

文章编号: 0258-7025(2010)06-1574-05

# 用模拟退火算法设计的云母 $\lambda/2$ 消色差复合波片

郭丽娇<sup>1,2</sup> 吴福全<sup>1,2</sup> 宋连科<sup>1,2</sup> 郝殿中<sup>1,2</sup> 崔祥霞<sup>1,3</sup>

(<sup>1</sup> 山东省激光偏光与信息技术重点实验室, 山东 曲阜 273165; <sup>2</sup> 曲阜师范大学激光研究所, 山东 曲阜 273165)

<sup>3</sup> 泰山学院物理与电子工程学院, 山东 泰安 271000

**摘要** 为了设计适用于可见光波段的云母  $\lambda/2$  消色差复合波片, 根据三元复合波片理论, 利用模拟退火算法, 设计出了消色差  $\lambda/2$  复合波片。理论结果表明, 在 400~700 nm 范围, 复合波片的相位延迟偏差在 2% 以内。根据光相位延迟量的归一化偏振调制测量法, 选用 4 个激光光源对该复合波片进行测试。实验结果表明, 在可见光范围, 以平均等效快轴为基准, 器件的相位延迟偏差在 4.8% 以内; 分别以测试波长对应的等效快轴为基准, 其相位延迟偏差在 2.9% 以内。用模拟退火算法设计的云母  $\lambda/2$  消色差复合波片在可见光范围内实现了较好的消色差效果, 具有一定的实用价值。

**关键词** 物理光学; 消色差; 模拟退火算法; 复合波片; 延迟偏差

**中图分类号** O436.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103706.1574

## Design of Mica Achromatic Half Wave-Plate with Simulated Annealing Algorithm

Guo Lijiao<sup>1,2</sup> Wu Fuquan<sup>1,2</sup> Song Lianke<sup>1,2</sup> Hao Dianzhong<sup>1,2</sup> Cui Xiangxia<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Shandong Provincial Key Laboratory of Laser Polarization and Information Technology, Qufu, Shandong 273165, China

<sup>2</sup> Institute of Laser, Qufu Normal University, Qufu, Shandong 273165, China

<sup>3</sup> Department of Physics and Electronics, Taishan College, Tai'an, Shandong 271000, China

**Abstract** According to three composite wave-plate theory and simulated annealing algorithm, a mica achromatic half wave-plate used in visible range is designed. Theoretical analysis shows that the retardation deviation of this device is within 2% covering the spectrum scope of 400~700 nm. This device has been measured over the visible range by normalized polarizing modulation measurement. The retardation deviation is within 4.8% based on the average equivalent fast axis. The retardation deviation of the device is within 2.9% based on the equivalent fast axis corresponds to the measuring wavelength. This mica achromatic half wave-plate can be applied in many fields.

**Key words** physics optics; achromatic; simulated annealing algorithm; composite wave-plate; retardation deviation

## 1 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态变换的重要器件, 越来越受到人们的重视。通常所说的  $\lambda/4$  波片和  $\lambda/2$  波片等, 仅适用于单一波长或极窄的波长范围, 不适用于较宽光谱范围, 这给使用带来诸多不

便。于是提出了消色差相位延迟器, 它削弱了相位延迟量对波长的依赖程度, 可用于较宽的光谱范围。消色差相位延迟器的设计形式多种多样<sup>[1~3]</sup>, 设计思路也不尽相同, 其中双折射型消色差相位延迟器可由一种、两种或两种以上材料制成<sup>[4,5]</sup>, 由同种材料制成的消色差相位延迟器有二元、三元等复合形

收稿日期: 2009-07-16; 收到修改稿日期: 2009-09-17

作者简介: 郭丽娇(1984—), 女, 硕士研究生, 主要从事偏光器件设计与测试等方面的研究。

E-mail: guolijiao0123@126.com

导师简介: 吴福全(1952—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光技术与器件设计等方面的研究。

E-mail: fqwu@mail.qfnu.edu.cn(通信联系人)

