

文章编号: 1001-3806(2009)02-0156-03

晶体二向色性对波片性能的影响

邵俊平¹, 吴福全^{1*}, 洪芳¹, 王丽丽²

(1. 曲阜师范大学 激光研究所, 曲阜 273165; 2. 枣庄学院 物理与电子工程系, 枣庄 277160)

摘要: 为了更好地在晶体具有二向色性的波段使用波片, 采用矩阵光学的方法, 分析了晶体的二向色性对 $\lambda/4$ 波片产生圆偏光、 $\lambda/2$ 波片使偏振面产生旋转以及出射光振幅的影响, 当线偏光光矢量与波片快轴成 45° 入射时, 由于晶体的二向吸收, 通过波片后的光不是圆偏光而是椭圆偏光, 只有在满足条件时才能得到圆偏光, 而且振幅变小; 对于波片, 考虑二向吸收后, 线偏光光矢量的旋转不再是入射光矢量与波片快轴夹角的 2 倍关系, 光矢量的旋转角度和振幅的变化是二向吸收系数及入射光矢量与晶体光轴夹角的函数。结果表明, 晶体的二向色性对波片性能的影响是不容忽视的, 在器件使用中应该引起人们的注意。

关键词: 物理光学; 二向色性; 波片; 圆偏光; 偏振面旋转

中图分类号: O436 **文献标识码:** A

Effect of crystal dichroism on the capability of wave-plates

SHAO Jun-ping¹, WU Fu-quan¹, HONG Fang¹, WANG Li-li²

(1. Institute of Laser Research, Qufu Normal University, Qufu 273165, China; 2. Department of Physics and Electron Engineering, Zaozhuang College, Zaozhuang 277160, China)

Abstract: In order to use the wave-plate better within the band with crystal dichroism, the effect of the dichroism on the circular polarized light induced by a $\lambda/4$ wave-plate, the plane of polarization rotated by a $\lambda/2$ wave-plate and the output amplitude was analyzed respectively based on matrix optics. Because of dichroic absorption of the crystal, the transmitted ray becomes elliptical polarized light instead of circular polarized light when the optical vector of the linear polarized light inputs at 45° with respect to the fast axis of the $\lambda/4$ wave-plate. For a $\lambda/4$ wave-plate, only when $\tan\theta = \exp(-\Delta ad)$, the transmitted ray is circular polarized light with lower amplitude. As to a $\lambda/2$ wave-plate, with dichroism taken into account, the rotation angle of the optical vector of the linear polarized light is not twice as the angle between the optical vector of the incident light and the fast axis of the wave-plate. The rotation angle and amplitude are the function of the dichroic absorption coefficient and the angle between the vector of the incident light and the optical axis of the crystal. The results show that the crystal dichroism of the wave-plate cannot be ignored, it should be paid more attention.

Key words: physical optics; dichroism; wave-plate; circular polarized light; rotation of the polarization plane

引言

相位延迟器是一类非常重要的偏光器件, 可以使透过它的振动方向相互垂直的两束光波彼此之间产生一定的相位差。相位延迟器同其它偏光器件配合可以实现光的各种偏振之间的相互转换, 以及偏振面的旋转。由双折射晶体设计制作的片状相位延迟器通常称为波片^[1]。目前使用最多的主要有 $\lambda/4$ 波片(产生 90° 相位延迟)和 $\lambda/2$ 波片(产生 180° 相位延迟); 前者常用来将线偏振光转变为圆偏振光, 而后者可以将入射偏振光的振动面旋转。波片的相位延迟量 δ 由下式

给出^[2]: $\delta = 2\pi d(n_e - n_o)/\lambda$, 其中, d 为波片的厚度, n_e, n_o 是双折射晶体中非常光和寻常光的折射率, 且一般具有正常色散关系, λ 为真空中的波长。显然当厚度一定时, 延迟量是波长的函数。也正是基于此, 研究人员主要关注了波片延迟量的波长灵敏性^[3], 及温度对延迟量的影响^[4], 而忽略了双折射晶体在某些波长的二向色性^[5-6]对波片在应用中影响的研究; 作者从理论上对该影响进行分析研究, 为波片在具有二向色性的光谱区的更好应用提供理论参考。

