

基于光瞳分割和角剪切的成像偏振光谱技术

唐茜^{1)2)†} 赵葆常¹⁾ 邱跃洪¹⁾ 张淳民³⁾ 穆廷魁³⁾

1) (中国科学院西安精密机械研究所空间光学技术研究室, 西安 710119)

2) (中国科学院大学, 北京 100049)

3) (西安交通大学理学院, 非平衡物质结构及量子调控教育部重点实验室, 西安 710049)

(2012年5月18日收到; 2012年6月27日收到修改稿)

基于光瞳二分割及 Wollaston 棱镜角剪切、Savart 板横向剪切干涉的原理, 提出一种同时获取图像、偏振态及光谱信息的新技术. 装置没有任何机械运动部件和电调谐器件, 在单一面阵探测器的四个分区同时获得四种线偏振态的干涉图(两幅差分偏振光谱图), 系统工作在推扫模式. 在详细论述装置组成的基础上, 从系统成像的原理出发, 深入分析了系统中棱镜主截面方位角的相互位置关系对输出光强的影响, 并对系统参数进行了优化, 推导出干涉条纹强度分布的表达式, 并利用计算机数值仿真, 验证了方案的准确性和可行性. 为新型成像光谱仪的设计和工程化应用提供了重要的理论依据和实践指导.

关键词: 新型光学传感技术, 成像偏振光谱技术, Wollaston 棱镜, Savart 板

PACS: 07.60.Rd, 42.25.Ja, 07.60.Ly, 42.25.Lc

1 引言

光学传感器是人眼功能的延伸, 可探知许多人眼不能直接感知的信息, 它们的出现大力推动了人类社会的进步. 成像仪、光谱仪和偏振仪是目前较常用的光学传感器. 成像仪用于记录物体的形状信息; 光谱仪根据不同物质所特有的发射、反射或透射光谱获取与颜色相关的信息, 所获取的信息更加丰富, 因此光谱特性成为识别物体的又一重要手段^[1,2]. 偏振仪克服了人眼不能识别偏振态的缺点, 所获得的偏振信息与物体表面结构、表面粗糙度等特性密切相关, 在很多领域特别是在大气探测中有重要应用价值^[3-7]. 最初成像仪、光谱仪和偏振仪是各自独立研发的, 它们提供了不同的光学信息, 各有特色又相互关联. 随后出现了成像光谱仪^[8-10]、偏振成像仪^[11-15]与偏振光谱仪^[16,17]等设备. 如今研发同时具备三者功能的设备已成为热门研究课题^[18-21]. 其中基于声光可调谐滤波器(acousto-optic tunable filter, AOTF)的成像光谱技术较为常见^[22,23], 该方案的优点是采用电调谐获

得光谱, 调谐速度快且工作模式灵活, 但它尺寸小且只能得到两束出射夹角较小的正交偏振光, 光束分离上有一定技术难度, 目前多数方案只利用其中一路光束, 从而限制了它的发展. 另一种方案是通道偏振光谱技术^[24,25], 它可以同时获得图像、光谱与完备的偏振信息, 但是该方案光谱分辨率受限, 且各通道间存在干扰. 两种方案的局限性决定了其工程应用受到极大的限制.

为了增强偏振成像光谱的实用性, 在丰富目标信息的基础上, 简化系统结构, 提高系统稳定性, 进而拓展其应用范围. 本文在传统偏振成像光谱仪的基础上提出了一种无需运动器件, 可同时获取七维目标信息的新原理方案. 该方案通过将光瞳二分割与 Wollaston 棱镜角剪切相结合, 后接一台光谱仪, 获取了包括两维空间信息, 一维光谱信息及四维偏振信息的七维目标信息. 在详细论述装置组成的基础上, 从系统的成像原理出发, 通过分析和计算, 推导出了干涉条纹的强度分布公式, 研究了系统中棱镜的主截面相互位置关系对输出光强的影响, 对系统参数进行了优化, 并利用计算机仿真, 验证了方案的可行性. 该方案将一个大面积 CCD 分为四个

† E-mail: tang.qian@126.com

象限,同时得到四个不同线偏振方向的光谱图像.信息直观,且无运动部件,在工程应用中有广泛的前景.

2 方案及原理

2.1 方案描述

为使方案及其原理清晰易懂,以 Savart 板横向剪切偏振干涉成像光谱仪^[25,26]为例进行说明.

装置由如下四部分组成:前置光学系统、偏振光谱模块、成像系统及 FPA 焦平面阵列.前置光学系统的作用是提供一个平行光区,可用于无焦的望远系统,也可用准直光对近距离目标进行探测.需要在系统的一次像面上放置一个视场光阑或狭缝,尺寸需与 CCD 匹配,其工作模式分别相当于空间调制的干涉成像光谱仪^[27,28]和对应混合调制的干涉成像光谱仪^[29];偏振光谱模块是本装置核心部件,包括 Wollaston 棱镜、Savart 板以及分析器.成像光学系统在一个四分区的焦平面阵列上产生具有空间分辨的四幅不同线偏振态的干涉图,经傅里叶变换即可得到目标的偏振光谱.仪器工作在推扫模式,可适用于航空航天等飞行器的自推扫测量.对于静止目标仅需在传感器前增加一块一维转镜即可.

图 1(a) 为 Savart 板的结构示意图,图 1(b) 为偏振/光谱模块方案示意图.重点介绍了偏振/光谱核心部件,它工作在平行光路中(图中没有给出前置光学系统),采用光瞳二分割的方法将其分成结构形状相似,但偏振态配置不同的上下两部分.方案中,上下两个 Wollaston 棱镜形状尺寸相似,各由左右两块以偏振晶体为材料的棱镜胶合而成,为了得到上述四种不同的偏振态,其主截面方向各不相同^[30].这里使用具有角剪切特性的 Wollaston 棱镜取代了传统偏振干涉成像光谱仪中的起偏器,上、下两个 Wollaston 棱镜分别为 W_1, W_2 . W_1 左右两个棱镜的主截面方向分别与 X 轴成 $0^\circ, 90^\circ$,将入射光剪切为偏振方向与 X 轴成 $0^\circ, 90^\circ$ 的正交线偏振光, W_2 左右两个棱镜的主截面方向分别与 X 轴成 $45^\circ, -45^\circ$,将入射光剪切为偏振方向与 X 轴成 $45^\circ, -45^\circ$ 的正交线偏振光,从而得到四束空间分离的不同线偏振态的光; S_1 的配置相当于将图 1(a)

