

补偿调整式激光椭圆起偏器可调性及实现

宋连科 牛明生* 韩培高 郝殿中 马丽丽

曲阜师范大学激光研究所, 山东省激光偏光与信息技术重点实验室, 山东 曲阜 273165

摘要 椭圆偏振器是一种非常重要的偏振态调制器件。采用线偏器与波片组合方式设计,通过各部件间方位的补偿调整来满足不同波长或椭圆度的需求,波长调整范围大,输出状态稳定,具有较高的实用价值。由偏光矩阵和邦加球理论可知,器件间方位、相位以及波长间存在着规律性关系,匹配相关条件能够影响不同波长下的偏振光状态。此设计由一个宽频透射的偏光棱镜和两个完全一致的“零级”波片组成。棱镜保证了入射光偏振方向的稳定性,波片承担了波长的选择和椭圆度的改变。研究表明材料特性限制了应用范围。云母波片设计的应用波长范围为300~1400 nm,连续调整波长范围700 nm。

关键词 光学器件; 偏振光学; 椭圆起偏器; 偏振光; 波片

中图分类号 O433.5; O436.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0108004

Adjustability and Realization of Compensation Adjustment Type Laser Elliptic Polarizer

Song Lianke Niu Mingsheng Han Peigao Hao Dianzhong Ma Lili

Shandong Provincial Key Laboratory of Laser Polarization and Information Technology Institute of Laser Research, Qufu Normal University, Qufu, Shandong 273165, China

Abstract The elliptical polarizer, which is designed using linear polarizer and wave plate combination, is a very important polarization modulation device. It can meet the need of the different wavelengths or ellipticity angle through the orientation compensation and adjustment of the various components. And it has high practical value as it has wide wavelength tuning range and the stability output state. According to the elliptic matrix and Poincare Sphere Theory, there exist regular relationship among the devices' orientation, phase and the wavelength. The different wavelength polarization state is affected by the matching condition. This design consists of a broadband transmission polarizing prism and two identical zero order plates. The prism can ensure the stability polarization direction of the incident light and, the wave plate can select the wavelength and change the ellipticity angle. The results show that the material properties limit the application range of the elliptical polarizer. The designed mica wave plate, whose continuous adjustable range is 700 nm, can be applied in the range of 300~1400 nm.

Key words optical devices; polarization optics; elliptical polarizer; polarized light; wave plate

OCIS codes 230.5440; 120.4570; 220.4830

1 引言

在偏光技术中,椭圆起偏器是常用的一类非常重要的偏振态变换器件,它在激光加工、水下通信、立体影像显示等方面均发挥重要作用^[1-5],但目前此类器件可选用的形式并不多,能够随光源波长改变的器件更

收稿日期: 2014-07-08; 收到修改稿日期: 2014-08-10

基金项目: 国家自然科学基金(1110461,11104160)

作者简介: 宋连科(1961—),男,博士,教授,主要从事偏光物理与技术等方面的研究。E-mail: lksong@mail.qfnu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: nmsheng@163.com

匮乏。椭圆起偏器的一种常用情况是产生圆偏振光(圆起偏),在激光测量技术中,通常由双折射率较小的云母或石英材料制作的1/4波片代替。二者在工艺和性能上有较大差别^[6-9],但它们的共同点是只能适合于单色光。云母1/4波片是由云母晶体剥离而成,自然解理面就是它的通光面,不需要进行复杂的表面抛光处理。如果按照商品 $\pm 5\%$ 延迟偏差指标要求的话,其允许的光源波长带宽仅有 ± 10 nm。石英1/4波片的抗光损伤阈值高,在大功率光场中可以选用,但为了满足技术指标的精确要求,需要采用特殊工艺,加工难度远远大于云母。石英在切削及研磨过程中需要一定的装夹尺寸,难以满足“零级”设计要求,“多级”波片设计进一步限制了它的波长带宽,大约仅有 ± 1 nm,且厚度越大温度稳定性越差、方位效应也越明显^[10]。

