

文章编号: 1001-3806(2012)04-0565-03

高精度菱体型消色差延迟器的双波长设计

李国良

(兴义民族师范学院 物理系, 兴义 562400)

摘要: 为了提高菱体型消色差延迟器件的消色差精度, 当光以两个波长设计点入射时, 根据光的折射定律, 并采用全内反射角 θ 和折射角 r 之和为固定值的方法, 进行了双波长设计的理论分析。由于延迟误差为正负偏差, 整个光谱区域内在两个波长设计点延迟量为 90° , 同时设计时对两个波长设计点的选择进行了优化, 使 $\lambda/4$ 相位延迟器的消色差精度大大提高。用 LaK2 玻璃对 $\lambda/4$ 相位延迟器在 $360\text{nm} \sim 1160\text{nm}$ 的光谱区域内进行设计, 取得了最大延迟误差小于 0.02° 的数据。结果表明, 与其它两种设计方法相比, 该方法不仅设计理论简化, 而且具有更高的消色差精度。这一结果对设计高精度消色差延迟器是有帮助的。

关键词: 光学器件; 高精度; 折射定律; 消色差

中图分类号: O436.3

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.04.033

Dual-wavelength design of high precision rhomb-type achromatic retarders

Li Guo-liang

(Department of Physics, Xingyi Normal University for Nationalities, Xingyi 562400, China)

Abstract: In order to improve the precision of rhomb-type achromatic retarders, according to the optical refraction rule and based on that the sum of the angle of total reflection θ and the reflection angle r is constant, dual-wavelength design was analyzed for two different wavelength beams incident on the retarder. Since the delay errors were the positive and negative, retardation was 90° at two wavelengths in the whole region of spectrum. Simultaneously, achromatic precision of the $\lambda/4$ retarder was enhanced greatly after optimum design for two wavelengths. The maximal delay error was smaller than 0.02° for a $\lambda/4$ retarder designed with LaK2 glass within the range of $360\text{nm} \sim 1160\text{nm}$. Compared with other two designing methods, the new designed retarder not only simplifies the designing theory, but also has higher achromatic precision, and the results are helpful to the design of high precision rhomb-type achromatic retarders.

Key words: optical devices; high precision; refraction rule; achromatism

引言

消色差相位延迟器是一种重要的光学器件, 也是一种对使用波长不敏感的光相位调制器件。它有多种制成方法, 例如可以用双折射材料进行组合^[1-4], 也可以根据全内反射原理^[5-7]制成全内反射型消色差延迟器。全内反射型消色差延迟器由于结构简单, 对波长的依赖较小, 因而获得广泛的应用。其中长方体型消色差延迟器^[8-9]由于消色差光谱范围较宽、精度较高, 因而获得广泛的研究。长方体型消色差延迟器设计的方法有多种: 方法一^[8]是单波长设计方法, 即令 $d\delta/dn = 0$

时折射率 n 所对应的相位延迟为 90° , 采用这种方法设计的延迟器件, 在 $365\text{nm} \sim 1150\text{nm}$ 的光谱区域内最大延迟误差为 0.4° ; 方法二^[9]也是单波长设计方法, 但令 $d\delta/dn = 0$ 时, 折射率 n 所对应的相位延迟为 $(90^\circ + \varepsilon)$, 其中 ε 为一正值。同方法一相比, 方法二由于使 $\lambda/4$ 相位延迟器的延迟误差由负偏差变为正负偏差, 在整个光谱区域内有两个波长延迟量为 90° , 因而大大提高了消色差精度。采用这种方法设计的延迟器件, 在 $360\text{nm} \sim 1160\text{nm}$ 的光谱区域内最大延迟误差为 0.04° 。这给作者在设计时以启发, 既然在整个光谱区域内有两个波长点延迟量为 90° , 那么就可以利用在两个波长点延迟量同时达到 90° 来对延迟器件进行设计, 即采用双波长设计方法。相对两种单波长设计方法, 双波长设计方法不但对复杂的单波长设计理论进行了简化, 而且设计出的消色差延迟器件精度高, 为设计高精度消色差延迟器件提供了一种优越的设计方法。