式,在可见光波段<sup>[6~12]</sup>和红外波段<sup>[13,14]</sup>已有广泛的研究。其中文献[8]是用三片对中心波长  $\lambda_0$  为  $\lambda/4$ ,  $\lambda/2$ ,  $\lambda/4$  的云母波片构成的消色差复合波片,将其称为 QHQ 复合波片。文献[9,10,14]是在文献[8]的设计基础上,通过改变其中一个或两个参数来拓宽消色差范围或提高相位延迟精度,其他的参数固定不变,而消色差复合波片是一个多参数、多约束的系统,仅改变其中几个参数,无法达到最佳效果。基于模拟退火算法具有极强的搜索能力,不会陷入局部最优解的特点,本文利用模拟退火算法来设计消色差复合波片;与上述设计方法相比,这种设计方法不需要首先设定几个参数然后调整其他参数,通过一次次的调整来获取优化方案;而是将每个参数均视为变量,并设定每个变量的取值范围,运用模拟退火算法,在每个变量的取值范围内分别随机取值组

成一组值,微机无限循环计算,直到满足某一条件停止循环,这时得到的一组值为消色差复合波片的最佳设计参数。基于模拟退火算法设计消色差复合波片既可提高器件的消色差性能,同时又是一种快捷、方便的设计方法。

## 2 设计原理

### 2.1 三元复合波片原理

三波片组合的复合波片如图 1 所示,设  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$  分别为  $C_1, C_2, C_3$  三个波片在波长  $\lambda_0$  处的相位延迟量。令  $C_1, C_3$  波片的相位延迟量相等,即  $\delta_1 = \delta_3$ , 且两波片的快轴方向平行,  $C_2$  的快轴与  $C_1, C_3$  波片快轴夹角为  $\theta$ , 也称复合角, 相位延迟器在  $\lambda_0$  处的延迟量为  $\delta_0$ , 等效快轴与  $C_1, C_3$  波片快轴夹角为  $\varphi$ , 则有<sup>[9]</sup>

$$\cos(\delta_0/2) = \cos \delta_1 \cos(\delta_2/2) - \sin \delta_1 \sin(\delta_2/2) \cos(2\theta), \quad (1)$$

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

三元复合波片中三个波片的厚度在常温下不发生变化,而复合波片的相位延迟量会随着波长和双折射率变化,则其在任意波长  $\lambda$  处的相位延迟量为

$$\delta = 2 \arccos \left[ \cos \left( \frac{2\pi \Delta n d_1}{\lambda} \right) \cos \left( \frac{2\pi \Delta n d_2}{2\lambda} \right) - \sin \left( \frac{2\pi \Delta n d_1}{\lambda} \right) \sin \left( \frac{2\pi \Delta n d_2}{2\lambda} \right) \cos(2\theta) \right], \quad (3)$$

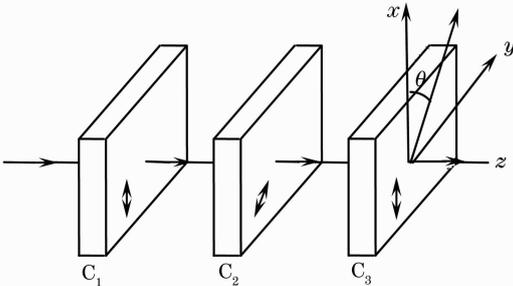


图 1 三元复合波片结构图

Fig. 1 Configuration of three-element compound waveplate

式中  $d_1$  为  $C_1, C_3$  的厚度,  $d_2$  为  $C_2$  的厚度,  $\Delta n$  为任意波长  $\lambda$  处材料的双折射率。由于用云母制作波片工艺简单、易于理解、成本低廉、容易制成单级片<sup>[5]</sup>, 因此以云母为原材料,在可见光范围内,云母的双折射率可近似为一常数,即  $\Delta n = -0.00474$ 。

为了设计可见光范围内的消色差  $\lambda/2$  复合波片,要求在此范围内任意波长对应的  $\delta \approx \pi$ , 在可见光范围内相位延迟量评价函数之和为

$$f = \sum_{\lambda} \left\{ 2 \arccos \left[ \cos \left( \frac{2\pi \Delta n d_1}{\lambda} \right) \cos \left( \frac{2\pi \Delta n d_2}{2\lambda} \right) - \sin \left( \frac{2\pi \Delta n d_1}{\lambda} \right) \sin \left( \frac{2\pi \Delta n d_2}{2\lambda} \right) \cos(2\theta) \right] - \pi \right\}^2. \quad (4)$$

