

文章编号: 1001-3806(2008)01-0047-03

三元复合式消色差 $\lambda/4$ 波片使用范围的再研究

贾 朋, 李国华*, 彭捍东, 孔 超
(曲阜师范大学 激光研究所, 曲阜 273165)

摘要: 为了精确得到三元结构的 $\lambda/4$ 消色差复合波片的消色差范围, 采用数学解析的方法进行了理论分析, 并在中心波长 600nm 处进行实验, 得到偏差在 2% 以内的光谱范围大约为 540nm ~ 680nm。结果表明, 其消色差范围只在中心波长的附近, 这一结果对实验中棱镜的选用是有帮助的。

关键词: 光学器件; 消色差; 复合波片; 等效快轴; 光谱范围

中图分类号: O436.3 **文献标识码:** A

Application scope of three-element compound achromatic $\lambda/4$ wave-plate

J A Peng, LI Guo-hua, PENG Han-dong, KONG Chao
(Institute of Laser Research, Qufu Normal University, Qufu 273165, China)

Abstract: In order to find the achromatic scope of three-element compound $\lambda/4$ wave-plate, mathematical analysis was performed and experiments at the center wavelength of 600nm was executed. In the experiment the spectrum range was between 540nm ~ 680nm when the deviation is less than 2%. It is concluded that the achromatic scope is only near the center wavelength, which is very important for practical prism selection

Key words: optical devices; achromatism; compound wave-plate; fast axis of equivalent; spectral range

引 言

在现代激光偏光技术与信息技术的应用中, 光相位延迟器作为光相位调制及光偏振状态变换的重要器件^[1-2], 已经有了举足轻重的作用, 其中应用最广泛的一种波片是 $\lambda/4$ 波片。通常所说的 $\lambda/4$ 波片只是对特定波长的光而言的, 而对其它波长的光来说, 它就不能再称之为 $\lambda/4$ 波片, 因为它的延迟量不再是 $\pi/2$, 所以, $\lambda/4$ 波片的厚度总要随波长的变化而变化, 而本文中讨论的复合式消色差相位延迟器恰恰避免了普通延迟器件的这个弊端。该复合式波片是由 2 个 $\lambda/4$ 波片和 1 个 $\lambda/2$ 波片按照特定的复合角度组合而成, 且在一些文献中对其消色差的光谱范围和精度给出了部分研究结果。作者从波片的延迟理论出发, 对此作了进一步的研究, 并进行了相应的实验测试。结果表明, 前面的一些文章里给出的部分结果, 尤其消色差波片的使用范围夸大了近 1 倍。事实上该复合式消色差 $\lambda/4$ 波片的消色差范围只在中心波长的附近。以中心波长为 600nm 时为例, 偏差在 2% 以内的光谱范围大约只有 540nm ~ 680nm。

作者简介: 贾 朋 (1982-), 男, 硕士研究生, 主要从事光学晶体偏光特性及偏光器件方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: ghli@163169.net

收稿日期: 2006-11-02; 收到修改稿日期: 2006-12-25

1 三元式复合式消色差波片的设计原理

在以往的研究中可知, 延迟器对任意波长的延迟量为:

$$\delta = 2\pi\Delta nd/\lambda \quad (1)$$

式中, Δn 是材料的双折射率; d 是延迟器件的厚度; λ 是光波的波长。根据复合波片的理论^[3], 在 3 波片组合的系统中, 令 δ_1 和 δ_3 为第 1 波片和第 3 波片的相位延迟量; δ_2 为第 2 波片的相位延迟量; 且有 $\delta_1 = \delta_3$ 。若第 1 波片与第 3 波片的快轴平行, 且第 2 波片的快轴与第 1 波片和第 3 波片快轴的夹角为 θ ; 复合波片的延迟量为 δ , 等效快轴与第 1 波片和第 3 波片的夹角均为 ϕ 。则有^[4]:

$$\cos\left(\frac{\delta}{2}\right) = \cos\delta_1 \cos\left(\frac{\delta_2}{2}\right) - \sin\delta_1 \sin\left(\frac{\delta_2}{2}\right) \cos 2\theta \quad (2)$$

$$\cot 2\phi = \cos 2\theta [\sin\delta_1 \cot(\delta_2/2) + \cos\delta_1 \cos 2\theta] \quad (3)$$

