

文章编号: 0258-7025(2004)03-0281-03

红外复合宽带波片的研制

侯 杰^{1,2}, 杨坤涛¹, 吴 励², 朱鹏飞³

¹ 华中科技大学光电子系, 湖北 武汉 430074;
² 福建华科光电有限公司, 福建 福州 350014; ³ 上海交通大学物理系, 上海 200240

摘要 波片延迟片是光学系统中常用的一种重要光学器件。通常所指的 $\lambda/2$ 和 $\lambda/4$ 波片是对某特定波长而言的, 当光波长偏离该特定波长时, 其位相延迟量也将随之发生变化。在光谱整形、激光调谐和光通讯等领域中经常使用宽带波片, 它在一定带宽内的延迟量是相同的。国内大多数的厂商一般只能生产单波段波片(带宽仅 ± 40 nm), 本文用计算机仿真设计了红外宽带高精度复合波片, 采用石英晶体材料加工出来的复合波片性能与设计指标符合得较好。波片适用范围为 1200~1650 nm, 中心波长为 1390 nm, $\lambda/2$ 波片的位相延迟量范围为 $180.0^\circ \pm 3.6^\circ$, $\lambda/4$ 波片的位相延迟量范围为 $90.0^\circ \pm 3.6^\circ$, 即相位延迟误差 $\lambda/100$ 。

关键词 应用光学; 红外; 宽带; 复合; 波片; 计算机仿真

中图分类号 O 439 文献标识码 A

Studies of Infrared Broadband Compound Waveplate

HOU Jie^{1,2}, YANG Kun-tao¹, WU Li², ZHU Peng-fei³

¹ Department of Photoelectric Technology, Huazhong Science and Technology University, Wuhan, Hubei 430074, China
² CASIX INC Fujian, Fuzhou, Fujian 350014, China
³ Department of Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China

Abstract The waveplate is a usual but important component in optical system. Generally, $\lambda/2$ (or $\lambda/4$) waveplate is work at specifically wavelength. If the wavelength of the wave is not match to that of the waveplate, the phase retardation of wave would not π (or $\pi/2$). The broadband waveplate which the phase retardation is same in its bandwidth is widely used in spectrum shaping, laser tuning and optical communication. In this paper, an infrared three-stage waveplate is designed with the feature of wide band and high-resolution by the aid of computer simulation. The result of experiment turns to be high consistency with the design. The appropriate wavelength range of the waveplate is 1200~1650 nm. The central wavelength is 1390 nm. The phase retardation for $\lambda/2$ complex waveplate is $180.0^\circ \pm 3.6^\circ$ and $90.0^\circ \pm 3.6^\circ$ for $\lambda/4$ ones.

Key words applied optics; infrared; broadband; compound; waveplate; computer simulation

1 引 言

波片延迟片是实现光调制器光偏振态变换中的重要光学器件之一。通常所指的 $\lambda/2$ 和 $\lambda/4$ 波片是对某特定波长而言的, 因此当 λ 偏离该特定波长时, 其位相延迟量也将随之发生变化, 造成这一现象的原因除材料本身光学性质制约外还与波片的厚度和延迟精度有关系。根据复合波片的理论^[1], 对于满足一定条件的两个或者多个特定延迟量的波片构成的

复合波片系统, 当它们快轴之间的夹角满足某一特定值时, 可以实现在某个特定带宽内的 $\lambda/2$ 或者 $\lambda/4$ 波片。宽带复合波片应用很广泛。应用在常用的光通讯波段 1200~1650 nm 上, 利用其宽带消色差的优良特性可以大大改善光通讯器件的性能, 代替以往要用多个波片才能工作的光路, 从而降低了器件装配工艺的难度和成本。在红外激光领域中, 复合波片也常用于光谱整形、激光调谐等。国内已经研制出 480~760 nm 范围内的二元消色差 $\lambda/4$ 波片^[2]

收稿日期: 2002-09-29; 收到修改稿日期: 2003-01-06

作者简介: 侯杰(1973—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事光学及光电子器件的研制与开发。E-mail: jacyhou@optiwork.com.cn

以及 400~900 nm 范围内的三元复合波片^[3], 国外已经有很多公司在开发复合宽带波片。美国的 Special Optics 公司生产的 $\lambda/4$ 和 $\lambda/2$ 的复合宽带波片, 采用一片石英晶体和一片 MgF_2 晶体组合实现波谱在紫外、可见光、红外波段的零级波片, 延迟精度可达到 $\lambda/100$ 。日本在这方面的技术也开发得很早, 如 KOGAKUGIKEN CO. LTD 公司加工的宽带波片在整个波带的延迟量都很稳定。