按照目前波片产品特点,就技术来讲能够做到单波长使用或者在较小的带宽情况下使用是没有问题的,但在较大波长带宽情况下使用就会给系统带来不便^[11]。如果要分别做到在不同的波长下都能工作,取而代之的应该是一个可调的相位补偿系统,如斯涅耳或索累形式的可调相位器,但索累相位补偿器制作精度和调整精度要求高^[12-13],尤其在大孔径情况下,使用很不方便。本文利用相位叠加原理,尝试设计了一种新式可调相位补偿系统。这种器件不同于消色差器件^[14-15],在制作过程中对波片延迟相位要求不高,它通过部件间相对方位的调整来获得不同波长下的偏振状态,且使用调整过程中对光束质量影响小,稳定性好。

2 椭圆偏振状态与器件条件

要想在任意入射偏振光状态下获得一个输出稳定的椭圆偏振态,此系统必须有一个稳定的前置偏振态变换装置,它稳定了偏振态方位和相位。实际应用时最佳选择是一个线起偏器,尤其是方解石起偏器,它既能提供高消光比的线偏光,又能保证宽光谱范围及透射率要求。输出椭圆偏振状态的调整需要满足一定条件的波片来完成,本设计采用一个线偏振镜和两个波片组合叠加形式,如图1所示,P代表线起偏器,它的起偏方向与X轴重合。常规输出为椭圆偏振光,但调整成圆偏振光输出是必须做到的,故以此为例进行分析不失一般性,棱镜、波片特征方向已经明确情况下,它们之间的夹角可以由形成圆偏振光的矢量过程表示为

$$\mathbf{S}' = \mathbf{R}_{\delta_2, \theta_2} \cdot \mathbf{R}_{\delta_1, \theta_1} \cdot \mathbf{Q} \cdot \mathbf{S}, \quad (1)$$

式中符号 \mathbf{S}' 、 \mathbf{R} 、 \mathbf{Q} 、 \mathbf{S} 分别是出射光偏振态、波片矩阵、偏光镜矩阵和入射光偏振态,符号中的下标 δ_1 、 δ_2 、 θ_1 、 θ_2 分别是第一、第二波片的延迟相位及快轴方位角(与P起偏方向的夹角)。

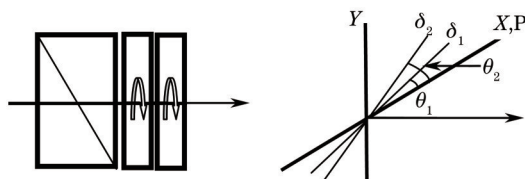


图1 器件间组合形式

Fig.1 Combination between the devices

根据矩阵理论,推导出此组合系统获得圆偏振光的两个基本条件,第一个基本条件是

$$\sin 2\theta_1 = \cos \delta_2 / \sin \delta_1, \quad (2)$$

由此可以确定出两个延迟量取值范围必须满足

$$|\cos \delta_2 / \sin \delta_1| \leq 1. \quad (3)$$

另一个条件是在第一个条件基础上,由偏振光分析中的邦加球描述与立体几何中的余弦定律和球面三角关系获得^[17]

$$\begin{cases} \cos 2\varphi = (\cos^2 2\theta_1 + \sin^2 2\theta_1 \cdot \cos \delta_1) / \sin \delta_2 \\ \theta_2 = \varphi + \pi/4 \end{cases} \quad (4)$$

如果两个波片 δ_1 和 δ_2 满足了(3)式条件,由(2)式和(4)式就可以确定出两个波片快轴方位角 θ_1 和 θ_2 ,调整这两个角度位置,就能够获得对应波长下的圆偏振光。当然,如果使用波长发生了改变,两个波片的延迟量 δ_1 和 δ_2 也随之改变,但只要其二者保持在(3)式限定的范围内,总能通过调整两个波片快轴方位角 θ 来获得满意的圆偏振光。同理,如果两个波片有误差,也可以通过改变其方位角度进行补偿。

3 波长调整范围及波片方位调整规律

在不同的波长情况下要保证获得圆偏振光,除了对 θ_1 、 θ_2 、 δ_1 和 δ_2 进行限制外,还需要一个稳定的偏振光振动方向,这个方向也就是设计时的零位,且线起偏器消光比优于 10^{-4} ,避免输出光成为圆偏光与部分偏振光的叠加。