令第 1 波片和第 3 波片为 $\lambda/4$ 波片, 第 2 波片为 $\lambda/2$ 波片, 即 $\delta_1 = \delta_3 = \pi/2$, $\delta_2 = \pi$ 。若使此系统组合为复合 $\lambda/4$ 波片, 则可将 $\delta_1 = \delta_3 = \pi/2$, $\delta_2 = \pi$ 以及 $\delta = \lambda/4$ 代入 (2) 式、(3) 式, 解得:

$$\theta = 3\pi/8, \phi = \pi/4 \quad (4)$$

由此, 可以从理论上推导出, 当 $\lambda/2$ 波片置于两平行的 $\lambda/4$ 波片之间, 且 $\lambda/2$ 波片的快轴与两 $\lambda/4$ 波片的快轴的夹角为 $3\pi/8$ 时, 3 波片组成复合的 $\lambda/4$ 波片,

且复合波片的等效快轴与两 $\lambda/4$ 波片快轴的夹角为 $\pi/4$, 见图 1, 图中, L_1 为 $\lambda/4$ 波片快轴的方向; L_2 为

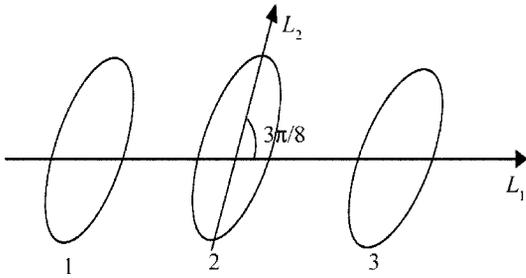


Fig 1 Relative orientation of three wave-plates

$\lambda/2$ 波片的快轴方向, 这与在三元复合式补偿器的设计与研制中所得到的结论是一致的。

2 理论分析

由上面的讨论知道, 复合式消色差相位延迟器是由 3 个双折射波片串联而成, 并且在理论^[5]中规定, 要想达到消色差的目的, 中间的多极片对于所覆盖的光谱范围的中心波长而言, 必须为 $\lambda/2$ 多极片。如果中心波长为 λ_0 , Δn_0 为中心波长下晶体的双折射率, Δn 为测试波长下晶体的双折射率, 那么, 由 (1) 式得:

$$\delta_1 = \frac{2\pi \Delta n_0 d}{\lambda_0}, \delta_1' = \frac{2\pi \Delta n d}{\lambda} \quad (5)$$

两式相比, 可得第 1 波片和第 3 波片在测试波长 λ 处的相位延迟量为:

$$\delta_1' = \frac{\delta_1 \times \Delta n \lambda_0}{n_0 \lambda} = \frac{\pi}{2} \times \frac{\Delta n \lambda_0}{n_0 \lambda} \quad (6)$$

Table 1 The relation between retardation and wave length

λ / nm	350	400	450	500	550	600	650	700	800	900	1000
$\Delta n / 10^{-3}$	9.80	9.60	9.37	9.25	9.17	9.09	9.03	8.98	8.90	8.80	8.80
$\delta / (^\circ)$	38.231	62.799	77.418	85.373	89.035	90.000	89.308	87.625	82.819	77.418	72.140

即使不考虑折射率随波长的改变, 得到的结果变化并不大。由表 1 可以看出, 此消色差波片的消色差偏差在 2% 左右的波长范围大约为 $540\text{nm} \sim 680\text{nm}$, 即使忽略相对折射率的差别, 所得到的结果仍然变化不大, 和上述结果基本保持一致。

3 实验测试与误差分析

3.1 实验测试

整个测试系统的主要部分是岛津 UV-3101PC 型分光光度计。实验装置主要光路结构如图 2 所示^[6],

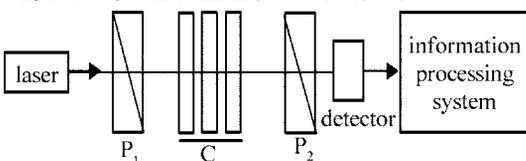


Fig 2 Experiment setup

同理可得, 第 2 波片在 λ 处的相位延迟量为:

$$\delta_2' = \delta_2 \times \frac{\Delta n \lambda_0}{\Delta n_0 \lambda} = \pi \times \frac{\Delta n \lambda_0}{\Delta n_0 \lambda} \quad (7)$$