中 Savart 板沿中心轴旋转 45° ,则它的两个主截面在 X - Y 面上的投影分别与 X 轴成 $45^\circ, -45^\circ$,等效于一个 45° 与一个 -45° 的线偏振器.从 Savart 板出射的两束光横向剪切方向平行于 Y 轴, A_1 的透光轴与 X 轴成 90° 夹角; S_2 是补偿型 Savart 偏光镜,其结构如图 1(c) 所示,由两块厚度相等的单轴晶体之间加入消色散半波片制成^[31].其左右两板的主截面均平行于 Y - Z 面,且光轴相互垂直.半波片的快轴与 X 轴夹角 45° ,则由左板出射的线偏振光的振动面均以 Z 轴为中心旋转 90° (即线偏振方向为 X_{\parallel} 与 X_{\perp} 的光经过半波片后,成为 X_{\perp} 与 X_{\parallel} 方向的线偏振光)后入射到右板. S_2 等效于一个 0° 与一个 90° 的线偏振器,两束出射光横向剪切方向平行于 Y 轴; A_2 的透光轴与 X 轴夹角为 -45° .

图 1(c) 是 S_2 的结构图.需要说明的是,为使读者便于视图,图 1(c) 是一幅夸张的放大图,实际结构中半波片的厚度远小于 Savart 板偏光镜左右两板厚度,在透镜成像时,其产生的光程可忽略不计,因此在其对应的 S_1 中不需加入补偿光程的器件.

图 1(d) 是上半部分的俯视图. $l_{W_{11}}, l_{W_{12}}$ 分别表示经 Wollaston 棱镜角剪切后从 W_1 出射的两束正交线偏振光, $l_{S_{111}}, l_{S_{112}}$ 分别表示光线 $l_{W_{11}}$ 经 Savart 板被横向剪切后的两束出射光,它们之间有一定的光程差.由于这两束光的横向剪切方向平行于 Y 轴,因此它们在俯视图中重合. $l_{S_{121}}, l_{S_{122}}$ 则分别表示光线 $l_{W_{12}}$ 经 Savart 板剪切后的两束出射光. $l_{A_{111}}, l_{A_{112}}$ 分别表示光线 $l_{S_{111}}, l_{S_{112}}$ 经检偏器后出射的具有相同振动方向的两束光,相同的振动方向使它们满足干涉条件^[32]. $l_{A_{111}}, l_{A_{112}}$ 则分别表示光线 $l_{S_{121}}, l_{S_{122}}$ 经检偏器出射的两束光,它们的振动方向相同.

2.2 Wollaston 棱镜及 Savart 板的主截面与检偏器透光轴的方位关系分析

图 2 为 Wollaston 棱镜、Savart 板、检偏器三者透过光束振动方向关系图.由于发生干涉的两束光的光程差是由 Savart 板产生的,为便于讨论,设 Savart 板的两个主截面方位分别与 X 轴, Y 轴平行; Wollaston 棱镜的主截面方位与 X 轴夹角为 θ_1 和 $\theta_1 + 90^\circ$; 检偏器的透光轴方向与 X 轴的夹角为 θ_2 .