基金项目: 兴义民族师范学院科学研究基金资助项目 (11XYZ05)

作者简介: 李国良(1979-), 男, 硕士, 讲师, 主要从事光学器件方面的研究。

E-mail: liguolianglq@163.com

收稿日期: 2011-09-29; 收到修改稿日期: 2011-12-09

1 双波长设计理论

一束光水平射向如图1所示的长方体型消色差延迟器件,发生两次全内反射后水平射出,全内反射角 θ 与入射角 i 、结构角 α 的关系如下式所示:

$$\theta = \alpha - r \quad (1)$$

由于光束在器件内发生两次全内反射,因而产生总的相位延迟 δ 与全内反射角 θ 及折射率 n 的关系如下式所示^[10-11]:

$$\delta = 4 \tan^{-1} [\cos \theta (n^2 \sin^2 \theta - 1)^{1/2} / (n \sin^2 \theta)] \quad (2)$$

式中 $\delta = f_1(n, \theta)$, $\theta = f_2(n)$, $n = f_3(\lambda)$ 。

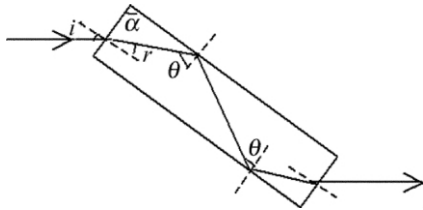


Fig. 1 Optical path in the rectangular parallelepiped phase retarder

由(2)式可知,相位延迟 δ 不仅与全内反射角 θ 有关,而且还依赖于材料的折射率 n 。而材料的折射率一般与入射光的波长有关,波长的改变引起折射率的变化,从而导致了相位延迟 δ 的改变。而在使用过程中希望尽量减缓相位延迟 δ 的这种变化,因而需要设计消色差延迟器件。对(2)式整理可得:

$$\theta = \sin^{-1} \{ [(n^2 + 1) + (n^4 - 4n^2 C^2 - 2n^2 + 1)^{1/2}] / [2n^2 (C^2 + 1)] \}^{1/2} \quad (3)$$

因为两个波长设计点处相位延迟 $\delta = 90^\circ$,故 $C = \tan(90^\circ/4)$ 。如果采用双波长设计方法,即在波长设计点 λ_1 (折射率为 n_1)和 λ_2 (折射率为 n_2)处延迟量为 90° ,设 $\lambda_1 < \lambda_2$,并且在波长 λ_1 和 λ_2 入射时全内反射角和折射角分别设为 θ_1, r_1 和 θ_2, r_2 ,将折射率 n_1 和 n_2 代入(3)式,即可求出对应的全内反射角 θ_1 和 θ_2 。

不同波长的入射光线以相同的入射角入射时,全内反射角 θ 和折射角 r 虽然不同,但由(1)式可知,全内反射角 θ 和折射角 r 的和为固定值,因此当以波长 λ_1 和 λ_2 入射时,有:

$$\theta_1 + r_1 = \alpha \quad (4)$$

$$\theta_2 + r_2 = \alpha \quad (5)$$

而当入射光线在波长 λ_1 和 λ_2 处以入射角 i 入射时,由光的折射定律^[12]可得:

$$\sin i = n_1 \sin r_1 \quad (6)$$

$$\sin i = n_2 \sin r_2 \quad (7)$$

由(4)式~(7)式可得:

$$r_1 = \tan^{-1} \{ n_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) / [n_1 - n_2 \cos(\theta_1 - \theta_2)] \} \quad (8)$$

$$i = \sin^{-1}(n_1 \sin r_1) \quad (9)$$

因此所要设计器件的结构角为:

$$\alpha = \theta_1 + \tan^{-1} \{ n_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) / [n_1 - n_2 \cos(\theta_1 - \theta_2)] \} \quad (10)$$