为了表明每一波长对应的评价函数都很重要,在此将可见光内的波长以  $0.01 \mu\text{m}$  为间隔来求和。(4)式取最小值时对应的解为最优解,基于模拟退火算法具有较强的搜索能力,而不会陷入局部最优解的特点,本文以(4)式为目标函数,用模拟退火算法寻求其近似最小值,得到近似最优解,即得到消色差复合波片的设计参数  $d_1, d_2, \theta$ 。

### 2.2 消色差复合波片的模拟退火算法设计

1982年, Kirkpatrick 等首先意识到固体退火过程与组合优化问题之间存在的类似性, Metropolis 等对固体在恒定温度下达到热平衡的模拟也给他们以启迪:应该把 Metropolis 准则引入到优化过程中来。最终他们得到一种对 Metropolis 算法进行迭代的组合优化算法,这种算法模拟固体退火过程,称之为“模拟退火算法”,已应用于诸多方面<sup>[15,16]</sup>。

设组合优化问题的一个解  $i$  及其目标函数  $f(i)$  分别与固体的一个微观状态  $i$  及其能量  $E_i$  等价,令随算法进程递减其值的控制参数  $t$  担当固体退火过程中温度的角色,则对于控制参数  $t$  的每一取值,算法持续进行,产生新解  $j$  及其目标函数  $f(j)$ , 由 Metropolis 准则确定是否接受新解为当前解,

Metropolis 准则对应的转移概率  $P$  为

$$P(i \leftarrow j) = \begin{cases} 1, & f(j) \leq f(i) \\ \exp\left[\frac{f(i) - f(j)}{t}\right], & f(j) > f(i) \end{cases} \quad (5)$$

这个过程就对应着固体在某一恒定温度下趋于热平衡的过程,也就是执行了一次 Metropolis 算法, Metropolis 算法执行的次数用  $L$  表示。

经过多次试验,令  $t$  的初始值为 50,然后以 0.95 的衰减因子来减小控制参数  $t$  的值, $t$  的每一取值,重复  $L = 10000$  次 Metropolis 算法,就可以在控制参数  $t$  趋于零时,最终求得组合优化问题的整体最优解,终止条件是两次最优解之差为  $5 \times 10^{-3}$ 。将 (4) 式作为目标函数,考虑到云母解理层的厚度,设波片厚度范围为  $40 \mu\text{m} \leq d_1 \leq 60 \mu\text{m}$ ,  $40 \mu\text{m} \leq d_2 \leq 60 \mu\text{m}$ ,复合角的范围为  $0 \leq \theta \leq \pi$ ,在  $400 \sim 700 \text{ nm}$  的波长范围内运用模拟退火算法求目标函数的最小值。在 C# 环境中运行以上程序得到的结果为  $d_1 = 0.5377 \times 10^2 \mu\text{m}$ ,  $d_2 = 0.5374 \times 10^2 \mu\text{m}$ ,  $\theta = 1.0103 \text{ rad}$ 。

考虑到加工工艺和使用上的方便,把设计参数取为:  $d_1 = 54 \mu\text{m}$ ,  $d_2 = 54 \mu\text{m}$ ,  $\theta = 57^\circ$ 。将设计参数代入 (3) 式得到相位延迟量随波长变化的理论曲线如图 2 中曲线 2 所示;曲线 1 为以  $550 \text{ nm}$  为中心波长的 QHQ 复合波片的相位延迟量随波长变化的理论曲线。复合波片的等效快轴与  $C_1, C_3$  波片快轴的夹角随波长变化的理论曲线如图 3 所示,图中两曲线所对应的复合波片与图 2 中所对应的复合波片一致。若用  $\Delta$  表示消色差复合波片的相位延迟偏差,则有

$$\Delta = \frac{|\delta - 180^\circ|}{180^\circ} \times 100\% \quad (6)$$

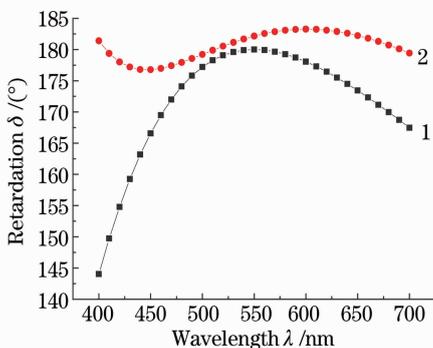


图 2  $\delta$  随  $\lambda$  变化的理论曲线

Fig. 2 Theoretical curve of  $\delta$  as a function of the wavelength  $\lambda$