获得圆偏振光的 δ_1 、 δ_2 条件可以直观地由图 2 来表示,由(3)式条件决定了两个波片必须在虚线包括的阴影范围内取值才有效。改变使用波长,波片的延迟量也会发生相应地变化,但延迟量的有效变化范围也应该限制在这个区域内,因此波长变化范围也必将是有限的。为便于讨论,首先要确定一个参考中心波长 λ_0 。考虑到延迟量的变化不仅与波长有关,还与材料双折射率的色散特性有关,为此,波片在任意波长下的延迟相位表示为

$$\delta_\lambda = \frac{\lambda_0}{\lambda} \frac{\Delta n}{\Delta n_0} \delta_0, \quad (5)$$

式中 Δn_0 为参考中心波长点处的材料双折射率, δ_0 是参考中心波长点处波片的延迟量。为了便于制作调整,通常采用两个相同材料的波片,并且令其延迟相位相等,设定参考中心波长处的延迟相位为 90° (图 2 中取 $\lambda_0 = 500 \text{ nm}$ 处)。在此情况下,波片延迟相位随波长的改变在 $45^\circ \sim 135^\circ$ 内是有效的(图中间斜实线所示),对应不同材料制成的波片,不难得出其适用波长范围。如表 1 所示,表中三种常用晶体材料的双折射色散率数据取自文献[18],不同波长下对应的波片延迟相位由黑体数字表示,超出限定范围的延迟相位无效。结果显示,根据波片延迟相位 $45^\circ \sim 135^\circ$ 的共同限定条件,不同材料的设计会得到不一样的波长适用范围,云母波片设计的适用波长范围为 $320 \sim 1020 \text{ nm}$ 间,氟化镁的为 $340 \sim 980 \text{ nm}$,石英的为 $360 \sim 960 \text{ nm}$ 。

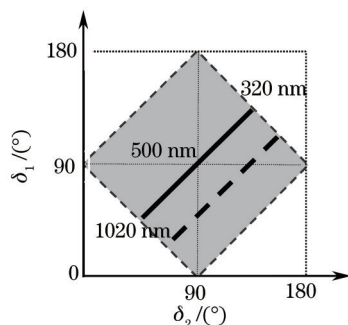


图 2 两个波片相位条件

Fig.2 Two wave-plates phase conditions

表 1 波片类型及延迟相位对应的适用波长

Table 1 Wave plate type and the corresponding application wavelength of phase retardation

λ / nm	300	350	400	450	500	550	600	700	800	900	1000
MgF ₂ +	0.01240	0.01220	0.01241	0.01195	0.01187	0.01182	0.01177	0.01171	0.01167	0.01163	0.01161
$\Delta / (^\circ)$	—	132	118	101	90	82	74	63	55	49	—
Quartz+	0.01023	0.00980	0.00955	0.00937	0.00926	0.00916	0.00910	0.00898	0.00891	0.00884	0.00877
$\Delta / (^\circ)$	—	—	116	101	90	81	74	62	54	48	—
Mica-	0.00425	0.00436	0.00447	0.00457	0.00467	0.00478	0.00479	0.00482	0.00480	0.00478	0.00476
$\Delta / (^\circ)$	—	120	108	98	90	84	77	66	58	51	46

要保证上述设计的波长调整范围能够实现,一个有规律的器件方位角度调整方法是十分重要地。以零级云母波片叠加设计为例,来分析一下这个规律的形成情况。首先在有效延迟相位 $45^\circ \sim 135^\circ$ 范围内,看到不同延迟相位时波片方位角变化规律如图 3 所示,然后再根据材料的色散获得云母波片方位与波长间的对应关系如图 4 所示。波片的延迟量取 100° (632.8 nm 波长下的测量结果),由(5)式得 90° 延迟量时的波长是 703 nm ,将此波长设定为中心参考波长,对应波片方位角与波长关系如图 4 所示。

图 4 中比较清晰地显示出两个波片方位角变化的规律性,虽然这种规律不是线性的,但二者间有一个共同的起点和终点,这就为调整使用带来了方便。两波片的快轴重合,且与线起偏器振动方向成 -45° 时,产生

469 nm 的圆偏光;随着两波片的方位角按曲线规律变化,可以相继产生不同波长的圆偏光或椭圆偏光,直至两波片快轴方位到达 45°位置重合,产生了 1407 nm 波长的圆偏光。两片的调制敏感程度也不一样,第一片比第二片更灵敏,把它作为主动片,另一片为从动片。

