

文章编号: 0258-7025(2004)06-0662-03

三元复合式消色差 $\lambda/4$ 波片的优化设计

郑春红¹, 宋连科¹, 梁荣饶²

(¹ 曲阜师范大学激光研究所, 山东 曲阜 273165; ² 青岛市第三中学物理组, 山东 青岛 266041)

摘要 复合消色差波片,因其延迟量在一定波长范围内不随波长变化,克服了常规延迟片只能用于单一波长的缺点而被广泛应用到通信、生物、地质、航空、航天、海洋等领域。根据复合波片理论,完成了同种材料三元复合式消色差 $\lambda/4$ 波片的设计理论;推导出消色差延迟片延迟量随波长变化的理论曲线;进而在平板型三元复合式消色差 $\lambda/4$ 波片的设计基础上提出了一种优化设计方案。理论证明,依据此方案根据具体的使用要求,通过精确调整复合角度,可使波片的消色差范围在相同延迟偏差下拓宽 130~140 nm,消色差精度也能得到相应的提高。为进一步拓宽消色差范围、提高复合波片的消色差性能奠定了很好的理论基础,而且技术操作简练可行,具有一定的实用价值。

关键词 物理光学;消色差;双折射;复合波片;复合角;延迟偏差

中图分类号 O 436.3 **文献标识码** A

Optimization Design Scheme for Three-in-One Composite Achromatic $\lambda/4$ Wave-Plate

ZHENG Chun-hong¹, SONG Lian-ke¹, LIANG Rong-rao²

(¹ Institute of Laser, Qufu Normal University, Qufu, Shandong 273165, China)
(² Number Three Middle School of Qingdao, Qingdao, Shandong 266041, China)

Abstract The achromatic wave-plates are widely used in communication, biology, geological, aviation and ocean because their retardation are not vary with wavelength unlike the common ones. This article gives the designed theory for the identical material three-in-one composite achromatic $\lambda/4$ wave-plate according to composite wave-plate theory, generalizes the theoretical curve between retardation and wavelength, then a optimum design scheme is put forward based on flat-plate three-in-one composite achromatic wave-plate in response to theoretical curve of retardation. Theory analysis shows that this design can improve achromatic range from 130 to 140 nm which is longer than common ones under the same delay deviation, and advances its achromatic accuracy by adjusting composite angle exactly for specific operating requirements.

Key words physics optics; achromatism; birefringence; composite wave-plate; composite angle; delay deviation

1 引 言

在现代光学测试技术中,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,越来越受到人们的重视,但是常规的相位延迟器多用于单一波长或极窄的波长范围,不能适用于复色光,这在使用时极为不便。光相位延迟量与波长无关的延迟器称为消色差延迟器,消色差延迟器削弱了相位延迟

量对波长的依赖程度,可以用于较大的光谱范围,宽带消色差相位延迟器,其应用范围可以扩大到整个可见光谱区,甚至可以延伸到近红外。消色差相位延迟器的这一显著特点,使其不但可以满足现代激光和偏光技术研究工作的需要,而且可以大大拓宽相关仪器的应用范围(如光谱分析仪等)。消色差延迟器的设计形式多种多样,设计思路也不尽相

收稿日期:2003-02-27;收到修改稿日期:2003-04-18

作者简介:郑春红(1976—),女,山东省武城县人,曲阜师范大学激光研究所硕士研究生,主要从事光学晶体偏光特性及偏光器件方面的研究。E-mail:zchjgs@eyou.com

同^[1,2],但其共同目的都是拓宽消色差范围和um提高延迟精度。本文也遵循这一设计思想并利用复合波片理论,在平板型三元复合式消色差 $\lambda/4$ 波片的设计^[3,4]基础上提出了一种优化设计方法,根据具体的使用要求,选择不同的复合角度,使得消色差光谱范围、消色差精度有了进一步的提高。

2 三元复合消色差波片的设计原理

消色差波片可以利用同样材料的三个双折射多级片串联而成,理论认为^[5],两边的两个具有相同的延迟量,并使它们的快轴相互平行,中间的多级片对于覆盖的光谱范围的中心波长 λ_0 是 $\lambda/2$ 多级片,这种设计在一定的光谱范围内应该是消色差的。

根据复合波片理论,在三片组合中,设 $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ 分别为第一、第二和第三个波片的延迟量,当 $\delta_1 =$