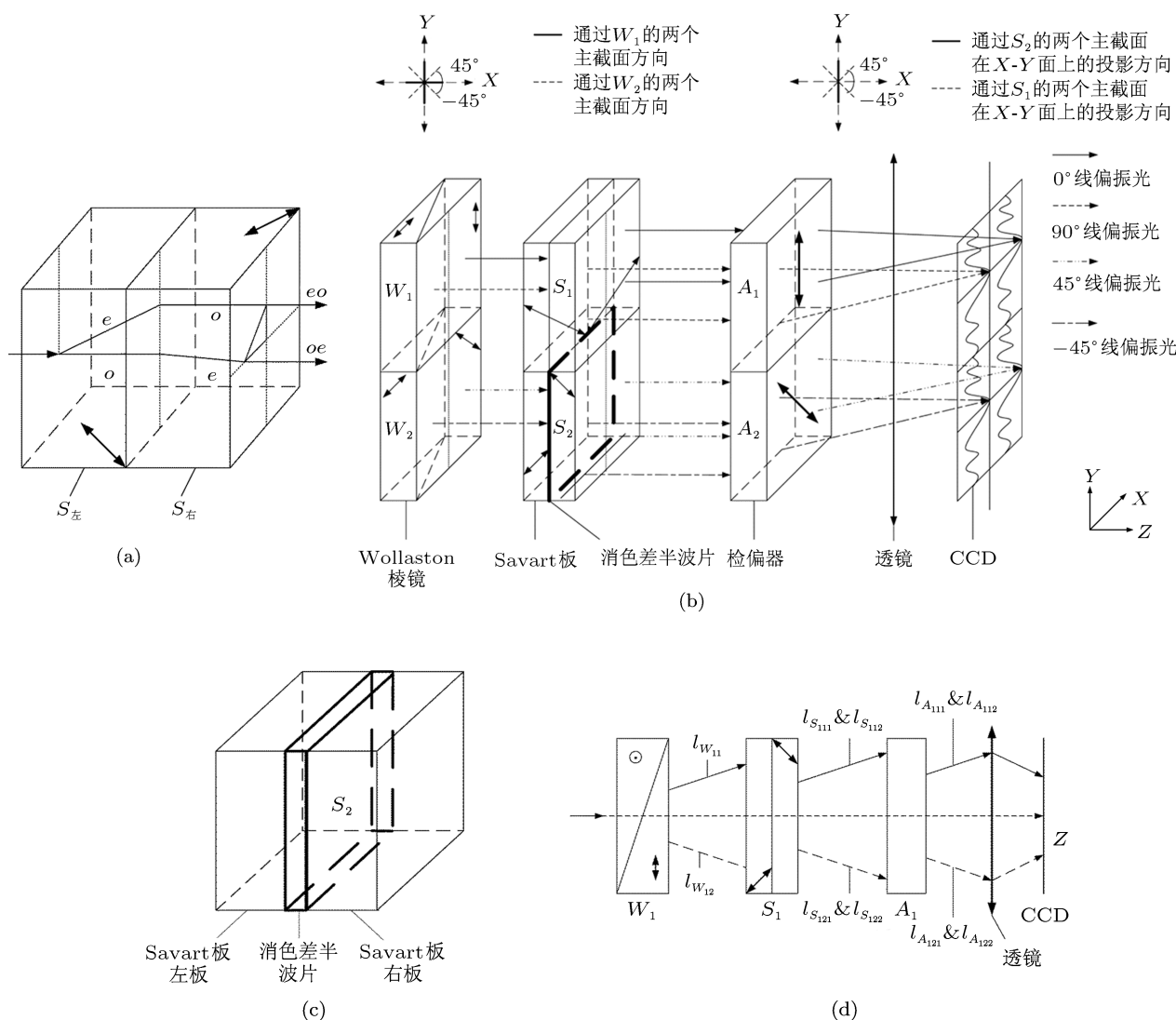


图1 (a) savart板结构图; (b) 偏振/光谱模块的方案示意图; (c) Savart板 S_2 的放大图; (d) 图1(b)中上半部分的俯视图(产生与 X 轴成 $0^\circ, 90^\circ$ 线偏振的光路)

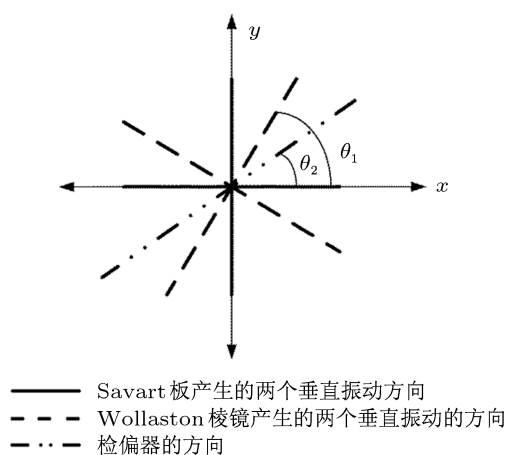


图2 Wollaston棱镜、Savart板、检偏器三者透过光束振动方向关系图

由于 Wollaston 棱镜所产生的两束线偏振光的振动方向分别与组成该棱镜的左右两个棱镜的主

截面平行, 因此两束出射光的偏振方向分别为 θ_1 和 $\theta_1 + 90^\circ$. 它们在经过其后的光学元件时原理是一样的, 因此不妨以偏振方向为 θ_1 的这束光线为例进行讨论. 假设入射光电矢量为

$$\mathbf{E}(t) = \begin{bmatrix} E_x(t) \\ E_y(t) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$E_x(t)$ 和 $E_y(t)$ 分别是 X 轴, Y 轴的瞬时电场分量. 偏振方向与 X 轴夹角为 θ 的线偏振器的琼斯矩阵为 [33]

$$\mathbf{J}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \cos^2 \theta \sin^2 \theta \\ \cos^2 \theta \sin^2 \theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix}. \quad (2)$$

经 Wollaston 棱镜出射的偏振方向为 θ_1 的光线经过 Savart 板则被分为 0° 和 90° 振动方向的两束光,

用公式表示为

$$E_1 = J_A(\theta_2)J_S(0^\circ)J_W(\theta_1)e^{i\varphi_1}\mathbf{E}(t), \quad (3a)$$

$$E_2 = J_A(\theta_2)J_S(90^\circ)J_W(\theta_1)e^{i\varphi_2}\mathbf{E}(t), \quad (3b)$$

φ_1, φ_2 分别为这两束光经过 Savart 板所产生的相位延迟. 将 (2) 式代入 (3a), (3b) 式:

$$E_1(t) = \cos\theta_1 \cos\theta_2 [E_x(t) \cos\theta_2 + E_y(t) \sin\theta_2] e^{i\varphi_2} \begin{bmatrix} \cos\theta_1 \\ \sin\theta_1 \end{bmatrix}, \quad (4a)$$

$$E_2(t) = \sin\theta_1 \sin\theta_2 [E_x(t) \cos\theta_2 + E_y(t) \sin\theta_2] e^{i\varphi_2} \begin{bmatrix} \cos\theta_1 \\ \sin\theta_1 \end{bmatrix}. \quad (4b)$$

干涉强度公式为

$$I = \langle \mathbf{E}^\dagger(t) \mathbf{E}(t) \rangle. \quad (5)$$

$E_1(t), E_2(t)$ 发生干涉, 在 CCD 上的光强为

$$I = \langle [E_1^\dagger(t) + E_2^\dagger(t)][E_1(t) + E_2(t)] \rangle, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} I &= [\cos^2\theta_1 \cos^2\theta_2 + \sin^2\theta_1 \sin^2\theta_2] \\ &\times [I_x \cos^2\theta_1 + I_y \sin^2\theta_1] \\ &+ \cos\theta_1 \cos\theta_2 \sin\theta_1 \sin\theta_2 \\ &\times [I_x \cos^2\theta_1 + I_y \sin^2\theta_1] \\ &\times (e^{i\varphi} + e^{-i\varphi}) \\ &= [\cos^2\theta_1 \cos^2\theta_2 + \sin^2\theta_1 \sin^2\theta_2] \\ &\times [I_x \cos^2\theta_1 + I_y \sin^2\theta_1] \\ &+ 2 \cos\theta_1 \cos\theta_2 \sin\theta_1 \sin\theta_2 \\ &\times [I_x \cos^2\theta_1 + I_y \sin^2\theta_1] \cos\varphi, \quad (7) \end{aligned}$$

式中 $I_x = \langle E_x^* E_x \rangle, I_y = \langle E_y^* E_y \rangle, \varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ 是两束光的相位差. (7) 式中有横线的部分 (式中第二项) 是与干涉相关的由相位差 φ 调制的强度项, 我们重点分析该部分的特性.