1 原理

在如图 1 所示的坐标系中, 光矢量与 x 轴成 θ 角的线偏光的 Jones 矢量表示为^[7]:

$$\vec{E}_\theta = E_0 \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

作者简介: 邵俊平(1982-), 女, 硕士研究生, 主要从事偏振光学技术的研究。

* 通讯联系人。E-mail: fqwu@mail.qfnu.edu.cn

收稿日期: 2008-01-09; 收到修改稿日期: 2008-04-07

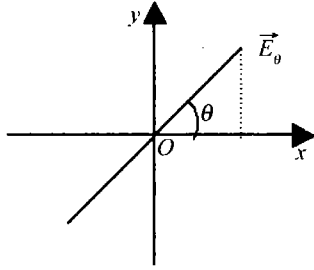


Fig. 1 The polarized decomposition of the incident light

式中, \vec{E}_θ 为一光矢量与晶体光轴成 θ 角的入射线偏光, E_0 为入射光矢量的单位矢。若对于负单轴晶体波片的快、慢轴分别平行于 x, y 轴, 则 \vec{E}_θ 可以分解为沿 x 方向振动的非常光(e光)和沿 y 方向振动的寻常光(o光), 用 Jones 矢量表示为:

$$\vec{E}_\theta = E_0 \cos\theta \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + E_0 \sin\theta \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

对于透射光, 若不计表面反射^[8], 只考虑晶体内部的双折射和二向吸收两种作用, 则透射光可表示为^[2,9]:

$$\vec{E}_t = E_0 \cos\theta \exp(-a_c d) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \exp(-i \frac{2\pi}{\lambda} n_c d) + E_0 \sin\theta \exp(-a_o d) \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \exp(-i \frac{2\pi}{\lambda} n_o d) \quad (3)$$

式中, a_o 和 a_c 分别为晶体中 o 光和 e 光的吸收系数, d 为厚度。为了书写的方便, 令:

$$\begin{cases} A = E_0 \cos\theta e^{-a_c d} \\ B = E_0 \sin\theta e^{-a_o d} \\ \alpha_c = \frac{2\pi}{\lambda} n_c d \\ \alpha_o = \frac{2\pi}{\lambda} n_o d \end{cases} \quad (4)$$

式中, α_c 和 α_o 是 e 光和 o 光的相位, \vec{E}_t 通过三角变换简化为:

$$\vec{E}_t = A \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} e^{-i\alpha_c} + B \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} e^{-i\alpha_o} = \sqrt{A^2 + B^2} \left\{ \sin\varphi \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \cos\varphi \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} e^{-i\delta} \right\} e^{-i\alpha_c} = \sqrt{A^2 + B^2} \begin{bmatrix} \sin\varphi \\ \cos\varphi e^{-i\delta} \end{bmatrix} e^{-i\alpha_c} \quad (5)$$

其中:

$$\begin{cases} \varphi = \arctan \frac{A}{B} = \arctan[\cot\theta e^{-(a_c - a_o)d}] = \arctan(\cot\theta e^{-\Delta ad}) \\ \delta = \alpha_c - \alpha_o = \frac{2\pi}{\lambda} (n_c - n_o) d \end{cases} \quad (6)$$

(5)式表示的是一椭圆偏振光, 式中不但包含着波片的延迟量 δ , 而且还含有材料的二向吸收系数。下面分别分析材料的二向色性对 $\lambda/4$ 波片产生圆偏光及对 $\lambda/2$ 波片作用的影响。

2 二向色性对 $\lambda/4$ 波片产生圆偏光的影响

对 $\lambda/4$ 波片, 相位差 $\delta = 90^\circ$, 若不考虑二向色吸收的影响, $\theta = 45^\circ$ 时线偏光透过 $\lambda/4$ 波片产生圆偏振光。若材料具有二向色吸收, 将 $\delta = 90^\circ, \theta = 45^\circ$ 代入 (5) 式得:

$$\vec{E}_t = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \sqrt{e^{-2a_c d} + e^{-2a_o d}} \begin{bmatrix} \sin(\tan^{-1} e^{-\Delta ad}) \\ i \cos(\tan^{-1} e^{-\Delta ad}) \end{bmatrix} e^{-i\alpha_c} \quad (7)$$

通过(7)式可以看出, 透射光的振幅及偏振态都与吸收系数有关。其中振幅与椭圆率为:

$$Z = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \sqrt{e^{-2a_c d} + e^{-2a_o d}} e^{-i\alpha_c} \quad (8)$$

$$e = \frac{\sqrt{\sin^2(\tan^{-1} e^{-\Delta ad}) - \cos^2(\tan^{-1} e^{-\Delta ad})}}{\sin(\tan^{-1} e^{-\Delta ad})} \quad (9)$$

