

双折射波片用于柱面会聚光束中的特性分析

肖胜安 李国华 李继仲

(曲阜师范大学激光研究所)

TN 243

摘要: 本文利用光线追迹法,对双折射波片用于发散光束的相位延迟,偏振像差进行了分析,发现在与光轴夹角为 45° (或近 45°)的入射面上,偏振像差最小,为双折射波片用于柱面会聚光束以改善成像质量提供了理论依据。

关键词: 双折射波片, 相位延迟, 柱面会聚光束, 偏振像差

Analysis on property of a birefringent wave-plate in cylindrical convergent beam

Xiao Sheng'an Li Guohua Li Jizhong

(Laser Institute, Qufu Normal University, Qufu)

Abstract: By means of ray tracing, retardation and polarization aberration of a birefringent wave-plate in a divergent beam are analysed. We find that the polarization aberration reduces to minimum as incident rays on the plane which makes 45° (or near 45°) with the optic axis of crystal. so the birefringent wave-plate is an ideal retarder in cylindrical beam.

Key words: birefringent wave-plate, retardation, cylindrical convergent beam, polarization aberration

1 引言

双折射波片是偏光技术中的重要器件,当波片用于诸如偏光显微镜之类的成像系统时,由于入射光的非准直,各入射光线的入射角、入射面不同,引起出射光束的偏振态发生相对变化,形成偏振像差,影响成像质量^[1]。本文利用光线追迹法,得出了任意空间光线入射时波片相位延迟的严格公式,给出了小角入射时的2级近似处理,分析了波片用于发散光束中偏振像差的主要成因,结果表明:当入射面与光轴夹角为 45° (或近 45°)时,出射光偏振参量几乎与入射角无关,

因此双折射波片可以做为柱面会聚光束的理想延迟器件。

2 o、e光波的光线方向

双折射波片的光轴平行于晶面。以光轴为z轴,晶面法线为x轴,建立坐标系如图1示。

设入射光线方向矢为 $(\cos\theta_1, \sin\theta_1 \sin\varphi, \sin\theta_1 \cos\varphi)$,其中 θ_1 为入射角, φ 为入射面方位角。

折射光分为o光和e光,o光的光线矢

1991年10月25日收稿

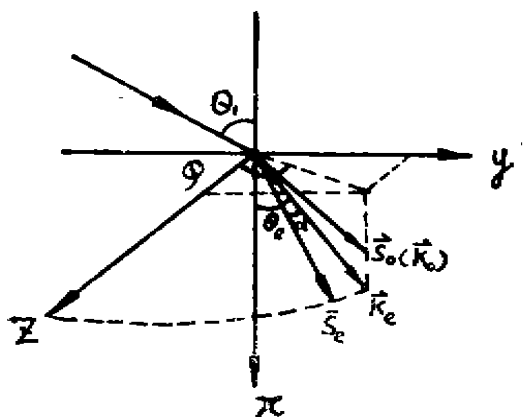


图1

$\vec{s}_0$ 与法线矢 $\vec{k}_0$ 一致 (见图1)

$$\vec{s}_0 = \vec{k}_0 = \vec{s}_0 (\cos\theta_0, \sin\theta_0 \sin\varphi, \sin\theta_0 \cos\varphi) \quad (1)$$

e光波的法线矢 $\vec{k}_e$ 和光线矢分别为 $\vec{k}_e (\cos\theta_e, \sin\theta_e \sin\varphi, \sin\theta_e \cos\varphi)$, $\vec{s}_e (s_x, s_y, s_z)$, 由Snell定律

$$\sin\theta_1 = n_0 \sin\theta_0 = n'_e \sin\theta_e \quad (2)$$

θ_0, θ_e 分别为 $\vec{k}_0, \vec{k}_e$ 与晶面法线的夹角, n_0, n_e 为晶体的两个主折射率, n'_e 为e光波折射率^[2]

$$n'_e = \frac{n_0 n_e}{\sqrt{n_e^2 \cos^2\theta + n_0^2 \sin^2\theta}} \quad (3)$$