δ_3 ,第一和第三个波片快轴平行,第二波片的快轴与第一波片快轴夹角为 θ 时,复合波片的延迟量 δ ,等效快轴与第一波片快轴的夹角 ϕ 满足^[6]

$$\cos(\delta/2) = \cos\delta_1 \cos(\delta_2/2) - \sin\delta_1 \sin(\delta_2/2) \cos 2\theta \quad (1)$$

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

如果第二个波片为 $\lambda/2$ 片,复合片的延迟量 δ 为 $\lambda/4$,则(1),(2)可写成

$$\cos 2\theta = -\frac{\sqrt{2}}{2} / \sin\delta_1, \quad \cot 2\phi = \cot 2\theta \cos\delta_1 \quad (3)$$

由于 $|\cos 2\theta| \leq 1$,所以第一、三波片的延迟量必须满足

$$\pi/4 \leq \delta_1 = \delta_3 \leq 3\pi/4 \quad (4)$$

为讨论方便,这里只取 $[\pi/4, 3\pi/4]$ 内的值。

由(3)式可以得出不同的 δ_1 对应的 θ 和 ϕ 角,如表 1 所示。

表 1 不同 δ_1 下的 θ 和 ϕ 值

Table 1 Values of θ and ϕ under varied δ_1

$\delta_1 / (^\circ)$	45	55	65	75	85	90	95	105	115	125	135
$\theta / (^\circ)$	90.0	74.8	70.6	68.5	67.6	67.5	67.6	68.5	70.6	74.8	90.0
$\phi / (^\circ)$	90.0	67.2	58.9	52.8	47.5	45.0	42.5	37.2	31.1	22.8	0.0

由表 1 可以看出,互补的两个 δ_1 值对应的 θ 角大小相等,但是相应的等效快轴与第一波片快轴夹角互为余数。

如果在 λ_0 附近可以假设材料的折射率差 Δn 不随波长 λ 变化而变化(如云母在可见光范围内),则由 $\delta = 2\pi\Delta nd/\lambda$ 可得到延迟片在波长 λ 处的延迟量分别为

$$\delta_1' = \delta_1 \times \lambda_0 / \lambda \quad (5)$$

$$\delta_2' = \delta_2 \times \lambda_0 / \lambda = \pi \times \lambda_0 / \lambda \quad (6)$$

将式(5),(6)代入式(1)得

$$\begin{aligned} \cos(\delta'/2) &= \cos(\delta_1 \times \lambda_0 / \lambda) \cos[(\pi \times \lambda_0 / \lambda) / 2] - \\ &\quad \sin(\delta_1 \times \lambda_0 / \lambda) \sin[(\pi \times \lambda_0 / \lambda) / 2] \cos 2\theta \end{aligned} \quad (7)$$

取中心波长 $\lambda_0 = 750 \text{ nm}$,得出 δ' 在不同波长下的变化曲线如图 1 所示。由图 1 可以看出:1) 该组合系统在一定波长范围内是消色差的;2) 当 δ_1 为 105° 时,中心波长处曲线最平滑,消色差性能最好。消色差上限波长可以扩展到 980 nm (如图 2 所示)。

由此可以选择不同的 δ_1 和 θ 组成复合式消色差波片。这种复合波片与相应的二元复合片相比,消色差的光谱范围变宽,偏差变小。但偏差小于 3%

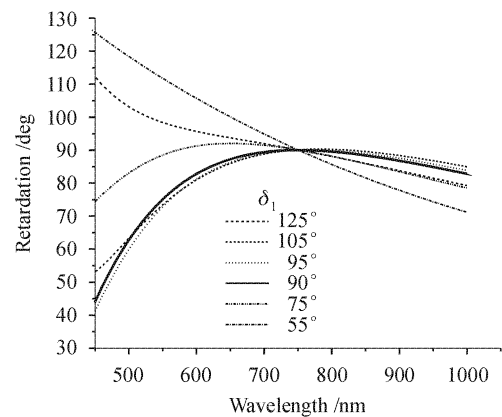


图 1 不同 δ_1 下 δ 随 λ 的变化曲线
Fig. 1 Relation between δ and λ under varied δ_1

的消色差范围平均也只能达到 200 nm 左右。

3 复合式消色差波片优化设计可行性研究

由图 2 可以发现,复合片的延迟量的最大值近似为 90° ,并且延迟偏差为单向偏差,这为我们的优

化设计提供了一种方案,即采取某种措施,使得整个曲线产生微量上移,使单向偏差变为双向偏差,从而拓宽消色差的波长范围,提高其消色差性能。

研究发现,复合波片的延迟量与复合角 θ 密切相关,稍微改变 θ 可以使 δ - λ 曲线向上移动。以最小间隔为 0.1° 在 θ 附近取值进行讨论,并作出了不同 θ