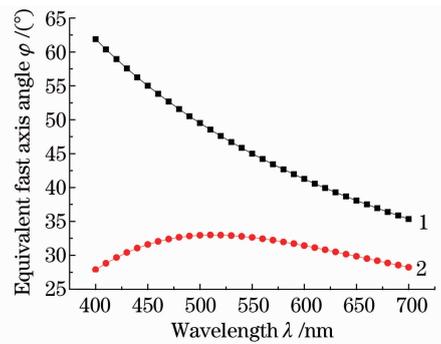


图 3  $\varphi$  随  $\lambda$  变化的理论曲线

Fig. 3 Relation between the equivalent fast axis and the wavelength

从图 2 中曲线 1 可以看出在  $494 \sim 620 \text{ nm}$  范围内  $\Delta$  在 2% 以内;曲线 2 在  $400 \sim 700 \text{ nm}$  范围内  $\Delta$  在 2% 以内,消色差范围为  $300 \text{ nm}$ 。对比两曲线可以看出,基于模拟退火算法设计的消色差复合波片在具有小延迟偏差的同时还具有很宽的消色差范围。从图 3 中曲线 2 与曲线 1 的对比可以看出, QHQ 复合波片的  $\varphi$  随波长变化较大,在  $494 \sim 620 \text{ nm}$  范围内,浮动角度为  $10^\circ 11'$ ;而基于模拟退火算法设计的消色差复合波片在  $400 \sim 700 \text{ nm}$  范围内, $\varphi$  的浮动角度仅为  $5^\circ 7'$ 。可见基于模拟退火算法设计的复合波片的  $\varphi$  在较宽的光谱范围内变化很小。在这里对角度做如下规定,迎着  $z$  轴看,以  $x$  轴正方向为起始方向顺时针转为正,逆时针转为负。根据图 3 中曲线 2,取  $\varphi$  的平均值  $31^\circ 10'$  为复合波片的平均等效快轴与  $x$  轴的夹角。

### 3 实验测试

#### 3.1 测试样品

根据第 2 节的设计参数及分析,在  $400 \sim 700 \text{ nm}$  光谱范围内实现消色差相位延迟,三片云母波片的厚度均为  $54 \mu\text{m}$ 。经计算,若三片的厚度是完全一致的,当相对  $54 \mu\text{m}$  的厚度误差为  $\pm 1 \mu\text{m}$  时,在  $400 \sim 700 \text{ nm}$  光谱范围  $\Delta$  始终在 2% 以内;如果两片云母波片的厚度完全一致,而另一片与之不一致,当相对  $54 \mu\text{m}$  的厚度误差均为  $\pm 1 \mu\text{m}$  时,在  $400 \sim 700 \text{ nm}$  范围内  $\Delta$  将不小于 3.3%。由此可见,保证三个波片厚度的一致性可以有效地减小云母波片的厚度误差对消色差复合波片相位延迟偏差的影响,而采取将一张大面积云母波片割为三片的方法完全可以保证三波片厚度的一致性。

测试中选取的一张大面积的云母波片的厚度为  $55 \mu\text{m}$ ,将其两面镀宽带减反膜以消除多次反射产

生的相位延迟误差,然后将该云母波片切割成三片,以  $\theta$  为  $57^\circ$  组成复合波片,放入光路中进行测试。

### 3.2 测试原理

采用归一化偏振调制法<sup>[17]</sup>测量复合波片的相位延迟量,实验光路如图 4 所示。分别用输出波长为 473, 532 和 670 nm 的半导体激光器和 633 nm 的氦氖激光器作为光源,  $P_1, P_2$  为起偏器,  $R$  为与上述激光器对应的  $\lambda/4$  云母波片,  $R_x$  为待测复合波片,  $W$  为渥拉斯顿(Wollaston)棱镜,  $D_1, D_2$  为两光

