

文章编号: 1001-3806(2010)02-0282-03

影响相位延迟器 Jones 矩阵的因素

吕廷芬, 李国华*, 蔡生景, 郭丽娇

(曲阜师范大学 激光研究所, 曲阜 273165)

摘要: 为了研究相位延迟器的 Jones 矩阵, 采用理论推导和分析的方法, 得到了统一的 Jones 矩阵表达式, 并对一些文献中的 Jones 矩阵做了修正及说明。对 λ/n 波片, 采用理论分析和实验验证的方法, 分析验证了相位延迟量对延迟器 Jones 矩阵的影响。结果表明, 对 λ/n 波片, 波片厚度与材料光性对偏振光产生的物理影响等效; 但对 Jones 矩阵的影响则不同, 取快轴与 x 轴成 θ 角时, 波片厚度对 Jones 矩阵有影响, 材料光性对 Jones 矩阵无影响。

关键词: 物理光学; Jones 矩阵; 相位延迟器; 快轴; 慢轴

中图分类号: O436.3 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.02.038

Parameters affecting Jones matrix of phase retarders

LÜ Ting-fen, LI Guo-hua, CAI Sheng-jing, GUO Li-jiao

(Institute of Laser Research, Qufu Normal University, Qufu 273165, China)

Abstract: In order to study Jones matrix of a phase retarder, a unified expression of the Jones matrix was got by means of theoretical derivation and analysis, and some Jones matrices in some literature was revised and explained. For a λ/n wave-plate, the effect of the phase retardation on Jones matrix was analyzed and verified with the methods of theoretical analysis and experimental verification. The results show that thickness of the wave-plate and material property have the same effect on the linearly polarized light, but have different effect on Jones matrix are different. When the fast-axis is at an angle of θ with x -axis, only the former affects Jones matrix.

Key words: physical optics; Jones matrix; phase retarder; fast axis; slow axis

引言

Jones 矩阵在偏振光学及偏振测量学中有着非常重要的作用。近来在一些文献中, 同一型号的相位延迟器有不同的矩阵表达, 造成了 Jones 矩阵不统一。利用这样的矩阵运算时会影响对偏振光旋性及对波片快慢轴的判断。因此统一 Jones 矩阵表达式, 修正文献中的 Jones 矩阵很有意义。实际制作 λ/n 波片时, 由于厚度不同, 表达式中的延迟量也就不同, 从而对延迟器的 Jones 矩阵产生影响。因此, 利用出射光偏振态来判断 λ/n 波片快慢轴的实验中, 波片延迟量对 Jones 矩阵的影响不能忽略。

1 修正参考文献[1]~参考文献[5]中的矩阵

图 1 为坐标变换图。 $U-V$ 坐标系下 (U, V 分别表示波片的快慢轴), 波片的 Jones 矩阵:

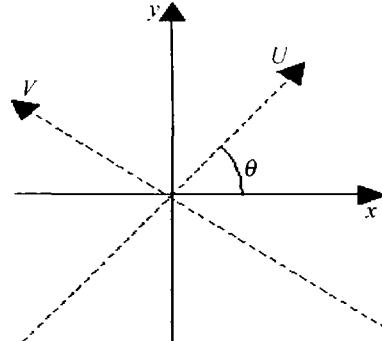


Fig. 1 Rotation of the coordinate

$$N = \exp(i\varphi_U) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\varphi} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $\varphi = \varphi_V - \varphi_U$; 其中, φ_U 和 φ_V 分别为沿快轴方向和沿慢轴方向振动的偏振光的相位。

若波片的快轴与 x 轴成 θ 角, 如图 1 所示。则在 $x-y$ 坐标系下的 Jones 矩阵为:

$$J = S^{-1}NS = e^{i\varphi_U} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\varphi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, S 为坐标变换矩阵。

相位因子取国际工程制 $e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})}$, 则:

作者简介: 吕廷芬(1983-), 女, 硕士研究生, 现主要从事偏振光学方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: ghli@163169.net

收稿日期: 2008-12-31; 收到修改稿日期: 2009-04-27

$$\varphi = -(\vec{k}_v - \vec{k}_u)d = \frac{2\pi}{\lambda_0}(n_u - n_v)d < 0 \quad (3)$$

式中, ω 表示角频率; t 表示传播时间; \vec{k} 表示波矢量; \vec{r} 表示位矢量; \vec{k}_u 和 \vec{k}_v 分别为沿快轴方向和沿慢轴方向振动的偏振光的波矢量; λ_0 为真空中的波长; n_u 和 n_v 分别为沿快轴方向和沿慢轴方向振动的偏振光的折射率; d 为波片厚度。

令 $\varphi = -\delta$, δ 仅表示相位延迟的大小。则:

$$J = e^{i\varphi_u} \begin{bmatrix} \cos^2\theta + \sin^2\theta e^{-i\delta} & \cos\theta\sin\theta(1 - e^{-i\delta}) \\ \cos\theta\sin\theta(1 - e^{-i\delta}) & \cos^2\theta e^{-i\delta} + \sin^2\theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