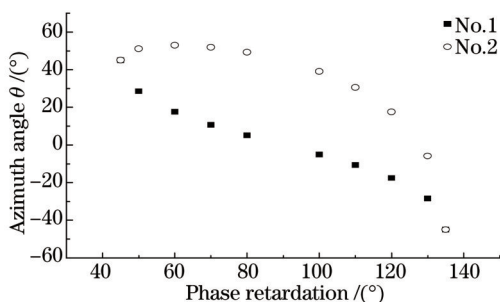


图3 不同延迟相位对应的波片方位角

Fig.3 Corresponding wave plate azimuth angle of different phase retardations

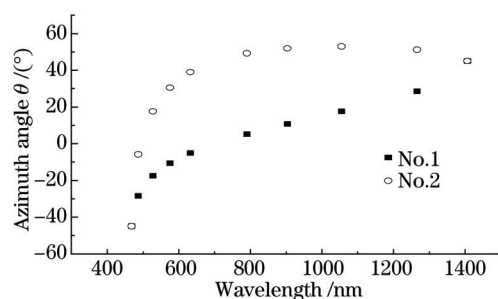


图4 云母波片方位角与波长关系

Fig.4 Relationship between the mica wave plate azimuth angle and wavelength

实践表明石英和氟化镁材料很难做到零级,一般按多级设计制作,为了便于加工,石英的级次通常取 10 级以上。显然,级次使得波片厚度增加了 40 倍以上,色散造成的延迟量变化速率也增加了相应数量,多级波片复合后可调整的波长范围就变得非常窄,通常不大于 ± 10 nm,也就失去了利用此种方法进行设计的价值,但可以考虑采用其他方式进行^[7]。

4 波长范围拓展及偏差修正

按照前述设计原理中的参考中心波长为 500 nm 设计,其对应使用波长范围为 320~1020 nm。假如要使 1064 nm 激光与它的倍频光 532 nm 光实现圆偏振光,在 1064 nm 波长处椭圆率较大,无法满足要求。看到如果采用上述设计个例中的方法,参考波长点 λ_0 取 703 nm,上述使用完全能够满足。这表明参考波长点的选取对调整范围有一定的影响,这种影响大致可以从图 5 中判断出来,图 5 横坐标是波长,纵坐标代表波片的延迟相位, λ_0 往长波方向选,对应波片意味着厚度增加,整个波长调整范围也随之向长波方向偏移,但调整范围宽度变化并不大,例如 3 个按不同参考波长点设计器件, λ_0 分别是 500、600、700 nm,随着参考波长从 500 nm → 600 nm → 700 nm 向长波移动,整个范围也向长波方向平移。在参考波长点 700 nm 时,波长上限已经达到 1200 nm 以上,但波长的调整范围宽度并没有多大改变。

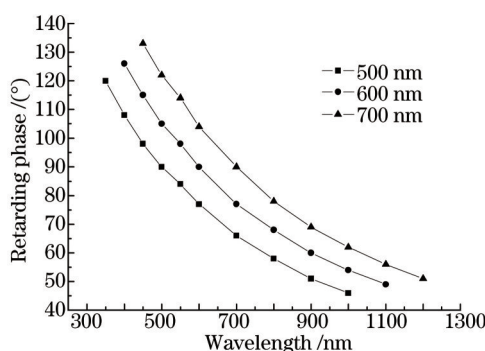


图5 波长参考点对器件性能的影响

Fig.5 Influence of wavelength reference point on the device performance

另外,在参考波长点 λ_0 确定的情况下,也可以选择两个波片的延迟量不一致(或延迟量不为 90°)的设计方法。因两波片的延迟量变化趋势是一致的,故波长调整也是线性的,如图 2 下部的斜短虚线所示。有两种情况值得关注:在二者延迟量均小于 90°情况下,调整范围会整体向短波偏移;在二者延迟量均大于 90°情况下,调整范围会整体向长波偏移。虽然调整范围整体发生了偏移,但是波长调整范围大小并没有太大变化。要解决调整范围问题,需要采取下面特殊办法:在波长 λ_0 为 500 nm 处使一个波片的延迟满足 $\lambda_0/4$ 条