在双波长设计中,设计目标是找到一个最优化的结构角 α 和入射角 i 。由(9)式和(10)式可以看出,结构角 α 和入射角 i 可由折射率设计点 n_1 和 n_2 求出,因此找出最优化的折射率设计点 n_1 和 n_2 显得非常重要。

2 折射率设计点 n_1 和 n_2 的选择

在 $\lambda/4$ 消色差延迟器件的双波长设计方法中,对折射率设计点 n_1 和 n_2 的选择就显得非常重要。如果要在波长 λ_{10} (折射率为 n_{10})和 λ_{20} (折射率为 n_{20})的光谱范围内设计 $\lambda/4$ 消色差延迟器件,且 $\lambda_{10} < \lambda_{20}$,为了选出合适的折射率设计点 n_1 和 n_2 ,应注意以下规律。

(1) 延迟曲线的规律。对于要设计的 $\lambda/4$ 消色差延迟器件,相位延迟 δ 随着折射率 n 的增加先变大后变小。除在折射率设计点 n_1 和 n_2 处相位延迟为 90° ,当 $n_0 < n < n_1$ 时,相位延迟 δ 均大于 90° ,而在其它区域相位延迟 δ 均小于 90° 。

(2) 折射率设计点 n_1 和 n_2 的选择。当在 $[n_{20}, n_{10}]$ 之间设计延迟器件时,延迟曲线近似高度对称。虽然在不同区域设计时,由于 n_{20} 和 n_{10} 的不同导致折射率设计点 n_2 和 n_1 发生变化,但 n_2 和 n_1 却高度近似满足经验表达式: $n_2 = n_{20} + 0.14(n_{10} - n_{20})$, $n_1 = n_{10} - 0.15(n_{10} - n_{20})$ 。通过经验表达式计算出来的折射率设计点 n_1 和 n_2 对延迟器件进行设计。

3 消色差延迟器的双波长设计

作为设计特例说明,采用双波长设计方法,用LaK2玻璃对 $\lambda/4$ 消色差延迟器在360nm~1160nm的光谱区域内进行再设计。通过对双波长设计点进行优化,分别选择波长 $\lambda_1 = 390\text{nm}$ (折射率 $n_1 = 1.7169$)和 $\lambda_2 = 810\text{nm}$ (折射率 $n_2 = 1.6827$)为波长设计点。通过理论计算得出:入射角 $i = 43.75^\circ$,结构角 $\alpha = 84.70^\circ$,新设计的延迟器件的延迟曲线如图2所示。

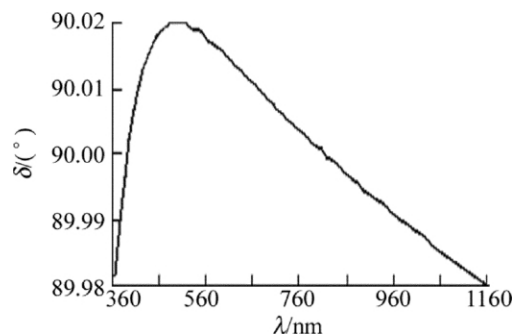


Fig. 2 Variation of δ with wavelength λ

由图2可知:(1)采用双波长设计的延迟器件在两个波长设计点延迟量为 90° ,且其延迟量在 $360\text{nm} \sim 1160\text{nm}$ 的光谱区域内,最大延迟误差小于 0.02° ,具有很高的消色差精度;(2)而方法一设计的特殊角度入射的延迟器件,在 $365\text{nm} \sim 1150\text{nm}$ 的光谱区域内最大延迟误差为 0.4° ,与其相比,采用双波长设计方法设计的延迟器件不仅设计理论简化,而且消色差精度有了较大的提高;(3)而方法二设计的特殊角度入射的延迟器件,在 $360\text{nm} \sim 1160\text{nm}$ 的光谱区域内最大延迟误差为 0.04° ,与其相比,用双波长设计方法设计的延迟器件不仅设计理论简化,而且消色差精度也有提高。