电探测器,其中之一型号为 1931-C,可测皮瓦量级光强。光源发出的光经  $P_1, R$  后变为圆偏振光,经  $P_2$  起偏变为线偏振光,经待测波片后被 Wollaston 棱镜分为两束光,用两个探测器同时接收这两个光强信号。对角度的规定同上,选  $x$  轴为参考方向,令  $P_1$  透射光光矢量与  $x$  轴成  $0^\circ$ ,  $R$  的快轴与  $x$  轴成  $45^\circ$ ,  $P_2$  透射光光矢量与  $x$  轴成  $90^\circ$ ,  $R_x$  的等效快轴与  $x$  轴成  $\varphi$  角, Wollaston 棱镜一透射光光矢量与  $x$  轴成  $0^\circ$ , 另一透射光光矢量与  $x$  轴成  $90^\circ$ 。

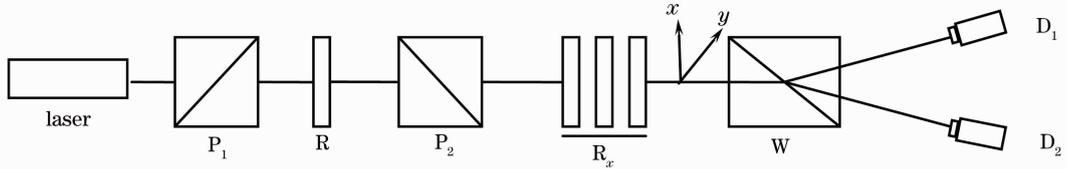


图 4 实验光路图

Fig. 4 Schematic for measuring the mica achromatic half wave-plate

经  $\lambda/4$  波片  $R$  后,光矢量可表示为

$$\mathbf{E} = \sqrt{\frac{I_0}{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中  $I_0$  为其光强。延迟量为  $\delta$  的待测复合波片  $R_x$  的琼斯矩阵为

$$\mathbf{J}_{R_x} = \begin{bmatrix} \cos(\delta/2) + i\sin(\delta/2)\cos(2\varphi) & i\sin(\delta/2)\sin(2\varphi) \\ i\sin(\delta/2)\sin(2\varphi) & \cos(\delta/2) - i\sin(\delta/2)\cos(2\varphi) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

根据  $P_2$  和 Wollaston 棱镜的琼斯矩阵<sup>[18]</sup>及(8)式可得

$$I_N = \left[ \frac{I_2 I_1'}{I_1 I_2'} \right]^{1/2} = \frac{G_2^2}{G_1^2} \left[ \frac{1}{\sin^2(\delta/2)\sin^2(2\varphi)} - 1 \right], \quad (9)$$

式中  $I_N$  为归一化参数,  $I_1, I_2$  为  $P_2$  透射光光矢量与  $x$  轴成  $90^\circ$  时从 Wollaston 棱镜出射的两束光的光强,  $I_1', I_2'$  为  $P_2$  透射光光矢量与  $x$  轴成  $0^\circ$  时从 Wollaston 棱镜出射的两束光的光强,  $G_1, G_2$  分别表示两探测器的增益。  $I_N$  与入射光光强  $I_0$  无关,但与两探测器的增益系数有关,两探测器在不同波长处的增益系数也不相同。测试时使  $R_x$  的等效快轴与  $x$  轴成  $45^\circ$ 。根据测试光强  $I_1, I_2, I_1', I_2'$  及(9)式可以得到待测样品  $R_x$  的相位延迟量。

### 3.3 测试结果

测试结果如图 5 所示,图中曲线 1 为将  $55 \mu\text{m}$  和  $\theta=57^\circ$  代入(3)式得到相位延迟量随波长变化的理论曲线;将  $55 \mu\text{m}$  和  $\theta=57^\circ$  代入(2)式得到复合波片的等效快轴与  $C_1, C_3$  波片快轴(即  $x$  轴)的夹角  $\varphi$  随波长变化的理论值,取其平均值  $31^\circ 12'$  为复合波片的平均等效快轴与  $x$  轴的夹角。曲线 2 是以与  $x$  轴成  $31^\circ 12'$  的平均等效快轴为基准,沿着顺