将 (6) 式和 (7) 式分别代入 (2) 式得:

$$\cos(\delta'/2) = \cos\left\{\frac{\pi}{2} \times \frac{\Delta n \lambda_0}{\Delta n_0 \lambda}\right\} \cos\left\{\left[\pi \times \frac{\Delta n \lambda_0}{\Delta n_0 \lambda}\right] / 2\right\} - \sin\left\{\frac{\pi}{2} \times \frac{\Delta n \lambda_0}{\Delta n_0 \lambda}\right\} \sin\left\{\left[\pi \times \frac{\Delta n \lambda_0}{\Delta n_0 \lambda}\right] / 2\right\} \cos 2\theta \quad (8)$$

式中, δ 是不同波长下复合式延迟器总的延迟量, 将 $\theta = 3\pi/8$ 代入, 整理得:

$$\cos(\delta'/2) = \cos^2 \frac{\pi \Delta n \lambda_0}{2 \Delta n_0 \lambda} + 2 \sin^2 \frac{\pi \Delta n \lambda_0}{2 \Delta n_0 \lambda} / 2 \quad (9)$$

公式变形为:

$$\cos(\delta'/2) = \frac{1}{2} - \frac{2}{4} \cos \frac{\pi \Delta n \lambda_0}{\Delta n_0 \lambda} + \frac{2}{4} + 2 \quad (10)$$

那么, 相位延迟量即为:

$$\delta' = 2 \cos^{-1} \left[\frac{1}{2} - \frac{2}{4} \cos \frac{\pi \Delta n \lambda_0}{\Delta n_0 \lambda} + \frac{2}{4} + 2 \right] \quad (11)$$

在前面的研究中可以知道, 在已知中心波长 λ_0 周围一定的范围之内, 该器件具有消色差的作用。而其得到的消色差范围约为 $400\text{nm} \sim 900\text{nm}$ 。那么, 不妨以石英为例, 并取中心波长为 600nm , 通过图像拟合来看一下, 按照上述理论得到的延迟器消色差的范围是多少, 是否与实验值相吻合。将 $\lambda_0 = 600\text{nm}$ 代入, 并取不同的 λ 值, 得到对应不同的 δ 值, 见表 1。

把符合条件的 3 波片组合成复合式消色差 $\lambda/4$ 波片 C, 然后把它置于两个正交的偏光棱镜 P_1, P_2 之间, 各器件都装在具有微调功能的旋转支架上 (可读精度为 $5'$), 以保证快轴之间的夹角为 $3\pi/8$ 。

经过测试, 所得数据经计算机拟合后得到相位延迟量的测量值与理论值之间的对比关系如图 3 所示。

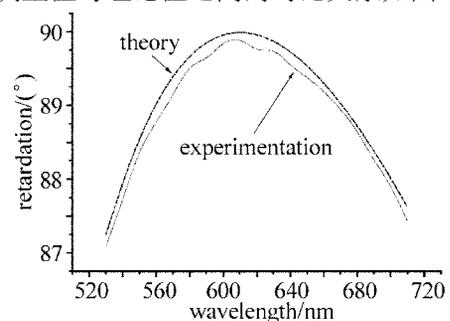


Fig 3 Variation of retardation phase with wave length

3.2 误差分析

实验测试的误差主要来自两个方面,一个是材料双折射率的测量误差^[7-8],另一个是多极片的厚度误差^[9-10]。

首先,对于双折射率的测量,现在已经有了很精密的测量技术,但仍存在一定的误差,目前测量水平只能精确到 0.01。

其次,器件本身的制造中就存在一定的误差,现在的工艺水平能达到 2% 的误差范围内已经很不错了,而实际测试器件的研磨工艺精度也只能达到 2'。

通过实验数据与理论值的对比得到的总的误差范围在 3% 以内 (见图 3)。所以,得到的测量值与理论值有一定的误差,但在允许范围之内。因此,可见本文中的理论推导是正确的。

4 结 论

经过上面的讨论可知,这种简单组合的 $\lambda/4$ 波片调整简单、使用方便。在其它一些文章中曾提到了对这种复合式消色差 $\lambda/4$ 波片的优化设计,但效果都不甚理想,而且很难应用于现实。而这种简单的复合式消色差 $\lambda/4$ 波片虽然消色差范围不是很大,但组合方便,更容易控制。经研究,其消色差范围并不像想象的那么大,只是在中心波长附近有较好的消色性,以中心波长为 600nm 时为例,偏差在 2% 以内的光谱范围