我们采用晶体石英材料的三元平面式结构, 设计研制了高精度的红外宽带半波片和 $\lambda/4$ 波片。在 1200~1650 nm 波段内, 中心波长为 1390 nm, 延迟精度为 $\lambda/100$, 即 $\lambda/2$ 波片的位相延迟量变化范围为 $176.4^\circ \sim 183.6^\circ$, $\lambda/4$ 波片的位相延迟量变化范围为 $86.4^\circ \sim 93.6^\circ$ 。

2 复合波片的原理与设计

如果将多个不同厚度的波片按一定角度放置,

使复合波片的等效快轴与偏振光的偏振方向成一定夹角, 可实现 $\lambda/2$ 波片或 $\lambda/4$ 波片的功能^[4]。在如图 1 所示的三个石英波片组合的系统中, 设 $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ 分别为第 1, 第 2 和第 3 波片的延迟量, 且有 $\delta_1 = \delta_3$, 若第 1 和第 3 波片的快轴平行, 第 2 波片的快轴与第 1 和第 3 波片的快轴夹角为 γ , 复合波片延迟量为 δ , 等效快轴与第 1 和第 3 波片快轴的夹角为 φ , 则有^[5]

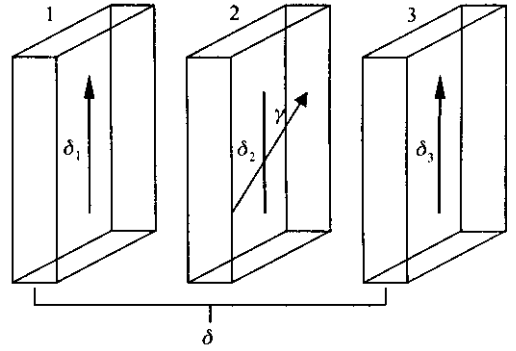


图 1 三元复合波片的结构图

Fig. 1 Three-elements combination waveplate

$$\cos\left[\frac{\delta(\lambda)}{2}\right] = \cos\delta_1(\lambda)\cos\left[\frac{\delta_2(\lambda)}{2}\right] - \sin\delta_1(\lambda)\sin\left[\frac{\delta_2(\lambda)}{2}\right]\cos 2\gamma \quad (1)$$

$$\cot 2\varphi(\lambda) = \csc 2\gamma \left\{ \sin\delta_1(\lambda)\cot\left[\frac{\delta_2(\lambda)}{2}\right] + \cos\delta_1(\lambda)\cos 2\gamma \right\} \quad (2)$$

偏振光分别通过三个波片后产生的位相延迟量分别为

$$\left. \begin{aligned} \delta_1(\lambda) &= \frac{d_1 \cdot [n_o(\lambda) - n_e(\lambda)]}{\lambda} \cdot 2\pi \\ \delta_2(\lambda) &= \frac{d_2 \cdot [n_o(\lambda) - n_e(\lambda)]}{\lambda} \cdot 2\pi \\ \delta_3(\lambda) &= \frac{d_3 \cdot [n_o(\lambda) - n_e(\lambda)]}{\lambda} \cdot 2\pi = \delta_1(\lambda) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 d_1, d_2, d_3 为第 1, 第 2 和第 3 波片的厚度。

由(1)式可求出复合波片总的延迟量 $\delta(\lambda)$ 为

$$\delta(\lambda) = 2\arccos \left\{ \cos[\delta_1(\lambda)]\cos\left[\frac{\delta_2(\lambda)}{2}\right] - \sin[\delta_1(\lambda)]\sin\left[\frac{\delta_2(\lambda)}{2}\right]\cos(2\gamma) \right\} \cdot \frac{180}{\pi} \quad (4)$$

由(2)式可得复合波片的等效快轴与偏振光方向的夹角 $\varphi(\lambda)$ 为

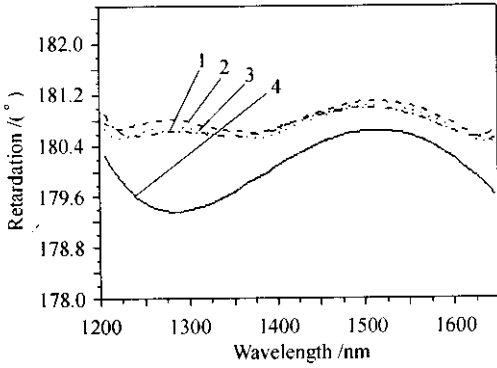
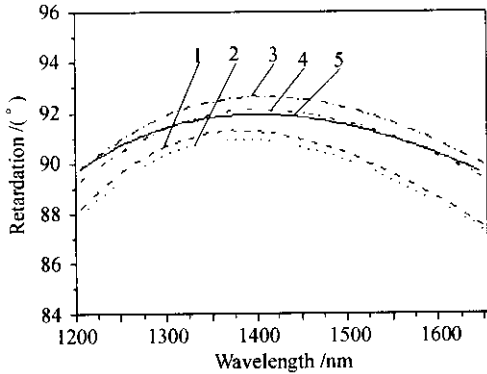
$$\varphi(\lambda) = \frac{1}{2}\arctan \left\{ \csc(2\gamma) \left\{ \sin[\delta_1(\lambda)]\cot\left[\frac{\delta_2(\lambda)}{2}\right] + \cos[\delta_1(\lambda)]\cos(2\gamma) \right\} \right\} \cdot \frac{180}{\pi} \quad (5)$$