时针方向转动复合波片,使平均等效快轴与  $x$  轴成  $45^\circ$ , 进行测试得到相位延迟量随波长变化的曲线。曲线 3 为分别以不同测试波长所对应的等效快轴为基准,沿着顺时针方向转动复合波片,使等效快轴与  $x$  轴成  $45^\circ$ , 进行测试得到相位延迟量随波长变化的曲线;复合波片的  $\varphi$  在 4 个波长处各不相同,对于每个测试波长调整对应的等效快轴使其与  $x$  轴的夹角为  $45^\circ$ , 分别进行测试得到曲线 3。

从图 5 可以看出,曲线 3 与曲线 1 符合得很好,最大偏差为  $2^\circ 23'$ 。曲线 2 与曲线 1 在  $670 \text{ nm}$  波长处偏差最大为  $6^\circ 49'$ , 这是由于平均等效快轴方向与测试波长所对应的等效快轴方向偏差较大所致,由此可知  $\varphi$  的波动对复合波片相位延迟精度也有很大的影响。为了提高相位延迟精度,在设计消色差复合波片时也应考虑等效快轴的波动。经测试,该消色差复合波片在平均等效快轴下,  $\Delta$  在  $4.8\%$  以内,满足使用要求;如果对相位延迟精度要求较高,在使

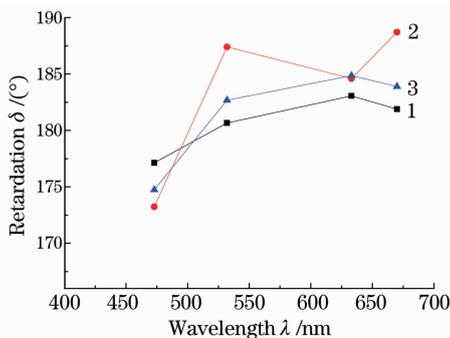


图 5 相位延迟量随波长变化的测试曲线

Fig. 5 Measured curve of the phase retardation as a function of the wavelength

用时可以以不同波长所对应的等效快轴为基准,此时  $\Delta$  在 2.9% 以内。

误差来源有两方面:1)在测试中,虽然已考虑两探测器增益系数,但探测器响应的热不稳定性和空间不均匀性仍可引起一定的误差;2)起偏器  $P_1, P_2$  以及 Wollaston 棱镜的方位角也会引起一定的误差。

## 4 结 论

根据三元复合波片理论,利用模拟退火算法,设计出了消色差  $\lambda/2$  复合波片。理论结果表明,在 400~700 nm 范围,复合波片的相位延迟偏差在 2% 以内,等效快轴变化在  $5^\circ 7'$  以内。根据光相位延迟量的归一化偏振调制测量法,选用 4 个激光光源对该复合波片进行测试,实验结果表明,在可见光范围,以平均等效快轴为基准,器件的相位延迟偏差在 4.8% 以内;分别以测试波长对应的等效快轴为基准,其相位延迟偏差在 2.9% 以内。与 QHQ 设计方法相比其优点为:1)基于模拟退火算法设计的消色差复合波片在具有小延迟偏差的同时还具有很宽的消色差范围,同时又是一种快捷的设计方法。2)加工基于模拟退火算法设计的消色差复合波片,其工艺简单、方便、快捷。这表明用模拟退火算法设计的云母消色差  $\lambda/2$  复合波片具有一定的实用价值。

## 参 考 文 献

- Jörg Schirmer, Theodor Schmidt-Kaler. Liquid crystal phase retarder with broad spectral range[J]. *Opt. Commun.*, 2000, **176**(1-3): 313~317
- Li Jingzhen. Handbook of Optics[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1986. 573~583  
李景镇. 光学手册[M]. 西安: 陕西科技技术出版社, 1986. 573~583
- Ma Jianling, Song Lianke. Orientation effect on phase retardation of rhomb-type achromatic retarder[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 492~496