件,而另一个满足 $\lambda_0/2$ 条件,这样可以使用波长范围拓宽到 300~1500 nm,这个范围理论上也可以继续向更短波长拓展,但实际上对透射比而言已无实际意义,因为材料的透射性能在紫外处会变得很差。

椭圆偏振器的误差主要来自各器件方位的调整偏差和波片相位的偏差,对于方位调整偏差引起的误差可由相互垂直的偏振光强比来反映,大小反映了椭圆光的椭圆程度,由偏振光状态知道

$$S' = R_{\delta_2, \theta_2} \cdot R_{\delta_1, \theta_1} \cdot Q = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 + i \cos 2\theta_2 & i \sin 2\theta_2 \\ i \sin 2\theta_2 & 1 - i \cos 2\theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 + i \cos 2\theta_1 & i \sin 2\theta_1 \\ i \sin 2\theta_1 & 1 - i \cos 2\theta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

这里为了简化计算,取两个波片相位满足 $\lambda_0/4$ 。(6)式结果为

$$S' = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} i(\cos 2\theta_2 + \cos 2\theta_1) - \cos 2(\theta_2 - \theta_1) + 1 \\ i(\sin 2\theta_2 + \sin 2\theta_1) - \sin 2(\theta_2 - \theta_1) \end{bmatrix}$$

两个振动光强的比值也就是上式中两矩阵元素模平方的比,即

$$K = \frac{[1 - \cos 2(\theta_2 - \theta_1)]^2 + (\cos 2\theta_2 + \cos 2\theta_1)^2}{[\sin 2(\theta_2 - \theta_1)]^2 + (\sin 2\theta_2 + \sin 2\theta_1)^2} \quad (7)$$

要形成圆偏光,必要条件是 $K=1$,此时 θ_2 、 θ_1 分别对应 45° 和 0° 。假如其一偏差 0.5° ,则 K 约有 0.1%和 4%的变化,4%是第一波片方位偏差带来的,0.1%是第二波片方位偏差带来的,这一结果清楚地显示第一波片的方位偏差更值得注意。

通常波片相位偏差为 $\pm 1\%$,再高成本代价剧增,其影响相当于将参考波长 λ_0 点往长波偏移(对应正偏差)或向短波偏移(对应负偏差),由(5)式不难看出, $\pm 1\%$ 的波片偏差约对应参考波长 λ_0 的 7 nm 偏移量,这对波长调整范围影响并不大,反映到波片快轴调整角度上,大约 0.5° 的角度偏差。

实验测试采用较大样品室的卓立汉光光谱仪,考虑到此光谱仪波长范围有限,采用参考中心波长为 500 nm 的样品验证比较适宜,此样品设计波长范围为 320~1020 nm,对于 300~1400 nm 波长范围内的其他设计类型,实验测试方法类似。样品放入样品室后,在其后放置一个可旋转的检偏镜,检偏镜的起始位置不须刻意选择,只记住所处位置就可以,随后光谱仪采用频谱扫描方式,记录下透射光强的变化。扫描完一次后,不动样品位置,只旋转检偏器 15° ,让光谱仪再次全光谱扫描,记录扫描结果。同样方法做第三次,扫描三次的曲线分别对应图 6 中(a),(b),(c)曲线,图例中的 a, b, c 仅表示扫描的前后顺序,图 6(a)与(b)、(b)与(c)检偏器所处