θ 为 $\vec{k}_e$ 与光轴的夹角, 即

$$\begin{aligned} \cos\theta &= \cos(\vec{k}_e, \vec{z}) \\ &= \sin\theta_e \cos\varphi \end{aligned} \quad (4)$$

设 $\vec{s}_e, \vec{k}_e$ 的夹角为 α , 即

$$\begin{aligned} \cos\alpha &= s_x \cos\theta_e + s_y \sin\theta_e \sin\varphi \\ &\quad + s_z \sin\theta_e \cos\varphi \end{aligned} \quad (5)$$

α 即为离散角^[2]

$$\tan\alpha = \frac{(n_e^2 - n_0^2) \tan\theta}{n_e^2 + n_0^2 \tan^2\theta} \quad (6)$$

由 $\vec{s}_e, \vec{k}_e$ 及光轴共面, 有

$$\sin\theta_e \sin\varphi s_x - \cos\theta_e s_y = 0 \quad (7)$$

$$\text{另外 } s_x^2 + s_y^2 + s_z^2 = 1 \quad (8)$$

由(2)、(3)、(4)式得

$$\sin\theta_e = \frac{\sin\theta_1}{n_e \sqrt{1 + \lambda^2 (n_0^2 - n_e^2) \cos^2\varphi \sin^2\theta_1}} \quad (9)$$

$$\cos\theta = \frac{\sin\theta_1 \cos\varphi}{n_e \sqrt{1 + \lambda^2 (n_0^2 - n_e^2) \cos^2\varphi \sin^2\theta_1}} \quad (10)$$

$$\text{式中 } \lambda = \frac{1}{n_0 n_e}$$

联立解(5)、(7)、(8)式得

$$\begin{aligned} s_x &= \cos\alpha \cos\theta_e \\ &\quad + \frac{\sin\theta_e \sin\alpha \cos\varphi}{\sqrt{1 + \tan^2\theta_e \sin^2\varphi}} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} s_y &= \cos\alpha \sin\theta_e \sin\varphi \\ &\quad + \frac{\sin\varphi \cos\varphi \tan\theta_e \sin\theta_e \sin\alpha}{\sqrt{1 + \tan^2\theta_e \sin^2\varphi}} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} s_z &= \cos\alpha \cos\varphi \sin\theta_e \\ &\quad - \cos\theta_e \sin\alpha \sqrt{1 + \tan^2\theta_e \sin^2\varphi} \end{aligned} \quad (13)$$

式中 α, θ_e 由(6)、(9)、(10)式给出。

3 双折射波片的相位延迟

光路如图2示;

o光光程为

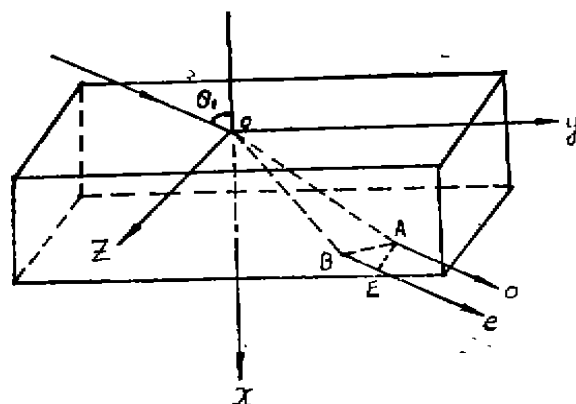


图2

$$n_o \cdot A o = \frac{n_o^2 d}{\sqrt{n_e^2 + \sin^2\theta_1}}$$

e光光程为

$$n_e B o + B E = n_e \frac{d}{s_x} + A B \sin\theta_1$$

$$(n = n_o \cos \alpha)$$

$$\text{式中 } AB^2 = oB^2 + oA^2 - 2oB \cdot oA \cos(\vec{s}_o, \vec{s}_a)$$

$$= d^2 \left[\frac{1}{s_o^2} + \frac{n_o^2}{n_o^2 - \sin^2 \theta_1} \right. \\ \left. \frac{2n_o}{s_o \sqrt{n_o^2 - \sin^2 \theta_1}} (s_x \cos \theta_o + s_y \sin \theta_o \sin \varphi + s_z \sin \theta_o \cos \varphi) \right]$$