- 马建玲, 宋连科. 菱体型消色差相位延迟器延迟相位的方位效应[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 492~496
- Parameswaran Hariharan. Achromatic and apochromatic halfwave and quarterwave retarders[J]. *Opt. Eng.*, 1996, **35**(11): 3335~3337
- Liao Yanbiao. Polarizer Optics[M]. Beijing: Science Press, 2003. 213~215
- 廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003. 213~215
- A. V. Samoylov, V. S. Samoylov, A. P. Vidmachenko et al.. Achromatic and super-achromatic zero-order waveplates[J]. *J. Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2004, **88**: 319~325
- Song Lianke, Li Guohua. 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, 王美茂. 三元复合式消色差延迟器的设计[J]. *光电子·激光*, 2000, **11**(1): 51~53
- Yun Maojin, Li Guohua, Wang Mei et al.. Three-in-one composite achromatic  $\lambda/4$  wave-plate[J]. *J. Optoelectronics & Laser*, 2001, **12**(6): 562~564
- 云茂今, 李国华, 王美茂. 三元复合式消色差  $\lambda/4$  波片[J]. *光电子·激光*, 2001, **12**(6): 562~564
- Zheng Chunhong, Song Lianke, Liang Rongrao. Optimizational design scheme for three-in-one composite achromatic  $\lambda/4$  wave-plate[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(6): 662~664
- 郑春红, 宋连科, 梁荣饶. 三元复合式消色差  $\lambda/4$  波片的优化设计[J]. *中国激光*, 2004, **31**(6): 662~664
- Wang Jing, Song Lianke, Ni Zhibo. A new design based on enlarge composite  $\lambda/2$  wave-plate's achromatic range[J]. *J. Optoelectronics & Laser*, 2007, **18**(2): 194~196
- 王静, 宋连科, 倪志波. 拓宽复合式  $\lambda/2$  波片消色差范围的新设计[J]. *光电子·激光*, 2007, **18**(2): 194~196
- Xia Lifeng, Zhou Mingbao. Design of the wave plate for polychromatic light[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2001, **28**(4): 57~59
- 夏立峰, 周明宝. 用于多色光的波片的设计[J]. *光电工程*, 2001, **28**(4): 57~59
- Xue Dong, Li Guohua, Hao Dianzhong et al.. Achromatic analysis of the two-in-one composite  $1/4$  wave-plate[J]. *Laser Technology*, 2004, **28**(2): 184~186
- 薛东, 李国华, 郝殿中等. 复合消色差  $1/4$  波片的再研究[J]. *激光技术*, 2004, **28**(2): 184~186
- Jun Ma, Jing-Shan Wang, Carsten Denker et al.. Optical design of multilayer achromatic waveplate by simulated annealing algorithm[J]. *Chinese J. Astronomy and Astrophysics*, 2008, **8**(3): 349~361
- Hou Jie, Yang Kuntao, Wu Li et al.. Studies of infrared broadband compound waveplate[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(3): 281~283
- 侯杰, 杨坤涛, 吴励等. 红外复合宽带波片的研制[J]. *中国激光*, 2004, **31**(3): 281~283
- Chen Xiaojing, Wu Di, Yu Jijia et al.. A new choice method of characteristic wavelength of visible/near infrared spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2153~2158
- 陈孝敬, 吴迪, 虞佳佳等. 一种用于可见-近红外光谱特征波长选择的新方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(11): 2153~2158
- Duan Yuhua, Jing Xili, Song Chaoqun. Optimized design of 3-skip-1 filter for 100 GHz used in optical add-drop multiplexing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2243~2244
- 段玉华, 井西利, 宋超群. 光分插复用 3-skip-1 100 GHz 滤波器的最优设计[J]. *光学学报*, 2008, **28**(11): 2243~2244
- Zhao Qiuling, Wu Fuquan. Optical phase retardation measurement by normalized polarizing modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(3): 360~362
- 赵秋玲, 吴福全. 光相位延迟量的归一化偏振调制测量[J]. *光学学报*, 2002, **22**(3): 360~362
- Wei Guanghui. Matrix Optics[M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 1995. 145
- 魏光辉. 矩阵光学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1995. 145