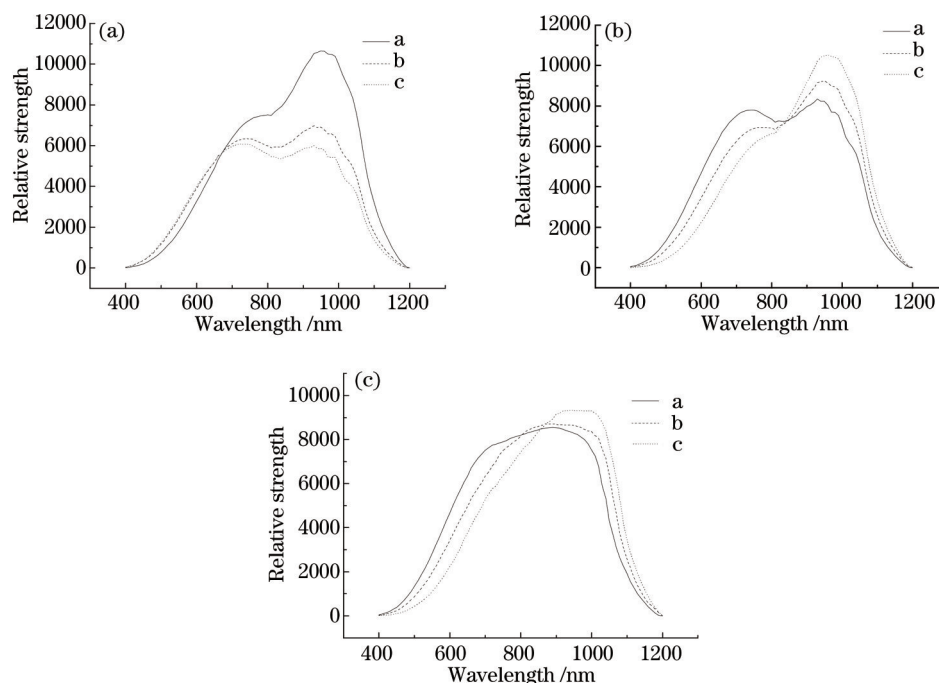


图 6 调整补偿输出实验结果。旋转(a) 15° ; (b) 30° ; (c) 45°

Fig.6 Experimental results about adjustment of compensation. Rotate (a) 15° ; (b) 30° ; (c) 45°

的方相位差 15° , (a)与(c)相差 30° 。假如输出的某波长为圆偏振光,其光强度应该是不随检偏器旋转变化的,对应上述3次扫描的曲线就应该在此波长点相交,而在其他位置由于检偏器偏振面的改变,光强会有差别,曲线不能交会。设置了3个测试区,第一个针对中前波长区,测试点选常用的670 nm波长,这附近谱仪信号相对变化比较大,有一定的代表性,对应波片 θ_1, θ_2 角度分别为 12.4° 和 52.0° ,如图6(a)曲线所示,这是一个经过两次纠偏后的结果,三曲线相交点相对偏差0.1%。第二个测试点选在后区850 nm波长,对应波片 θ_1, θ_2 角度分别为 24.7° 和 53.1° ,为了便于与670 nm点对比,没有对器件方位进行再次修正,三曲线相交点一次测量相对偏差1.6%,如图6(b)所示。第三个测试点选在设计范围之外点,这是一种在设计之外的调整状况或调整混乱状态,如图6(c)所示,选择接收比较好的长波段区观察,在1020 nm之后,无论怎么调整,三测试曲线都无法形成同一交会点,但强度有变化,这说明在此波长区无法形成圆偏振光。

5 结 论

椭圆偏振起偏器特点是自身有一个线起偏器,不受入射光偏振方位或偏振状态的影响,输出光强稳定。此设计不必对波片精度严格要求,器件中的波片延迟量只要处于规定范围内就可以,这一特点使得器件更容易制作,波片的相位偏差带来的影响可以通过快轴方位的调整来进行补偿。当然,这也意味着这种圆起偏器是个性化器件,每个器件旋转方位角会有所区别。

作为一种需要调整使用器件,各器件间的调整规律是非常重要的,此种设计的偏振器具有这方面的性能,波长调整范围的低端由波片快轴在 -45° 重合确定,而调整范围的高端由波片快轴在 $+45^\circ$ 重合确定,其他波长的圆偏振光可通过调整两个波片快轴方位获得,第一波片承担波长的选择,根据设计参量选中所用波长,第二波片担当椭圆度的调整工作,通过它控制椭圆状况。