4 误差分析

在实际使用中,由于延迟器件在制造时存在加工误差,并且使用时入射光线也有微小偏差,这都将影响延迟器件的消色差精度。

首先,对材料的加工而言,虽然已经有了很精密的加工技术,但仍存在一定的误差。在器件的实际加工过程中,高精度的加工技术能使误差控制在 $\Delta\alpha \leq 0.01^\circ$ 。而当 $\Delta\alpha = 0.01^\circ$ 时,其延迟误差在 $360\text{nm} \sim 1160\text{nm}$ 的光谱区域内小于 0.05° 。

其次,在使用过程中,外入射光线的微小偏差也会对延迟器件的延迟量产生影响。在器件的实际使用过程中,外入射角的误差能控制在 $\Delta i \leq 0.02^\circ$ 。而当 $\Delta i = 0.02^\circ$,其延迟误差在 $360\text{nm} \sim 1160\text{nm}$ 的光谱区域内小于 0.05° 。

综合考虑器件的加工误差和外入射光线微小偏差对延迟器件消色差精度的影响,即当 $\Delta\alpha \leq 0.01^\circ$ 和 $\Delta i \leq 0.02^\circ$ 时,采用双波长设计方法设计的延迟器件在 $360\text{nm} \sim 1160\text{nm}$ 的光谱区域内延迟误差也将小于 0.07° 。因此,采用双波长设计的延迟器件不仅消色差精度高,而且受外界条件影响小,故新设计的延迟器件具有极大的优越性。

5 结论

在设计菱体型消色差 $\lambda/4$ 延迟器件时,由于采用

双波长设计方法,使延迟器件的延迟误差为正负偏差,在整个光谱区域内在两个波长设计点相位延迟为 90° ,因此有非常高的消色差精度。相比其它两种设计方法,不仅设计理论简化,而且具有更高的消色差精度。采用LaK2玻璃新设计的延迟器件在 $360\text{nm} \sim 1160\text{nm}$ 的光谱区域内延迟误差小于 0.02° 。但在器件的加工及使用中,应尽量减小器件的加工误差和外入射光线的入射偏差。

参考文献

- [1] YUN M J, LI G H, WANG M, *et al.* Three-in-one composite achromatic $\lambda/4$ wave-plate[J]. Journal of Optoelectronics • Laser 2001, 12(6): 562-564(in Chinese).
- [2] McINTYRE C M, HARRIS S E. Achromatic wave plates for the visible spectrum[J]. Journal of the Optical Society of America, 1968, 58(12): 1575-1580.
- [3] YE Ch. Construction of an optical rotator using quarterwave plates and optical retarders[J]. Optical Engineering, 1995, 34(10): 3031-3035.
- [4] SONG L K, LI 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).
- [5] LI J Zh. Optical handbook[M]. Xi'an: Science and Technology Press of Shaanxi, 1986: 576-580(in Chinese).
- [6] LI G L, SONG L K, HAO D Zh, *et al.* Optical design of rhomb-type achromatism retarder[J]. Laser Technology, 2006, 30(5): 539-540(in Chinese).
- [7] LI G L, SONG L K, HAO D Zh, *et al.* Sensitivity of rhomb-type phase retarders to the input angle[J]. Laser Technology, 2008, 32(2): 157-158(in Chinese).
- [8] ZHAO P T, LI G H, WU F Q. New design of high precision achromatic phase retarder[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(7): 980-983(in Chinese).
- [9] LI G L, SONG L K, FAN K M. Optimization of high precision rhomb-type achromatic retarder[J]. Laser Technology, 2011, 35(2): 275-277(in Chinese).
- [10] NAGIB N N, E-BAHRAWY M S. Phase retarders with variable angles of total internal reflection[J]. Applied Optics, 1994, 33(7): 1218-1222.
- [11] NAGIB N N. Phase retarders highly insensitive to the input angle[J]. Applied Optics, 1998, 37(7): 1231-1235.
- [12] YAO Q J. Study course of optics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002: 155(in Chinese).