$$\begin{aligned} I_{\text{干涉}} &= 2 \cos\theta_1 \cos\theta_2 \sin\theta_1 \sin\theta_2 \\ &\times [I_x \cos^2\theta_1 + I_y \sin^2\theta_1] \cos\varphi \\ &= \frac{1}{2} \sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2 \\ &\times [I_x \cos^2\theta_1 + I_y \sin^2\theta_1] \cos\varphi \quad (8) \end{aligned}$$

首先确定 θ_1, θ_2 的取值范围, 它们可以在 $(-\infty, \infty)$ 取值, 但区间 $[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$ 即可代表所有的情况, 并且由 (8) 式可知, 当 θ_1, θ_2 为 0° 或 90° 时 $I_{\text{干涉}}$ 始终为 0, 无意义, 因此 $\theta_1, \theta_2 \in (-\frac{\pi}{2}, 0) \cup$

$(\frac{\pi}{2}, 0)$. 原理上 θ_1, θ_2 可以在这个范围内任意取值, 但是因为光路中光束是一分为二的, 到达 CCD 的光比较弱, 因此希望光能可以被最大化利用, 这就需要确定 θ_1, θ_2 在 $I_{\text{干涉}}$ 可以获得最大光强条件时的取值. 由 (8) 式可以很容易得出 θ_2 需为 $\pm 45^\circ$, 此时 $|\sin^2\theta_2| = 1$; 不妨以 $\theta_2 = 45^\circ$ 进行讨论, (8) 式变为

$$I_{\text{干涉}} = \frac{1}{2} \sin(2\theta_1) [I_x \cos^2\theta_1 + I_y \sin^2\theta_1] \cos\varphi, \quad (9)$$

式中

$$\begin{aligned} I_x \cos^2\theta_1 &= |E_x(t)|^2 \cos^2\theta_1 \\ &= |E(t)|^2 \cos^4\theta_1, \quad (10a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_y \cos^2\theta_1 &= |E_y(t)|^2 \cos^2\theta_1 \\ &= |E(t)|^2 \sin^4\theta_1. \quad (10b) \end{aligned}$$

将 (10a), (10b) 式代入 (9) 式, 得

$$\begin{aligned} I_{\text{干涉}} &= \frac{1}{2} \sin(2\theta_1) [\cos^4\theta_1 + \sin^4\theta_1] \\ &\times |E(t)|^2 \cos\varphi. \quad (11) \end{aligned}$$

对于确定的仪器参数, 任意瞬时的待测光 $I_{\text{干涉}}$ 与 $|E(t)|^2 \cos\varphi$ 成正线性关系, 其比例系数为 $1/2 \sin(2\theta_1) [\cos^4\theta_1 + \sin^4\theta_1]$. 因此 $I_{\text{干涉}}$ 的最大值就转化为 $1/2 \sin(2\theta_1) [\cos^4\theta_1 + \sin^4\theta_1]$ 的最大值. 对其求导使其为 0, 可得:

$$\cos(2\theta_1) [\cos^4\theta_1 + (\cos(2\theta_1))^2] = 0, \quad (12)$$

在取值区间内: $\cos(2\theta_1) = 0$ 的解为 $\theta_1 = \pm 45^\circ$; $\cos^4\theta_1 + (\cos(2\theta_1))^2 = 0$ 的解为 $\theta_1 = \pm 45^\circ$. 因此 $\theta_1 = \pm 45^\circ$; 当 $\theta_1 = \pm 45^\circ, \theta_2 = 45^\circ$ 时, $I = 1/4(I_x + I_y)(1 \pm \cos\varphi)$. 说明当起偏器 (Wollaston 偏振棱镜) 主截面与检偏器透光轴两者的方位与横向剪切偏振器件 (Savart 板) 的主截面为 $\pm 45^\circ$ 夹角时, 可得到可见度为 1 的干涉条纹. 在这种角度配置下, 可以更充分地利用光能.

2.3 上下通道最佳配置分析

图 3 中光线分别入射到 W_1, W_2 . 由于该并联储结构上下两部分光路是相似的, 因此为方便起见, 讨论时将 W_1, S, A 按照第二部分的分析结果 $45^\circ / -45^\circ, 0^\circ/90^\circ, 45^\circ$ 放置, 然后分析 W_2 的结构位置.

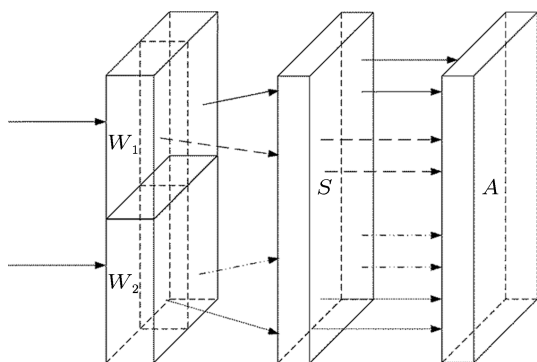


图3 两个 Wollaston 棱镜并联结构示意图

首先, W_2 的两个主截面方向不能与 W_1 相同, 因此不能为 $45^\circ/-45^\circ$; 另外, 由第二部分分析可知, W_2 的两个主截面方向也不能与 S 的主截面方向平行或垂直, 因此不能为 $0^\circ/90^\circ$; 最后, 在取值区间内除去上述几个角度, 其他角度均可行, 但是由于此时其与 S 的夹角不是 $\pm 45^\circ$, 即不能将光能最大化利用, 因而此方法不是最佳方案. 延续光瞳分割的思路将 S, A 也分成两部分 S_1, S_2, A_1, A_2 使其分别与 W_1, W_2 对应, 如图 1(b) 所示, W_1, W_2 左右两个棱镜的主截面与 X 轴分别成 $0^\circ, 90^\circ$ 和 $45^\circ, -45^\circ$, S_1 等效于一个 45° 与一个 -45° 的线偏振器, S_2 等效于一个 0° 与一个 90° 的线偏振器, A_1, A_2 通光轴方向与 X 轴分别成 90° 和 -45° .

2.4 干涉强度计算

2.4.1 $0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, -45^\circ$ 线偏振光光矢量计算

如图 1(b) 所示: Savart 板 S_1 是由两个主截面相互垂直、厚度相等的两块单轴晶体胶合而成, 假设它们两块的厚度均为 t , 则 Savart 板的总横向剪切量为^[34]

$$d_1 = \sqrt{2}t \frac{n_o^2 - n_e^2}{n_o^2 + n_e^2}, \quad (13)$$

则两干涉光束之间的相位差即为

$$\varphi_1(\lambda) = 2\pi \cdot d_1 \sin \theta \cdot \lambda, \quad (14)$$

其中 θ 为光线入射角.