参 考 文 献

- 1 S Nolte, C Momma, G Kamlage, *et al.*. Polarization effects in ultrashort-pulse laser drilling[J]. Appl Phys A, 1999, 68: 563-567.
- 2 Han Zehua, Zhou Changhe, Dai Enwen, *et al.*. Micromaching with polarized light femtosecond double pulses[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(5): 768-771.
韩泽华,周常河,戴恩文,等. 偏振光飞秒双脉冲微加工[J]. 中国激光, 2008, 35(5): 768-771.
- 3 Cui Zhun, Chen Mingsong. Reserch on circularly polarization optics in optical communication system[J]. Optical Communication Technology, 2006, 4: 49-51.
崔 准,陈名松. 光通信系统中圆偏振光的应用研究[J]. 光通信技术, 2006, 4: 49-51.
- 4 Wu Fuquan, Wang Jiming, Kong Weijin, *et al.*. Analysis of polarization of a circular polarizer and the isolation performance for the reflected light[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2002, 13(12): 1230-1232.
吴福全,王吉明,孔伟金,等. 圆起偏器及其对反向光的隔离性能分析[J]. 光电子·激光, 2002, 13(12): 1230-1232.
- 5 Zhao Pei, Wu Fuquan, Hao Dianzhong, *et al.*. Measurement of the delay of the quarter-wave plate by phase-modulated ellipsometry [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(3): 379-382.
赵 培,吴福全,郝殿中,等. 1/4波片延迟量的相位调制椭圆测量法[J]. 光学学报, 2006, 26(3): 379-382.
- 6 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.
- 7 Song Lianke, Li Guohua. Design of the three element combination archromatic retarder made of mica and quartz[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2000, 11(1): 53-55.
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): 53-55.
- 8 Zhang Dawei, Li Guohua, Song Lianke, *et al.*. Study on the polarization interference spectrum of mica quarter-wave plates[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2002, 22(2): 20-22.
张大伟,李国华,宋连科,等. 云母1/4波片偏振干涉谱的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2002, 22(2): 20-22.
- 9 Wu Fuquan, Wang Reng, Zhang Xu, *et al.*. Analysis of the 1/4 wave plate's spectral performance[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2006, 17(4): 57-60.
吴福全,王 仍,张 旭,等. 云母1/4波片光谱性能分析[J]. 光电子·激光, 2006, 17(4): 57-60.

- 10 Li Hua, Song Lianke, Li Guohua. Orientation effect on phase retardation of compound binary zero-order wave-plate [J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(12): 1438-1441.
李 华, 宋连科, 李国华. 二元复合波片延迟相位方位效应探讨[J]. 光学学报, 2002, 22(12): 1438-1441.
- 11 Song Lianke, Wang Zuochen. Discussion on relations between band width limitation of wave plates and retardation thickness [J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2000, 11(2): 170-172.
宋连科, 王佐臣. 波片带宽容限与延迟厚度关系探讨[J]. 光电子·激光, 2000, 11(2): 170-172.
- 12 Li Jingzhen. Handbook of Optics[M]. Xi'an: Shanxi Science and Technology Publishing House, 1986. 562-598.
李景镇. 光学手册[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1986. 562-598.
- 13 Wang Zhaobing, Song Lianke. Modified mechanical compensator[J]. Optical Technique, 2000, 26(2): 181-182.
王召兵, 宋连科. 修改形式的机械补偿器[J]. 光学技术, 2000, 26(2): 181-182.
- 14 Li Xuemei, Wang Weihua. Optimum design of composite achromatic circuit polarizer[J]. Journal of Minjiang University, 2008, 29(5): 40-43.
李雪梅, 王卫华. 消色差复合圆偏振器的优化设计[J]. 闽江学院学报, 2008, 29(5): 40-43.
- 15 P Hariharan. Superachromatic circular polarizer[J]. Meas Sci Technol, 2000, 11: 117-118.
- 16 Yun Maojin, Li Guohua, Wang Mei. Design of three zero-order composite compensator[J]. Chinese J Lasers, 2001, 28(9): 821-822.
云茂金, 李国华, 王 美. 三元复合式补偿器的设计与研制[J]. 中国激光, 2001, 28(9): 821-822.
- 17 Xingu Longyi, Fang Aiyong, Kang Changhe. Polarized Light[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1994. 73-118.
新谷隆一, 范爱英, 康昌鹤. 偏振光[M]. 北京: 原子能出版社, 1994. 73-118.
- 18 Liao Yanbiao. Polarized Optics[M]. Beijing: Science Press, 2003. 184-217.
廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003. 184-217.

栏目编辑: 韩 峰