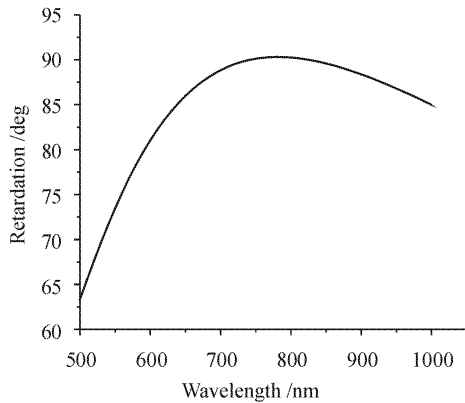


图 2 $\delta_1 = 105^\circ$ 时 δ 随 λ 的变化曲线

Fig. 2 Relation between δ and λ when $\delta_1 = 105^\circ$

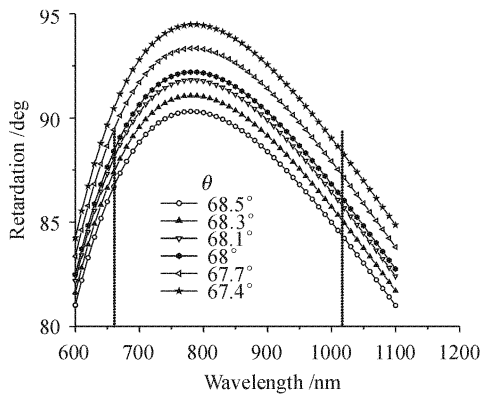


图 3 $\delta_1 = 105^\circ$ 时,不同复合角下延迟量 δ 随波长 λ 的变化曲线

Fig. 3 Relation between δ and λ under varied θ when $\delta_1 = 105^\circ$

角下延迟量随波长的变化曲线(如图 3 所示)。

由图 3 可以看出,当 θ 由复合角 68.5° 逐渐变小时,曲线上移,从而使得复合延迟片的消色差光谱范围在规定的误差范围内增大。如果要求偏差为 5%,当复合角由 68.5° 减小到 67.4° 时,消色差范围由 $650 \sim 980 \text{ nm}$ 变为 $610 \sim 1080 \text{ nm}$,其消色差性能得到了明显的改善。复合角 θ 为 67.7° 时,在 $630 \sim 1030 \text{ nm}$ 的光谱范围内,偏差可控制在 4% 以内; θ 为 68° 时,在 $650 \sim 980 \text{ nm}$ 的 330 nm 光谱范围内,偏差可控制在 3% 以内,比优化设计之前拓宽了 130 nm ; θ 为 68.1° 时,在 $670 \sim 950 \text{ nm}$ 的光谱范围内,偏差可控制在 2% 以内。

实验证明,采用三元复合优化设计方法,根据具体消色差要求,调整复合角,获得满意的技术指标是可行的,但是在实际设计中值得注意的一点是,角度的调整精度一定要达到 0.1° 以内,以利于误差的减小。

参 考 文 献

- 1 W. G. Driscoll, W. Vaughan. Handbook of Optics [M]. New York: McGraw-Hill Book Co, 1978. 10~142
- 2 J. M. Bennett. A critical evaluation of Rhomb-type quarterwave retarders [J]. *Appl. Opt.*, 1970, (9):2122~2123
- 3 Song Lian-ke, Li Guo-hua. Design of the three-element combination achromatic retarder made of mica and quartz [J]. *J. Optoelectronics & Laser*, 2000, 11(1):51~53
宋连科,李国华. 云母、石英晶体三元组合式消色差延迟器设计 [J]. *光电子·激光*, 2000, 11(1):51~53
- 4 Yun Mao-jin, Li Guo-hua, Wang Mei *et al.*. Three-in-one composite achromatic $\lambda/4$ wave-plate [J]. *J. Optoelectronics & Laser*, 2001, 12(6):562~564
云茂金,李国华,王美等. 三元复合式消色差 $\lambda/4$ 波片 [J]. *光电子·激光*, 2001, 12(6):562~564
- 5 Li Jing-zhen. Handbook of Optics [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1986. 582
李景镇. 光学手册 [M]. 西安:陕西科学技术出版社, 1986. 582
- 6 Jorg Schirmer, Theodor Schmidt-Kaler. Liquid crystal phase retarder with broad spectral range [J]. *Opt. Commun.*, 2000, 176:313~317