大约只有 540nm ~ 680nm,在一些精度要求不是很苛刻的领域更有其现实的应用价值。

参 考 文 献

- [1] DR COLL W G, VAUGHAN W. Handbook of optics [M]. New York: McGraw-Hill Book, 1978: 10-104.
 - [2] YUN M J, L I G H. Three-in-one composite achromatic $\lambda/4$ wave-plate [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2001, 12 (6): 562-564 (in Chinese).
 - [3] XUE D, L I G H, ZHENG Ch H, *et al* Theoretical analysis of the fast axis' equivalence principle of composite wave-plate [J]. Lasers Technology, 2004, 28 (1): 111-112 (in Chinese).
 - [4] L I H, SONG L K, L I G H. Orientation effect on phase retardation of compound binary zero-order wave-plate [J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22 (12): 1438-1441 (in Chinese).
 - [5] L I J Zh. Handbook of optics [M]. Ji'nan: Shandong Science Technology Press, 1986: 582 (in Chinese).
 - [6] JORG S, THEODOR S K. Liquid crystal phase retarder with broad spectral range [J]. Opt Commun, 2000, 176: 313-317.
 - [7] ZHENG Ch H, SONG L K. Optimizational design scheme for three-in-one composite achromatic $\lambda/4$ wave-plate [J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31 (6): 662-664 (in Chinese).
 - [8] WANG N, L I G H. A simple way of determining the phase delay angle of wave-plate [J]. Journal of Qufu Normal University, 2001, 27 (6): 47-49 (in Chinese).
 - [9] SONG L K, L I G H. Design of the three-element combination achromatic retarder made of mica and quartz [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2000, 11 (1): 51-53 (in Chinese).
 - [10] YUN M J, L I G H, WANG M. Design of three-in-one composite compensator [J]. Chinese Journal of Lasers, 2001, A28 (9): 14-15 (in Chinese).
-
- (上接第 46 页)
- [4] W DERSKIJ S, ZAJAC A, KONIECZNY P, *et al* Q-switched Nd-doped double-clad fiber laser [J]. Opto-Electronics Review, 2005, 13 (3), 187-191.
 - [5] CHERNIKOV S V, ZHU Y, TAYLOR J R, *et al* Supercontinuum self-Q-switched Ytterbium fiber laser [J]. Opt Lett, 1997, 22 (5): 298-300.
 - [6] ZENG H F, XIAO F H. The development of Yb-doped double-clad fiber laser and its application [J]. Laser Technology, 2006, 30 (4): 438-442 (in Chinese).
 - [7] MA H Q, ZHAO W, ZHANG W, *et al* Wavelength-tunable passively mode-locked fiber lasers [J]. Laser Technology, 2006, 30 (3): 289-291 (in Chinese).
 - [8] CHEN Z J, GRUDNINA B, PORTA J, *et al* Enhanced Q-switching in double-clad fiber lasers [J]. Opt Lett, 1998, 23 (6): 454-456.
 - [9] ALVAREZ-CHANE J A, OFFERHAUS L, NILSSON J, *et al* High-energy, high-power ytterbium-doped Q-switched fiber laser [J]. Opt Lett, 2000, 25 (1): 37-39.
 - [10] CHEN Z J, GRUDNINA B, PORTA J, *et al* Enhanced Q-switching in double-clad fiber lasers [J]. Opt Lett, 1998, 23 (6): 454-456.
 - [11] LU F Y, FAN Y X, WANG H J, *et al* Experimental study of cladding pumped Q-switched fiber laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2003, 30 (12): 1057-1060 (in Chinese).
 - [12] ZHANG Z X, FENG H G, YU X D, *et al* Distributed optical fiber Raman photonic sensor system [J]. Semiconductor Optoelectronics, 1999, 2 (20): 83-85 (in Chinese).
 - [13] XIE Ch X, LU F Y, ZHANG Sh M, *et al* Self-Q-switched and self-mode-locked erbium/Ytterbium co-doped fiber laser [J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35 (4): 485-488 (in Chinese).
 - [14] AGRAWAL G P. Nonlinear fiber optics, third edition & applications of nonlinear fiber optics [M]. Beijing: Publishing House of Electrical Industry, 2002: 223-237 (in Chinese).