

文章编号: 1001-3806(2012)03-0413-03

菱体型消色差延迟器的新设计

李国良, 李洪波

(兴义民族师范学院 物理系, 兴义 562400)

摘要: 为了改善菱体型延迟器件的消色差性能, 扩大材料的选择显得非常必要。根据光在介质表面全反射时发生相变这一原理, 分析了菱体型消色差延迟器件, 得出折射率设计点 n 与对应的结构角 θ 两者关系的规律。随着折射率设计点 n 的增大, 虽然 $dn/d\lambda$ 增大, 但是 $d\delta/dn$ 却迅速减小, 因此高折射率的材料可能有更好的消色差性能。结果表明, 低折射率的材料熔石英相位延迟在 350nm ~ 1240nm 的光谱区域内的最大延迟误差小于 1.32° , 而高折射率的材料 LaK2 玻璃相位延迟在此区域内的最大延迟误差却小于 0.95° 。高折射率的材料比低折射率的材料有更好的消色差性能。

关键词: 光学器件; 消色差; 折射率; 延迟器

中图分类号: O436.3 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.03.033

New design of rhomb-type achromatic retarders

LI Guo-liang, LI Hong-bo

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

Abstract: In order to improve achromatism of rhomb-type retarders, it is necessary to expand selection of materials. According to the principle that the light arising total reflection has a phase transformation in the medium surface, rhomb-type achromatism retarders were analyzed, and relation between the refractive index n and structural angle θ was deduced. Although $dn/d\lambda$ increases with enlargement of the refractive index n , $d\delta/dn$ decreases rapidly, so high refractive index materials probably have better achromatism. It was shown that the maximal delay errors of low refractive index materials were smaller than 1.32° , and the maximal delay errors of high refractive index materials were smaller than 0.95° within the range of 350nm ~ 1240nm. Comparing with low refractive index materials, high refractive index materials have better achromatism.

Key words: optical devices; achromatism; refractive rate; retarder

引言

在激光和光电子技术中, $\lambda/4$ 延迟器件具有重要的用途。 $\lambda/4$ 延迟器件通常按单波长设计而成, 但考虑到较大光谱范围内延迟器件的性能, 必须使用消色差延迟器。全内反射型消色差延迟器由于对波长的依赖较小, 且结构简单, 因而获得广泛的应用。全内反射型消色差延迟器设计形式有多种, 有 Fresnel 菱体、Mooney 菱体、AD-1 型消色差延迟器^[1]、AD-2 型消色差延迟器^[2-4]、斜入射型消色差相位延迟器^[5-7]等, 其中比较方便使用和精确的是 AD-2 型消色差延迟器, 此器件的优点是对光路的影响小, 不会引起入射光束的偏折。

在 AD-2 型消色差延迟器的设计过程中, 器件只在波长设计点处相位延迟为 90° , 在其它波长处, 由于折射率发生变化导致相位延迟有一个偏差。在材料的选择上, 由于低折射率材料的 $dn/d\lambda$ 较低^[8-10], 因此, 设计时经常选择低折射率的材料, 如熔石英^[3] 和 K9 玻璃^[4]。作者通过理论计算显示, 虽然高折射率的材料 $dn/d\lambda$ 较高, 但是高折射率的材料 $d\delta/dn$ 更小(其中 λ 为波长, δ 为相位延迟), 因此高折射率的材料也可能有更好的消色差性能, 这为延迟器件材料的选择提供了更好的理论依据。

1 折射率设计点 n 及结构角 θ 的关系

AD-2 型消色差相位延迟器的结构如图 1 所示。

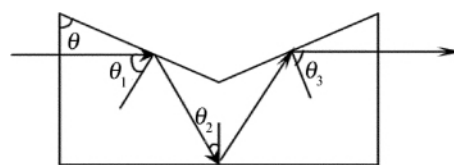


Fig. 1 Configuration of rhomb-type retarder

由图 1 可以看出, 光路具有对称性, 且通过延迟器件后光路不会发生偏折。当一束光垂直入射时, 在器

基金项目: 兴义民族师范学院科学研究基金资助项目 (11XYYZ05)

作者简介: 李国良(1979-), 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: 2011-10-08; 收到修改稿日期: 2011-11-07

件内产生3次全内反射,全内反射角分别设为 θ_1, θ_2 和 θ_3 ,对应的相位延迟分别设为 δ_1, δ_2 和 δ_3 ,由于光路对称,可得:

$$\theta_1 = \theta_3 = \theta, \theta_2 = 2\theta - 90^\circ \quad (1)$$

因此,总的相位延迟为:

$$\delta = 2\delta_1 + \delta_2 \quad (2)$$

其中,

$$\delta_1 = 2\arctan\left[\frac{\cos\theta(n^2\sin^2\theta - 1)^{1/2}}{n\sin^2\theta}\right] \quad (3)$$

$$\delta_2 = 2\arctan\left\{\frac{\sin(2\theta)[n^2\cos^2(2\theta) - 1]^{1/2}}{n\cos^2(2\theta)}\right\} \quad (4)$$