如果令 1, 2, 3 波片均为中心波长 1390 nm 处的零级 $\lambda/2$, 可得出 $d_1 = d_2 = d_3 = 8.108 \times 10^4$ nm, 此时要得到复合 $\lambda/2$ 波片, 利用(3)~(5)式, 通过计算机辅助软件 MathCAD 进行仿真模拟计算, 得出当 $\gamma = 59.0^\circ$ 时的波长 λ 与延迟量 δ 的理论曲线如图 2, 符合设计要求。同样可以得出复合 $\lambda/4$ 关系曲线如图 3, 令 1, 3 波片为中心波长处的零级 $\lambda/4$, 令波片 2

为中心波长处的零级 $\lambda/2$ 波片, 即: $d_1 = d_3 = 5.205 \times 10^4$ nm, $d_2 = 8.108 \times 10^4$ nm, $\gamma = 70.2^\circ$ 。

3 加工与测试结果分析

按计算机仿真模拟设计的参数进行加工。首先用 X 射线定向仪来保证波片的光轴的方向, 表面抛光时, 采用光胶上盘的抛光工艺来保证波片的表面

图2 $\lambda/2$ 波片的延迟曲线Fig. 2 Retardation function for $\lambda/2$ complex waveplate图3 $\lambda/4$ 波片的延迟曲线Fig. 3 Retardation function for $\lambda/4$ complex waveplate

光洁度、平面度、平行度,为了在测量时不破坏已抛光好的波片表面,采用高精度的非接触式测量仪来精确测量波片的厚度。为了增强波片的性能,在复合波片的两个端面镀上 1200~1650 nm 的宽带增透膜,使该波段的剩余反射率 $<0.1\%$ 。由于应用在光通讯器件上必须采用小尺寸的波片,为了减少加工难度,先加工成 11 mm \times 12 mm 的大片,最后切割成要求的各种小尺寸,如 1 mm \times 1 mm,1.2 mm \times 2 mm 等。

最后从批量加工好了的 $\lambda/2$ 复合波片中任选了 3 个进行测量,结果如图 2 所示。曲线 1,2,3 分别代表 3 个实验复合波片,曲线 4 代表理论曲线,可以看出,延迟量的误差控制在 0.7° 以内。从批量生产出

的 $\lambda/4$ 复合波片中任选 4 片进行测量,结果如图 3 所示。曲线 1,2,3,4 分别代表任选的 4 个 $\lambda/4$ 复合波片,曲线 5 代表理论曲线,延迟量的误差控制在 1.5° 以内。这些实际加工出的复合波片基本符合延迟量的要求而且较为接近理论值。

4 结 论

我们在加工流程中进行了严格细致的操作并且应用了一些先进的设备和生产工艺,从而使实际加工出的复合宽带波片较为符合预先用计算机仿真设计的效果。复合宽带波片的设计和原理给我们带来很多新思路,用同样的方法可以设计不同材料的二片、三片或者多片的组合来实现不同波段、不同带宽的复合波片。复合宽带波片同时具有在宽光谱范围内对介质的色散不敏感的特性,因此具有良好的消色差功能。由于复合宽带波片降低了光纤器件的成本,改善了器件的性能,今后它将更广泛地应用在光通讯等领域上。

致谢 感谢林磊、王晓东、张亚洲、林珍等在实验中给予的帮助。

参 考 文 献

- 1 I. V. Goltser, M. Ya. Darscht, N. D. Kundikiva *et al.*. An adjustable quarter-wave plate [J]. *Opt. Commun.*, 1993, **97**(5, 6):291~294
- 2 Su Meikai, Li Guohua, Song Lianke. An chromatic $\lambda/4$ waveplate [J]. *Laser Technology*, 1996, **20**(1):29~31
苏美开,李国华,宋连科. 消色差 $\lambda/4$ 波片[J]. *激光技术*, 1996, **20**(1):29~31
- 3 Yun Maojin, Li Guohua, Wang Mei *et al.*. There-in-one composite achromatic $\lambda/4$ wave-plate [J]. *Journal of 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
- 4 Song Lianke, Li Guohua. Design of the three-element combination achromatic retarder made of mica and quartz [J]. *Journal of 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
- 5 Jörg Schirmer, Theodor Schmidt-Kaler. Liquid crystal phase retarder with broad spectral range [J]. *Opt. Commun.*, 2000, **176**:313~317