1) 0° 线偏振光光矢量

$$\mathbf{E}_{0^\circ} = J_{A_1}(J_{S_{11}} + J_{S_{12}}e^{i\varphi_1})J_{W_{11}}\mathbf{E}(t), \quad (15)$$

将 (1) 式及各元件的琼斯矩阵代入 (15) 式可得:

$$\mathbf{E}_{0^\circ} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 + e^{i\varphi_1(\lambda)} & 1 - e^{i\varphi_1(\lambda)} \\ 1 - e^{i\varphi_1(\lambda)} & 1 + e^{i\varphi_1(\lambda)} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} & \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \\ & = \frac{E_x(1 - e^{i\varphi_1(\lambda)})}{2} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (16a)$$

2) 90° 线偏振光光矢量:

与 1) 同理可得:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{90^\circ} & = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 + e^{i\varphi_1(\lambda)} & 1 - e^{i\varphi_1(\lambda)} \\ 1 - e^{i\varphi_1(\lambda)} & 1 + e^{i\varphi_1(\lambda)} \end{bmatrix} \\ & \times \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \\ & = \frac{E_y(1 + e^{i\varphi_1(\lambda)})}{2} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (16b)$$

如图 1(c) 所示, Savart 板 S_2 在左右板之间加入了半波片, 假设两块板厚度均为 t , 则该 Savart 板的总横向剪切量为^[35]

$$d_2 = 2t \frac{n_o^2 - n_e^2}{n_o^2 + n_e^2}, \quad (18)$$

半波片对于 Savart 板左板产生的两束振动面相互垂直的线偏振光均产生了 π 的相位延迟, 对两者间相位差没有影响, 则发生干涉的两束光的相位差仍由横向剪切量决定:

$$\varphi_2(\lambda) = 2\pi \cdot d_2 \sin \theta \cdot \lambda. \quad (19)$$

3) 45° 线偏振光光矢量

$$\mathbf{E}_{45^\circ} = J_{A_2}(J_{S_{21}} + J_{S_{22}}e^{i\varphi_2})J_{W_{21}}\mathbf{E}(t). \quad (20)$$

将 (1) 式及各元件的琼斯矩阵带入 (19) 式

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{45^\circ} & = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\varphi_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \\ & = \frac{(E_x + E_y)(1 - e^{i\varphi_2})}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (16c)$$

4) -45° 线偏振光光矢量

与 3) 同理可得

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{-45^\circ} & = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\varphi_2} \end{bmatrix} \\ & \times \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$= \frac{(E_x - E_y)(1 + e^{i\varphi_2})}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}. \quad (16d)$$

2.4.2 $0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, -45^\circ$ 线偏振光干涉强度计算

由 (5) 式可得, 0° 线偏振光干涉强度为

$$\begin{aligned} I_{0^\circ} &= \langle \mathbf{E}_{0^\circ}^\dagger(t) \mathbf{E}_{0^\circ}(t) \rangle \\ &= [I_x(\lambda)/2] \cdot [1 - \cos \varphi(\lambda)]/2 \\ &= I_x(\lambda) \cdot [1 - \cos \varphi(\lambda)]/4. \end{aligned} \quad (20a)$$

与 0° 线偏振光同理得到 $90^\circ, 45^\circ, -45^\circ$ 线偏振光干涉强度为

$$\begin{aligned} I_{90^\circ} &= \langle \mathbf{E}_{90^\circ}^\dagger(t) \mathbf{E}_{90^\circ}(t) \rangle \\ &= [I_y(\lambda)/2] \cdot [1 + \cos \varphi(\lambda)]/2 \\ &= I_y(\lambda) \cdot [1 + \cos \varphi(\lambda)]/4. \end{aligned} \quad (20b)$$

$$I_{45^\circ} = \langle \mathbf{E}_{45^\circ}^\dagger(t) \mathbf{E}_{45^\circ}(t) \rangle$$

$$= [I_x(\lambda) + I_y(\lambda) + 2|\tilde{E}_x(t)\tilde{E}_y(t)| \cos \delta] \times [1 - \cos \varphi_2(\lambda)]/8, \quad (20c)$$

$$\begin{aligned} I_{-45^\circ} &= \langle \mathbf{E}_{-45^\circ}^\dagger(t) \mathbf{E}_{-45^\circ}(t) \rangle \\ &= [I_x(\lambda) + I_y(\lambda) - 2|\tilde{E}_x(t)\tilde{E}_y(t)| \cos \delta] \\ &\quad \times [1 + \cos \varphi_2(\lambda)]/8, \end{aligned} \quad (20d)$$

其中 $I_x(\lambda) = \langle \mathbf{E}_x^* \mathbf{E}_x \rangle$ 和 $I_y(\lambda) = \langle \mathbf{E}_y^* \mathbf{E}_y \rangle$ 分别对应入射光的平行和垂直偏振分量光谱图. $\tilde{E}_x(t), \tilde{E}_y(t)$ 分别为 $\mathbf{E}_x, \mathbf{E}_y$ 的振幅, δ 是 $\mathbf{E}_x, \mathbf{E}_y$ 之间的相位差. 对 (20a), (20b), (20c) 和 (20d) 式分别进行傅里叶变换和处理就可以反演出四个线偏振分量的光谱图像信息, $I_{0^\circ}(\lambda, x, y), I_{90^\circ}(\lambda, x, y), I_{45^\circ}(\lambda, x, y)$ 和 $I_{-45^\circ}(\lambda, x, y)$. 这四幅光谱图像之和即为传统成像仪所获得的图像, $I_{0^\circ}(\lambda, x, y)$ 与 $I_{90^\circ}(\lambda, x, y)$ 之差、 $I_{45^\circ}(\lambda, x, y)$ 与 $I_{-45^\circ}(\lambda, x, y)$ 之差则为差分偏振光谱图像.