因此总的相位延迟 δ 不仅与延迟器的结构角 θ 有关,而且与折射率 n 有关。

在延迟器的设计过程中,要产生 90° 的相位延迟,可以选择不同的折射率设计点 n 对器件进行设计。但是同一个相位延迟 δ ,一般对应于两个结构角 θ 。由于较大的结构角有利于提高延迟器的消色差性能^[2],因此一般选择较大的结构角 θ 对器件进行设计。折射率设计点 n 与对应的结构角 θ 两者的关系如图2所示。

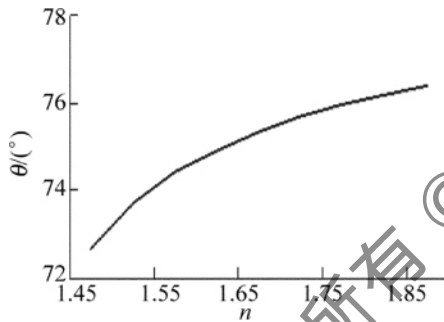


Fig. 2 Variation of θ with refractive index n

由图2的曲线可以看出:(1)当产生 90° 的相位延迟时,随着材料折射率设计点 n 的增大,结构角 θ 也增大;(2)曲线的梯度随折射率设计点 n 的增大而减小,这说明随着材料折射率设计点 n 的增大,结构角 θ 增大的幅度变小。

2 δ 对 n 变化的灵敏性

在AD-2型消色差 $\lambda/4$ 相位延迟器设计过程中,为了求出相位延迟 δ 对材料折射率 n 变化的灵敏性,由(2)式 δ 对 n 求导可得:

$$\frac{d\delta}{dn} = 2\frac{d\delta_1}{dn} + \frac{d\delta_2}{dn} \quad (5)$$

由(3)式 δ_1 对 n 求导可得:

$$\frac{d\delta_1}{dn} = \frac{2\sin^2\theta\cos\theta}{(n^2\sin^2\theta - \cos^2\theta)(n^2\sin^2\theta - 1)^{1/2}} \quad (6)$$

由(4)式 δ_2 对 n 求导可得:

$$\frac{d\delta_2}{dn} =$$

$$\frac{2\cos^2(2\theta)\sin(2\theta)}{[n^2\cos^2(2\theta) - \sin^2(2\theta)][n^2\cos^2(2\theta) - 1]^{1/2}} \quad (7)$$

将(6)式、(7)式代入(5)式,得到 $d\delta/dn$ 的关系式,下面证明 $d\delta/dn$ 在 $n \in [1.45, 1.85]$ 的范围内是减函数。

设 $f_1(\theta) = 2\sin^2\theta\cos\theta, f_2(n, \theta) = (n^2\sin^2\theta - \cos^2\theta) \times (n^2\sin^2\theta - 1)^{1/2}$,则 $d\delta_1/dn = f_1(\theta)/f_2(n, \theta)$; $g_1(\theta) = 2\cos^2(2\theta)\sin(2\theta), g_2(n, \theta) = [n^2\cos^2(2\theta) - \sin^2(2\theta)] \times [n^2\cos^2(2\theta) - 1]^{1/2}$,则 $d\delta_2/dn = g_1(\theta)/g_2(n, \theta)$ 。

随着折射率 n 的增大,结构角 θ 也将增大。当 $1.45 \leq n_1 < n_2 \leq 1.85$ 时,有 $72.67^\circ \leq \theta_1 < \theta_2 \leq 76.38^\circ$,而 $f_1(\theta_1) - f_1(\theta_2) = (\cos\theta_1 - \cos\theta_2)(1 - \cos^2\theta_1 - \cos^2\theta_2 - \cos\theta_1\cos\theta_2) > 0$,所以 $f_1(\theta)$ 为减函数且大于0;容易看出,随着折射率 n 的增大, $f_2(n, \theta)$ 是增函数且大于0,所以 $d\delta_1/dn$ 为减函数。

而 $g_1(\theta_1) - g_1(\theta_2) = [\sin(2\theta_1) - \sin(2\theta_2)][1 - \sin^2(2\theta_1) - \sin^2(2\theta_2) - \sin(2\theta_1)\sin(2\theta_2)] > 0$,所以 $g_1(\theta)$ 为减函数且大于0;容易看出,随着折射率 n 的增大, $g_2(n, \theta)$ 是增函数且大于0,所以 $d\delta_2/dn$ 为减函数。