即快轴与 x 轴成 θ 角时, 波片的 Jones 矩阵应统一为(4)式。

相位因子取 $e^{-i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})}$, (4) 式中 δ 应变为 $-\delta$ 。取光轴与 x 轴成 θ 角时, 对负一轴晶体, 光轴方向即快轴方向, 波片的 Jones 矩阵为(4)式; 对正一轴晶体, 光轴方向垂直快轴方向, (4) 式中 δ 应变为 $-\delta$ 。可见选取光轴与 x 轴成 θ 角时, 相位延迟器的 Jones 矩阵与材料的光性有关, 得到两种 Jones 矩阵表达式, 出现了

Table 1 Amendments to Jones matrices in the reference

phase retarder	reference[4]	reference[5]	correction
fast axis is x axis	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i \end{bmatrix}$
$\lambda/4$ wave-plate ($\delta = \pi/2$)	fast axis is y axis the angle between fast axis and x axis is $\pm \pi/4$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i \end{bmatrix}$ $\odot \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & \mp i \\ \mp i & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i \end{bmatrix}$ $\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & \pm i \\ \pm i & 1 \end{bmatrix}$ $\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & \pm i \\ \pm i & 1 \end{bmatrix}$
	the angle between fast axis and x axis is θ	$\begin{bmatrix} \cos^2\theta + \sin^2\theta & (1-i)\cos\theta\sin\theta \\ (1-i)\cos\theta\sin\theta & \sin^2\theta + i\cos^2\theta \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \cos^2\theta - \sin^2\theta & (1+i)\cos\theta\sin\theta \\ (1+i)\cos\theta\sin\theta & \sin^2\theta - i\cos^2\theta \end{bmatrix}$

2 相位延迟器的延迟量对 Jones 矩阵的影响

对 λ/n 波片, 实际制作过程中, 由于波片的厚度不同导致相位延迟量有两种可能的取值: $\delta = \pm 2\pi/n + 2k\pi$ (k 为整数), 代入(4)式可得两种可能的 Jones 矩阵。例如对 6328 nm 的 $\lambda/4$ 云母波片, 厚度有 34 μm 和 102 μm 两种, 其延迟量分别为 $\pi/2$ 和 $3\pi/2$ 。偏振光通过上述两种 $\lambda/4$ 云母波片后, 出射椭偏光旋性刚好相反。分析发现对 λ/n 波片, 波片厚度与材料光性对偏振光产生的物理影响等效。但取快轴与 x 轴成 θ 角时, 波片厚度与材料光性对 Jones 矩阵的影响不同, 前者对 Jones 矩阵有影响, 有两种可能的表达式; 后者则对 Jones 矩阵无影响。

3 实验验证

使用波片前, 常需测量波片的延迟量及判断波片的快慢轴^[6-11]。利用偏振态来判断相位延迟器快慢轴

Jones 矩阵不统一的现象。选取快轴与 x 轴成 θ 角时, 相位延迟器的 Jones 矩阵与材料的光性无关。

根据上述分析, 参考文献[1]~参考文献[5]中的 Jones 矩阵应统一为(4)式。参考文献[1]中的 Jones 矩阵 $\begin{bmatrix} \cos(\delta/2) + i\sin(\delta/2)\cos2\theta & i\sin(\delta/2)\sin2\theta \\ i\sin(\delta/2)\sin2\theta & \cos(\delta/2) - i\sin(\delta/2)\cos2\theta \end{bmatrix}$ 与(4)式等效, 可相互转化; 参考文献[3]中的 Jones 矩阵 $\begin{bmatrix} \cos^2\theta + \sin^2\theta e^{\pm i\delta} & \cos\theta\sin\theta(1 - e^{\pm i\delta}) \\ \cos\theta\sin\theta(1 - e^{\pm i\delta}) & \cos^2\theta e^{\pm i\delta} + \sin^2\theta \end{bmatrix}$ 是取快轴与 x 轴成 θ 角时, 又考虑了材料的光性而得出了错误的结论; 参考文献[4]中的 Jones 矩阵 $\begin{bmatrix} \cos^2\theta + \sin^2\theta e^{i\delta} & \cos\theta\sin\theta(1 - e^{i\delta}) \\ \cos\theta\sin\theta(1 - e^{i\delta}) & \cos^2\theta e^{i\delta} + \sin^2\theta \end{bmatrix}$ 是由于相位因子没取国际工程制引起的; 参考文献[5]中 Jones 矩阵表达错误则是由于相位因子前后不统一引起的。参考文献[4]、参考文献[5]中的部分 Jones 矩阵修正见表 1。

的实验中, 若忽略波片厚度引起的相位延迟量的不同对 Jones 矩阵的影响, 在用 Jones 矩阵运算后可能会错判快慢轴。实验装置见图 2, 起偏器 P 的透振方向及