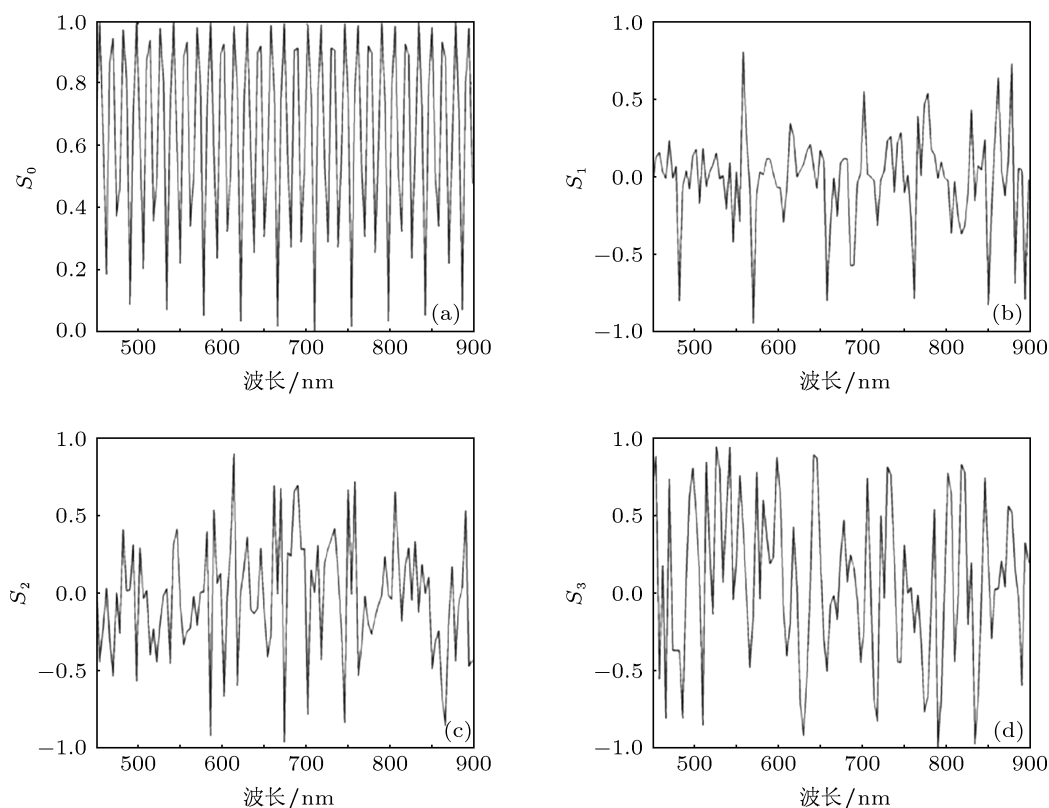


图4 输入光波的偏振光谱强度 $[S_0, S_1, S_2, S_3]$ 是相应的 Stokes 矢量的四个参量

3 计算机数值仿真

为不失一般性, 采用 Stokes 参量 $[S_0, S_1, S_2, S_3]$ 描述入射光, 则该入射光可以是单色光、复色光,

完全偏振光、部分偏振光或完全非偏振光^[36].