波片的相位延迟

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \left(n \frac{d}{s_x} + AB \sin \theta_1 - \frac{n_o d}{\sqrt{n_o^2 - \sin^2 \theta_1}} \right) \quad (14)$$

对小角入射 ($\theta_1 \leq 5^\circ$), 将上式中各项展开为 θ_1 的级数, 取至 θ_1^2 项, 得到

$$\delta = \delta_o \left[1 + \frac{n_o - n_e}{4n_o^2 n_e} \theta_1^2 - \frac{n_o + n_e}{4n_o^2 n_e} \cos 2\varphi \theta_1^2 \right] \quad (15)$$

式中 $\delta_o = \frac{2\pi}{\lambda} (n_o - n_e) d$ 为正入射时的相位延迟量, 将 $\varphi = 0^\circ, 90^\circ$ 分别代入 (15) 式, 发现与已有结果一致^[3]。

4 偏振像差分析及实验验证

从 (15) 式看到, 光线经过双折射波片的相位延迟与入射角 θ_1 , 入射面方位角 φ 有关, 因此波片用于发散光束时, 各出射光线的偏振参量不再一致, 形成偏振像差。

计算表明, 入射角很小时, o 光、 e 光的电场强度传播系数之比与入射角、入射面方位角几乎无关 (都接近于 1), 因此偏振像差主要由相位延迟的差异引起。

由 (15) 式看到, 由于 $(n_o - n_e)$ 一般很小 (对石英波片, $(n_o - n_e) \sim 10^{-3}$), 因此位相延迟偏差为

$$\Delta \delta = \delta - \delta_o \\ = - \frac{n_o + n_e}{4n_o^2 n_e} \cos 2\varphi \theta_1^2$$

容易看到, 在 $\varphi = 45^\circ$ (或近 45°) 时, $\Delta \delta \sim 0$,

因此与这一入射面对应的出射光线, 其偏振态基本一致。

利用图 3 的装置进行验证。

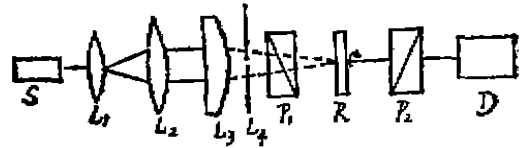


图3 S: H_e-Ne 激光器; L₁、L₂: 透镜; L₃: 柱面镜; L₄: 光阑; P₁、P₂: 偏光镜; R: $\frac{\lambda}{4}$ 波片; D: 探测器

在波片的不同方位下 (φ 不同), 让光阑位置上下移动, 检验不同光线经过延迟片 ($\frac{\lambda}{4}$ 片) 的相位延迟量, 发现 (1) 在 φ 偏离 45° 较大时, 各光线的相位延迟一般不等于 90° 。(2) 在 $\varphi = 45^\circ$ 或在其附近, 不同光线经过延迟片的延迟量基本相同, 等于 $\frac{\pi}{2}$, 这与理论值是一致的。

5 结论

由前面的分析看到, 当双折射波片用于发散光束时, 如果在波片前插入一柱面镜, 然后调整波片方位, 使其光轴与入射面夹角为 45° , 可使成像质量大为改善。

本文在固定坐标系中给出了光线追迹、相位延迟的严格公式, 解决了过去以入射面为坐标面给分析发射光束入射带来的困难, 为双折射波片用于发散光束中的光线追迹、相位延迟分析提供了一种方便的方法。

参考文献

- [1] 李国华等.《激光杂志》, 1991, 12(6), 286~299
- [2] Quan-Ting Liang. Appl. Opt. 1990, 29(7), 1008~1010
- [3] 李国华等.《曲阜师大学报》, 1988, 14(4), 97~100