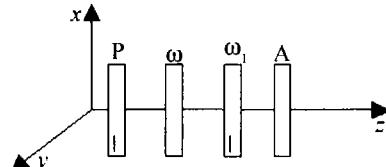


Fig. 2 Determination of the fast axis and the slow axis of the retarder
波片 ω_1 的快轴方向均沿 x 轴, 待测波片 ω (厚度分别为 34 μm 的 $\lambda/4$ 云母波片和 102 μm 的 $\lambda/4$ 云母波片) 的某一主轴与 x 轴成 $\pi/4$ 。光依次通过起偏器和波片 ω , ω_1 后, 转动检偏器 A 至消光, 此时检偏器的透振方向在二象限、四象限, 对 34 μm 的 $\lambda/4$ 云母波片, 可以判断波片慢轴方向与 x 轴成 $\pi/4$; 对 102 μm 的 $\lambda/4$ 云母波片, 可判断波片快轴方向与 x 轴成 $\pi/4$ 。所以判断波片的快慢轴时, 只根据出射线偏光的振动方向是

在一象限、三象限,还是二象限、四象限就下结论是不准确的,还需结合延迟量是 $\delta = 2k\pi + 2\pi/n$,还是 $\delta = 2k\pi - 2\pi/n$ 后才能给出正确的判断。相位延迟器的相位延迟量的测量方法有很多,如旋转波片法、光学补偿法、电光补偿法、椭偏法、外差干涉法等。而在判断快慢轴的实验中对延迟量的精确度要求不高,可直接用千分尺测出波片的厚度后,转化成相位延迟量即可。

4 结 论

(1) 相位延迟器 Jones 矩阵的表达式与电矢量的位相因子、主轴的选取、材料的光性、波片的相位延迟量等有关。(2) 选取光轴与 x 轴成 θ 角时, 相位延迟器的 Jones 矩阵与材料的光性有关, 得到两种 Jones 矩阵表达式, Jones 矩阵不统一。选取快轴与 x 轴成 θ 角时, 相位延迟器的 Jones 矩阵与材料的光性无关, 可统一为(4)式, 且(4)式中的 $\delta > 0$ 。(3) 对 λ/n 波片, 波片厚度与材料光性对偏振光产生的物理影响等效; 但取快轴与 x 轴成 θ 角时, 波片厚度与材料光性对 Jones 矩阵的影响不同。前者对 Jones 矩阵有影响, 后者对 Jones 矩阵无影响。(4) 在利用出射光偏振态来判断 λ/n 波片快慢轴的实验中, 需考虑由厚度引起的相位延迟量的不同对 Jones 矩阵的影响。

参 考 文 献

- [1] WEI G H. Matrix optics [M]. Beijing: Weapon Industry Press, 1995:156-158 (in Chinese).
- [2] MIAO Y B. Polarized optics [M]. Beijing: Science Press, 2003:47-61 (in Chinese).
- [3] HUANG H H. Optical matrix method and Fourier method [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1991:23-29 (in Chinese).
- [4] LONG H Sh, ZHANG Zh X, TIAN H Y. Polarization of light and its application [M]. Beijing: China Machine Press, 1989:251-257 (in Chinese).
- [5] YAO Q J. Optical guide [M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2003:362-369 (in Chinese).
- [6] YU Ch R. Determination of the phase delay angle of a wave-plate with a quarter wave-plate [J]. Laser Technology, 2003, 27(4): 383-384 (in Chinese).
- [7] WANG W, LI G H, WU F Q, et al. A new method of measuring wave plate phase delay and fast axis azimuth [J]. Chinese Journal of Lasers, 2003, 30(12):1121-1123 (in Chinese).
- [8] WANG G X, XU Ch J, WANG Q S. A new method of confirming the fast or slow axis azimuth of wave plate [J]. Laser & Infrared, 2006, 36(8):699-702 (in Chinese).
- [9] WANG Zh P, LI Q B, TAN Q, et al. Method of measuring practical retardance value and judging the fast or slow axis of quarter-wave plate [J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(4): 523-528 (in Chinese).
- [10] REN H L, WANG J Y, LOU L R, et al. Measuring phase retardation and fast axis azimuth of a wave plate using michelson interferometer [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(2):249-253 (in Chinese).
- [11] WANG L, LI G H, KONG C, et al. Phase retardation measurement with two $\lambda/4$ wave-plates [J]. Laser Technology, 2007, 31(6): 663-664 (in Chinese).

(上接第 274 页)

- [8] JHA P, WADHWANI N, RAJ G, et al. Relativistic and ponderomotive effects on laser plasma interaction dynamics [J]. Physics of Plasmas, 2004, 11(5):1834-1839.
- [9] LI X Q, ZHANG Z D, SMARTT R. Magnetic reconnection theory for coronal loop interaction [J]. Astronomy and Astrophysics, 1994, 290: 963-971.
- [10] SPRANGLE P, PENANO J R, HAFIZI B. Propagation of intense short

- laser pulses in the atmosphere [J]. Phys Rev, 2002, E66 (2): 046418/1-046418/21.
- [11] SPRANGLE P, ESAREY E, TING A. Nonlinear theory of intense laser-plasma interactions [J]. Phys Rev Lett, 1990, 64 (17): 2011-2014.
- [12] LI X Q. Plasma collapse dynamics [M]. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 2004:81 (in Chinese).