$$S_0 = I_x + I_y, \quad (21a)$$

$$S_1 = I_x - I_y, \quad (21b)$$

$$S_2 = I_{\pi/4} - I_{-\pi/4}, \quad (21c)$$

$$S_3 = I_R - I_L, \quad (21d)$$

S_0 是入射光总光强, S_1 是 X 方向线偏振光与 Y 方向线偏振光光强之差, S_2 是 $\pi/4$ 方向线偏振光

与 $-\pi/4$ 方向线偏振光光强之差, S_3 是左旋圆偏振光与右旋圆偏振光光强之差, 当入射光是完全偏振光时,

$$S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2. \quad (22)$$

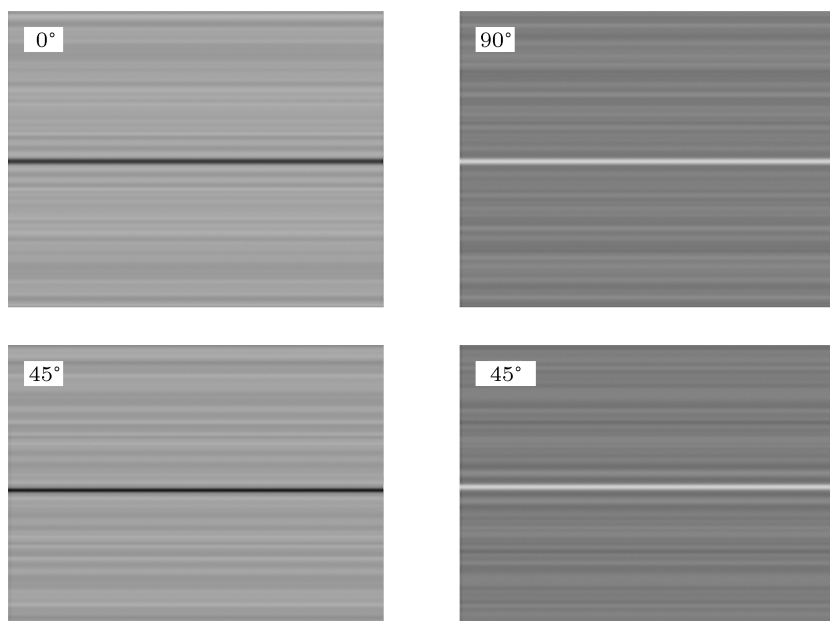


图5 CCD上四个分区得到的四个线偏振分量的干涉条纹图

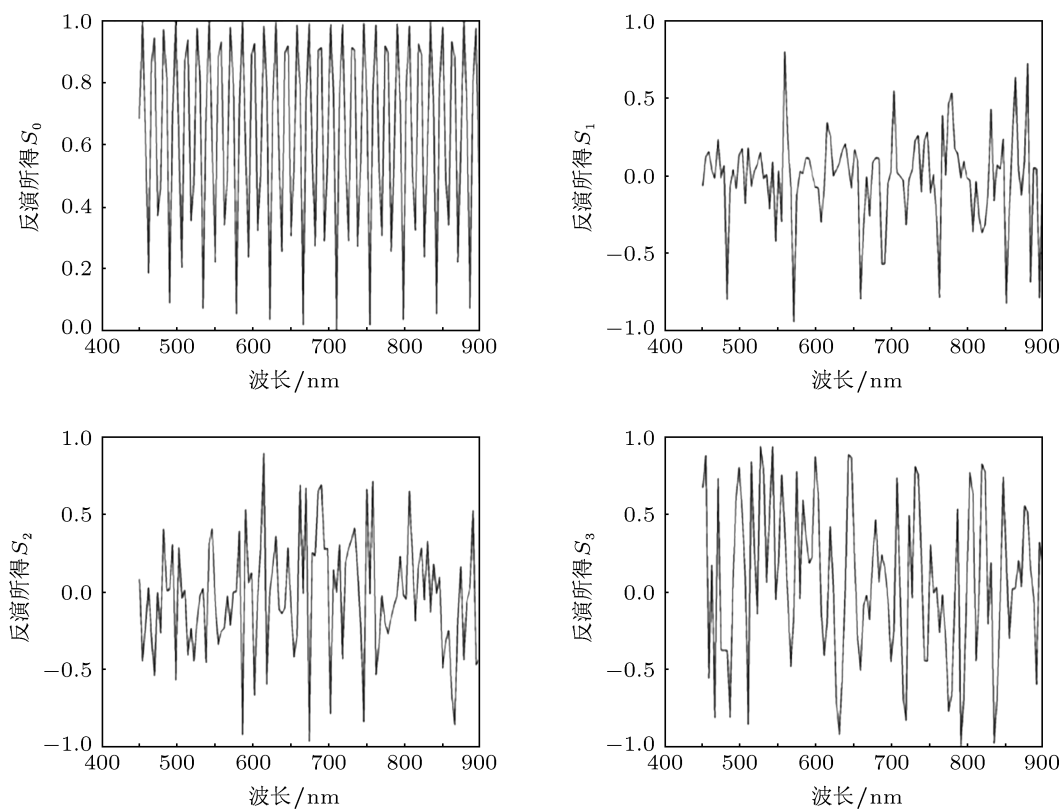


图6 反演的偏振光谱

系统设计参数为: 工作波段 11111.1 cm^{-1} — 22222.2 cm^{-1} (450 nm—900 nm), CCD 为 1024×1024 , 像元尺寸 $16 \mu\text{m} \times 16 \mu\text{m}$, $d/f = \left(\frac{1}{80}\right) \text{ rad}$ (d 为 Savart 板产生的横向剪切量, f 为照相物镜的焦距). CCD 四分区后, 各区的像元数为 512×512 :

最大光程差: $\text{OPD} = \pm 0.016 \text{ mm} \times 256 \times (1/80) = 0.0512 \text{ mm}$;

理论光谱分辨率: $\delta\sigma = \frac{1}{2 \times 0.00512 \text{ cm}} = 97.66 \text{ cm}^{-1}$;

干涉图采样间隔: $\delta x = 0.016/80 = 0.0002 \text{ mm} = 0.2 \mu\text{m} < \frac{1}{2\sigma_{\max}} = 0.24 \mu\text{m}$ 满足干涉成像光谱技术中的采样定律.

图 4 为假设的输入光波信号.

图 5 为 CCD 上四个分区所得到的输入光信号的四个线偏振分量的干涉条纹图. 将干涉光谱图反演就可以复原出输入光信号的偏振光谱图

图 6 为干涉强度图反演出的偏振光谱强度. 由图可见, 反演所得到的偏振光谱曲线与所假设的入射光的偏振光谱曲线符合良好, 说明该方案原理可行. 由于该仿真是在完全理想状态下进行的, 所以仿真结果与输入信号一致.

4 结论

本文基于光瞳二分割及 Wollaston 棱镜角剪切、Savart 板横向剪切干涉相结合的技术, 提出了

一种无需任何运动器件, 可同时获取目标的七维信息的偏振光谱成像技术. 通过理论分析和计算机仿真, 得到如下结论:

1) 利用琼斯矩阵和传递函数, 通过公式推导, 得到了系统输出光强的表达式;

2) 根据理论公式, 通过计算机仿真, 得到了 0° , $\pm 45^\circ$ 和 90° 四个偏振态的干涉图, 通过对干涉图进行傅里叶变换得到了与输入信号一致的四维偏振光谱图, 证明了该系统同时获取七维目标信息的可行性;

3) 通过深入分析系统中棱镜的方位角对输出光强的影响可知, 当起偏器 (上下两块 Wollaston 偏振棱镜) 主截面与检偏器透光轴两者的方位与横向剪切偏振器件 (Savart 板) 的主截面为 45° , -45° 夹角时, 可得到可见度为 1 的干涉条纹, 此时光能利用率最高.

该方法可以同时获取目标的四维偏振信息, 相对于传统的偏振成像光谱技术, 在获得更加丰富的目标信息的同时, 系统无需使用任何机械运动部件及电调谐器件, 具有良好的稳定性. 所得的结果可以在大面阵 CCD 的四个象限同时显示, 结果更直观. 可用于探测光谱偏振态快速变化的目标, 并且可以获得两幅差分偏振光谱图像, 从而获取散射目标的高对比度图像. 该项研究对于偏振干涉成像光谱技术的理论研究以及工程应用都有着重要的意义.

