, 2005, Stockholm Observatory
- 13 V. M. Pillet, M. Collados, J. Sánchez Almeida *et al.*. LPSP & TIP: full Stokes polarimeters for the canary islands [C]. *ASP Conference Series*, 1999, **18**: 264~272
- 14 M. Collados. High resolution spectropolarimetry and magnetography [C]. *ASP Conference Series*, 1999, **184**: 3~22
- 15 A. M. Gandorfer, H. P. Povel. First observations with a new imaging polarimeter [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1997, **328**: 381~389
- 16 Xu Chenglin, Qu Zhongquan, Zhang Xiaoyu *et al.*. Polarimeter with two ferroelectric liquid-crystal modulators attached to the Yunnan solar tower [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(33): 8428~8433
- 17 Hu Jianming, Zeng Aijun, Wang Xiangzhao. New method for measuring retardation of quarter-wave plate [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5): 659~662
胡建明, 曾爱军, 王向朝. 精确测量 $1/4$ 波片相位延迟量的新方法 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(5): 659~662
- 18 Wang Wei, Li Guohua, Wu Fuquan *et al.*. A new method of measuring wave plate phase delay and fast axis azimuth [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(12): 1121~1123
王 伟, 李国华, 吴福全等. 测量波片延迟量和快轴方位的新方法 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(12): 1121~1123
- 19 Sun Yingzi, Wang Dongguang, Zhang Hongqi *et al.*. Method and precision analysis for measuring retardation of infrared waveplate [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 685~688
孙英姿, 王东光, 张洪起等. 红外波片相位延迟的测试方法及精度分析 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(5): 685~688
- 20 Zhang Zhiyong, Deng Yuanyong, Wang Dongguang *et al.*. Comparison and analysis of several methods for measuring waveplate retardation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(11): 1678~1685
张志勇, 邓元勇, 王东光等. 几种波片测量方法的比较 [J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(11): 1678~1685