以波长为 $1.6\mu\text{m}$ 的冰洲石晶体 $\lambda/4$ 波片为例, $(115 + 1/4)\lambda$ 波片的厚度为 1.194mm , 将 $a_c = 0, a_o = 0.005$ 代入(7)式~(9)式得:

$$\vec{E}_t = 0.826 E_0 \begin{bmatrix} 0.728 \\ i0.685 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$Z = 0.820 E_0, e = 0.109$$

由以上分析可以看出, 考虑二向色性后, 在 $\theta = 45^\circ$ 时, 不但导致透过 $\lambda/4$ 波片的偏振光的振幅减小, 且得不到圆偏振光, 而是椭圆偏振光。通过分析得到: 只有当 $\tan^{-1}[\cot\theta(e^{-\Delta ad})] = \pi/4$ 即 $\tan\theta = e^{-\Delta ad}$ 时, 线偏振光透过 $\lambda/4$ 波片才可以得到圆偏光。

3 二向色性对波片作用的影响

由(5)式可知, 二向色性对波片的相位没有影响, 对于 $\lambda/2$ 波片相位差 $\delta = 180^\circ$, 带入(5)式中得到透射光的 Jones 矢量为:

$$\vec{E}_t = \sqrt{A^2 + B^2} \begin{bmatrix} \sin\varphi \\ \cos\varphi \end{bmatrix} e^{-i\alpha_c} \quad (11)$$

上式表明: 透射光为线偏振光, 振幅和偏转角度与吸收系数有关。冰洲石晶体在波长 $2.1\mu\text{m}$, $a_c = 0.002, a_o = 0.062$, 对于 $(100 + 1/2)\lambda$ 波片, 厚度 $d = 1.415\text{mm}$, 代入(4)式~(6)式可得: $A = E_0 \cos\theta e^{-a_c d} = E_0 \cos\theta e^{-0.002 \times 1.415} = 0.997 E_0 \cos\theta, B = E_0 \sin\theta e^{-a_o d} = E_0 \sin\theta e^{-0.062 \times 1.415} = 0.916 E_0 \sin\theta, \varphi = \arctan \frac{A}{B} = \arctan(\cot\theta e^{0.06 \times 1.415})$, 透射光振幅 $Z = \sqrt{A^2 + B^2} e^{-i\alpha_c} =$

$$E_0 0.876 \sqrt{(0.997 \cos \theta)^2 + (0.916 \sin \theta)^2}.$$

设入射光振幅 $E_0 = 1$, 则对于 $2.1 \mu\text{m}$ 的透射光振幅是 θ 的函数, 其关系曲线如图 2 所示。在图中可以

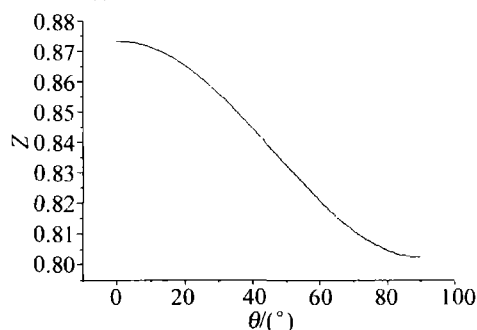


Fig. 2 The relation between the amplitude of optical transmission and the θ angle

发现, θ 越大, 透射振幅越小, 即二向吸收的影响越明显。原因是冰洲石晶体对于寻常光的吸收大于对非常光的吸收。将(11)式变形得到:

$$\vec{E}_t = \sqrt{A^2 + B^2} \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) \\ \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) e^{-i\theta} \end{bmatrix} e^{-i\alpha_r} \quad (12)$$

偏振光振动方向转过的角度用 β 表示, 与(1)式比较可得:

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \varphi + \theta = \frac{\pi}{2} - \arctan(\cot \theta e^{0.06 \times 1.415}) + \theta \quad (13)$$

定义旋光系数 $r = \beta/\theta$, 表征 $\lambda/2$ 波片的旋光作用。由图 3 可以看出: 考虑二向吸收后, $\lambda/2$ 波片的旋光作用

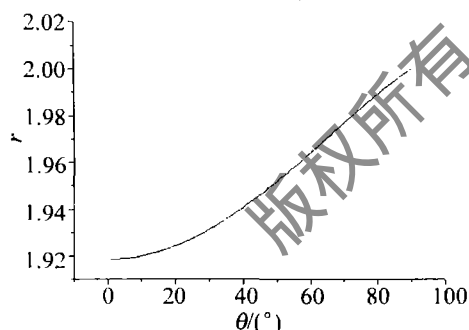


Fig. 3 The relation between the polarimetry role of $\lambda/4$ wave-plate and the θ angle