- [1] Tong Q X, Zhang B, Zheng L F 2006 (in Chinese) [童庆禧, 张兵, 郑兰芬 2006 高光谱遥感——原理、技术与应用 (第 1 版) (北京: 高等教育出版社) p19]
- [2] Jones J C 2011 *Ph. D. Dissertation* (Tucson: The University of ARIZONA)
- [3] Hough J H 2007 *J. Quant. Spec. Rad. Trans.* **106** 122
- [4] Liu N, Zhang C M, Wang J C, Mu T K 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4369 (in Chinese) [刘宁, 张淳民, 王金蝉, 穆廷魁 2010 物理学报 **59** 4369]
- [5] Bu Z C, Zhang C M, Zhao B C, Zhu H C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2415 (in Chinese) [步志超, 张淳民, 赵葆常, 朱华春 2009 物理学报 **58** 2415]
- [6] Ruan K, Zhang C M, Zhao B C 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5435 (in Chinese) [阮锴, 张淳民, 赵葆常 2008 物理学报 **57** 5435]
- [7] Ye J Y, Zhang C M, Zhao B C, Li Y C 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 0067 (in Chinese) [叶剑勇, 张淳民, 赵葆常, 李英才 2008 物理学报 **57** 0067]
- [8] Buijs H, Rochette L, Chateaufort F 2004 *Proc. SPIE* **5269** 132
- [9] Silverglate P, Fort D 2003 *Proc. SPIE* **5159** 283
- [10] Schweitzer D, Hammer M, Scibor M 1996 *Ophth. Res.* **28** 37
- [11] Bajor A 1994 *Proc. SPIE* **2265** 431
- [12] Jaronski J W, Kasprzak H T 1999 *Proc. SPIE* **3745** 86
- [13] Kudenov M W, Pezzaniti J L, Gerhart G R 2009 *Opt. Eng.* **48** 063201
- [14] Oka K, Kaneko T 2003 *Opt. Express* **11** 1510
- [15] Luo H, Oka K, DeHoog E, Kudenov M, Schiewgerling J, Dereniak E L 2008 *Appl. Opt.* **47** 4413
- [16] Kudenov M W, Hagen N A, Dereniak E L, Gerhart G R 2007 *Opt. Express* **15** 12792
- [17] Hagen N, Locke A M, Sabatke D S, Dereniak E L, Sass D T 2004 *Proc. SPIE* **5432** 167
- [18] Oka K, Kato T 1999 *Opt. Lett.* **24** 1475
- [19] Sabatke D, Locke A, Dereniak E L, Descour M, Garcia J 2002 *Opt. Eng.* **41** 1048
- [20] Jones S H, Iannarilli F J, Kebabian P L 2004 *Opt. Express* **12** 6559
- [21] Dong Y, You Z, Gao P 2002 *Proc. SPIE* **4919** 269
- [22] Blaney D 2003 *Acta Astronautica* **52** 389
- [23] Locke A M, Salyer D, Sabatke D S, Dereniak E L 2003 *Proc.*

- SPIE* **5158** 12
- [24] Li J, Zhu J, Wu H 2010 *Opt. Lett.* **35** 3784
- [25] Zhan G, Oka K, Ishigaki T, Baba N 2002 *Proc. SPIE* **4480** 198
- [26] Sun Y, Zhang C M, Du J, Zhao B C 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3863 (in Chinese) [孙尧, 张淳民, 杜鹃, 赵葆常 2010 物理学报 **59** 3863]
- [27] Gao Z, Mao Y Y, Chen X L, Lin Z M 2011 *Opt. Eng.* **50** 043602
- [28] Komisarek D, Reichard K, Merdes D 2004 *Appl. Opt.* **43** 3983
- [29] Zhang C M, Li B X, Zhao B C, Yuan X J 2002 *Opt. Com.* **203** 21
- [30] Liao Y B 2003 *Polarization Optics* (1st Edn.) (Beijing: Science Press) p205 (in Chinese) [廖延彪 2003 偏振光学 (第 1 版) (北京: 科学出版社) 第 205 页]
- [31] Du J, Zhang C M, Zhao B C, Sun Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6311 (in Chinese) [杜鹃, 张淳民, 赵葆常, 孙尧 2008 物理学报 **57** 6311]
- [32] Bore M, Wolf E (Translated by J S) 2009 *Principles of Optics—Electromagneti Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light* (7th (expanded) Edn.) (in Chinese) [玻恩, 沃耳夫著 (杨葭荪译) 2009 光学原理——光的传播、干涉和衍射的电磁理论 (第 7 版) (北京: 电子工业出版社) 第 239 页]
- [33] Wang Z J 2010 *Modern Optical Technology Handbook* (1st Edn.) (in Chinese) [王之江 2010 现代光学应用技术手册 (第 1 版) (北京: 机械工业出版社) 第 49, 212 页]
- [34] Mu T K, Zhang C M, Ren W Y, Zhang L, Zhu B H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 070704 (in Chinese) [穆廷魁, 张淳民, 任文艺, 张霖, 祝宝辉 2011 物理学报 **60** 070704]
- [35] Zhang C M 2000 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics) (in Chinese) [张淳民 2000 博士论文 (西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所)]
- [36] Azzam R M A, Bashara N M (Translated by Liang M J, Zhang F C, Wang G Y) 1986 *Ellipsometry and Polarized* (1st Edn.) (Beijing: Science Press) p38 (in Chinese) [阿查姆, 巴夏拉著 (梁民基, 张福初, 王广阳译) 1986 椭圆偏振测量术和偏振光 (第 1 版) (北京: 科学出版社) 第 38 页]

Technology of polarization interference imaging spectral based on pupil division and angle shear

Tang Qian¹⁾²⁾ Zhao Bao-Chang¹⁾ Qiu Yue-Hong^{1)†}
Zhang Chun-Min³⁾ Mu Ting-Kui³⁾

1) (*Xi'an Institute Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

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

3) (*The Key Laboratory of Non-Equilibrium Condensed Matter and Quantum Engineering of Ministry of Education, School of Science, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*)

(Received 18 May 2012; revised manuscript received 27 June 2012)

Abstract

With the combination of pupil division, Wollaston prism angle shear and Savart plate lateral shear interference, a new technology that can acquire the message of imaging, polarization and spectrum simultaneously is presented. The system works at the pushing mode with neither mechanical movable nor electrically tunable device, and four quarters of the single charge-coupled device can get four interferograms of different polarization states (two polarization-difference spectral imagings). The device is discussed in detail, and the relationship between azimuth of the prism principal cross section and the output light intensity is analyzed, and then system parameters are optimized. In the paper, we derive the interference fringe intensity distribution formula, use computer numerical simulation to verify the feasibility and accuracy of this method, and thus provide an important theory basis and the practice instruction for designing a new type of imaging spectrometer and its engineering applications.

Keywords: new optical sensing technology, technology of imaging polarization spectrum, Wollaston prism, Savart plate

PACS: 07.60.Rd, 42.25.Ja, 07.60.Ly, 42.25.Lc

† E-mail: tang_qian@126.com