由于 $d\delta_1/dn$ 和 $d\delta_2/dn$ 均为减函数,所以 $d\delta/dn$ 为减函数, $d\delta/dn$ 与 n 的关系如图3所示。

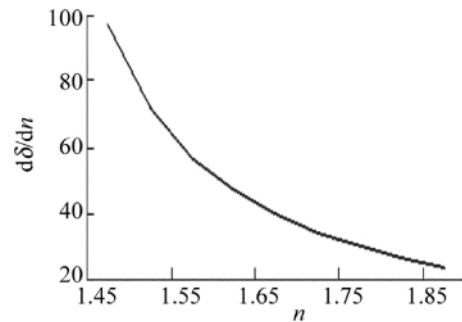


Fig. 3 Variation of δ with refractive index n

由图3的曲线可以看出:(1)随着折射率设计点 n 的增大, $d\delta/dn$ 迅速减小,例如当 $n = 1.45$ 时, $d\delta/dn = 97.3$;而当 $n = 1.70$ 时, $d\delta/dn = 34.5$;(2)随折射率设计点 n 的增大,虽然 $dn/d\lambda$ 变大,降低了延迟器件的消色差性能;但 $d\delta/dn$ 却迅速减小,大大提高了延迟器件的消色差性能,因此同时考虑两个因素,高折射率的材料可能有更好的消色差性能。

3 延迟器的设计

在材料的选择上,虽然低折射率的材料 $dn/d\lambda$ 较低,但 $d\delta/dn$ 较大;而高折射率的材料虽然 $dn/d\lambda$ 较高,但 $d\delta/dn$ 却更小。因此,以低折射率的材料熔石英和较高折射率的材料LaK2玻璃来对AD-2型消色差

$\lambda/4$ 相位延迟器分别进行设计,其相位延迟 δ 在 350nm ~ 1240nm 的光谱区域内的延迟曲线如图 4 所示。

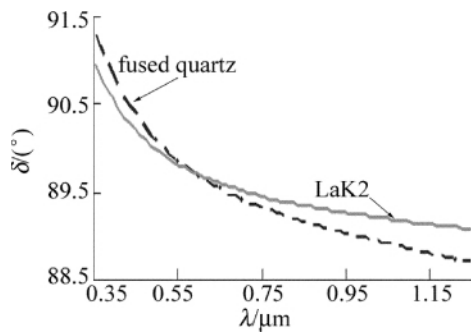


Fig. 4 Variation of δ with wavelength λ

由图 4 的曲线可以看出: (1) 随着波长的增大,相位延迟 δ 均减小,但熔石英下降较快,在两曲线交点之前,两种材料随着波长的增加,相位延迟 δ 均下降较快;在两曲线交点之后,两种材料随着波长的增加,相位延迟 δ 均下降较慢; (2) 熔石英相位延迟 δ 在 350nm ~ 1240nm 的光谱区域内的最大延迟误差小于 1.32° ,而 LaK2 玻璃相位延迟 δ 在此区域内的最大延迟误差却小于 0.95° 。这说明虽然 LaK2 玻璃的折射率较高,即 $dn/d\lambda$ 较大,但其 $d\delta/dn$ 却更小,由其设计的 AD-2 型消色差 $\lambda/4$ 相位延迟器有更好的消色差性能。

4 结论

在设计 AD-2 型消色差 $\lambda/4$ 延迟器件的过程中,

不仅仅局限于选择低折射率的材料,高折射率的材料虽然 $dn/d\lambda$ 较大,但其 $d\delta/dn$ 却更小,由其设计的延迟器件有更好的消色差性能。另外,在器件的加工及使用中,应尽量减小器件的加工误差和入射光线的入射偏差。

参考文献

- [1] LI J Zh. Optical handbook [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1986: 576-580 (in Chinese).
- [2] LI G L, SONG L K, HAO D Zh, et al. Optical design of rhomb-type achromatic retarder [J]. Laser Technology, 2006, 30(5): 539-540 (in Chinese).
- [3] MA W L, CHEN L Y, ZHOU S M, et al. Geometrical optics design as an achromatic $\lambda/4$ wave retarder [J]. Acta Photonica Sinica, 2001, 30(2): 236-238 (in Chinese).
- [4] ZHU H N, LÜ Z D, LIU L G, et al. A new rhomb-type $\lambda/4$ retarder [J]. Laser & Infrared, 2000, 30(4): 247-249 (in Chinese).
- [5] 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).
- [6] 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).
- [7] 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).
- [8] YAO Q J. Study course of optics [M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2002: 395-396 (in Chinese).
- [9] ZHAO K H, ZHONG X H. Optics [M]. Beijing: Higher Education Press, 1984: 234-235 (in Chinese).
- [10] LIANG S R, LIU C N, SHENG Z H. Optics [M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2005: 213-214 (in Chinese).