不再是 2 倍 θ 角的关系, 且 θ 越接近 $\frac{\pi}{2}$, 影响越小。例如在 $\theta = 10^\circ$ 时, $\beta = 19.21^\circ$, $r = 1.920$; $\theta = 80^\circ$ 时, $\beta = 159.13^\circ$, $r = 1.989$, 可见, 二向吸收对 $\lambda/2$ 波片旋光作用的影响是比较明显的。

4 结论

(1) 光矢量与晶体光轴成 45° 夹角的线偏光通过 $\lambda/4$ 波片, 由于晶体二向色性的影响, 得到的不是圆偏振光, 而是椭偏光, 且椭偏率与吸收系数有关。(2) 考虑晶体二向色性, 线偏振光通过 $\lambda/2$ 波片依然得到线偏光, 但光矢量的旋转角度不是 θ 角的 2 倍而是吸收系数与 θ 角的函数。(3) 由于晶体二向吸收的影响, 透射光振幅减小。

通过分析可见: 晶体的二向色性对波片性能的影响是不容忽视的, 在器件使用中应该引起人们的注意。

参考文献

- [1] XU Y Q, SONG L K, ZHAO P T. Birefringence measurements of muscovite mica with wavelength modulation compensation method [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(1): 99-100 (in Chinese).
- [2] LI G H. *Optics* [M]. Ji'nan: Shandong Education Press, 1990: 452-458 (in Chinese).
- [3] FENG W W, LI G H, CHEN L G. Polarized-light interference spectrum of quartz wave-plate [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(6): 1044-1048 (in Chinese).
- [4] MU T K, LI G H, SONG L K. Study on retardation variation behavior of quartz wave-plate follows temperature [J]. *Chinese of Journal Lasers*, 2006, 33(7): 949-952 (in Chinese).
- [5] ZHANG Zh Y. Circular dichroism technic and application [J]. *Modern Physics*, 2000, 12(5): 23-29 (in Chinese).
- [6] WANG C H, WU F Q. Effect of magnetic circular dichroism on Faraday rotator's extinction ratio [J]. *Laser Technology*, 1999, 23(6): 350-353 (in Chinese).
- [7] HUANG H H. *Optical matrix method and Fourier method* [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1991: 19-23 (in Chinese).
- [8] XU W W, JIANG Y. The Change of linearly polarized light by uniaxial crystal plate film [J]. *Heilongjiang University Natural Science Journals*, 2000, 17(2): 64-66 (in Chinese).
- [9] GUO Sh H. *Electrodynamics* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1997: 135-142 (in Chinese).

(上接第 155 页)

- [10] FU E Sh, WANG Zh Zh, SHI P Sh. CW CH_3OH far infrared lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 1982, 2(1): 9-17 (in Chinese).
- [11] SALHI M, KOCH M. Semi-confocal imaging with a THz gas laser [J]. *SPIE*, 2006, 6194: 61940A/1-61940A/8.
- [12] SIEGEL P H, DENGLER R J. Terahertz heterodyne imager for biomedical applications [J]. *SPIE*, 2004, 5354: 1-9.
- [13] DICKINSON J C, GOYEETTE T M, GATESMAN A J, et al. Terahertz imaging of subjects with concealed weapons [J]. *SPIE*, 2006, 6212: 62120Q/1-62120Q/12.
- [14] LEE A W, HU Q. Real-time, continuous-wave terahertz imaging by use of a microbolometer focal-plane array [J]. *Opt Lett*, 2005, 30

(19): 2563-2565.

- [15] ZHANG C H, WANG Y Y, CHEN J, et al. Continuous-wave terahertz imaging system based on far-infrared laser source [C]//Conference Digest of the 2006 Joint 31st International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 14th International Conference on Terahertz Electronics. Shanghai: IEEE, 2006: 426.
- [16] ZHANG C H, WANG Y Y, GAI B, et al. Continuous-wave THz imaging system based on far-infrared laser source [J]. *Superconductivity*, 2007, 35(3): 245-247 (in Chinese).
- [17] ZHANG M, RUAN Sh Ch, YANG J, et al. The software design of THz imaging system [J]. *Microcomputer Information*, 2007, 23(31): 25-27 (in Chinese).