

文章编号: 0253-2239(2005)01-21-6

利用旋转波片组实现偏振变换器的两种新方法*

王军利¹ 方强² 王永昌¹ 阴亚芳² 刘毓²

(¹ 西安交通大学现代物理研究所, 西安 710049)
(² 西安邮电学院电信系, 西安 710061)

摘要: 偏振变换器作为一种重要的光学器件,以其高偏振变换精度、低成本、低插入损耗以及控制算法简单的特性在相干光纤通信和高速光纤通信领域具有十分重要的地位。提出了利用两个 $\lambda/4$ 波片和一个 $\lambda/2$ 波片的三波片组合实现任意偏振态变换的新方法。用改进的三维庞加莱球方法——偏振态投射平面的二维几何方法分别推导出了 $\lambda/4+\lambda/4+\lambda/2$ 组合以及 $\lambda/2+\lambda/4+\lambda/4$ 组合实现任意偏振态变换时每个波片的位置参量计算公式。研究结果表明:两个 $\lambda/4$ 波片和一个 $\lambda/2$ 波片的任意组合都可以实现任意偏振态的变换;用偏振态投射平面的几何方法处理偏振变换的相关问题比庞加莱球方法和矩阵处理方法简洁明了。研究结果为偏振变换器的设计提供了理论依据。

关键词: 光纤通信技术; 偏振态变换; $\lambda/4$ 波片; $\lambda/2$ 波片; 偏振态投射平面

中图分类号: O436.3; TN929.11 文献标识码: A

Two Novel Methods for Polarization Transformer Using Rotatable Waveplates

Wang Junli¹ Fang Qiang² Wang Yongchang¹ Yin Yafang² Liu Yu²

(¹ Institute of Modern Physics, Xian Jiaotong University, Xian 710049)
(² Department of Telecommunications, Xian Institute of Posts and Telecommunications, Xian 710061)

Abstract: High accurate state of polarization (SOP) converting, low cost, low insert loss, and simple control algorithms are vital for polarization transformers. A novel method of polarization transformations using two quarter wave plates (QWP) and a half wave plate (HWP) realizing transformation between arbitrary states of polarization (SOP) is presented in this work. A new geometry method, SOP projection plane, is developed from Poincaré sphere method. The expressions of azimuths of three wave plates are derived through SOP projection plane method in Stokes space. The experimental results show that: any combinations of two QWP and a HWP can realize polarization transformers, and the SOP projection plane method is more simple than the matrix treatment methods or Poincaré sphere methods for the problems of polarization transformations. The results of this work help to design the polarization transformers.

Key words: optical fiber communication technology; transformations of SOP; quarter-wave plate; half-wave plate; SOP projection plane

1 引 言

偏振变换器是用来任意改变光信号偏振态的一种器件。在相干光纤通信和高速光纤通信领域中,它具有很重要的地位。它可以用来对高速光纤通信系统进行偏振模色散的补偿^[1,2]。性能良好的

偏振变换器可以进行无穷的偏振态变换,控制算法简单,偏振态变换精度高,插入损耗低等。作为一种重要的器件,偏振变换器的相关理论已被广泛研究^[2~7]。根据偏振变换器的实现方法,常见的偏振变换器可以分为晶体波片型^[2]、光纤型^[4,5]、光电晶体型^[4,6]、液晶型^[7]四大类。晶体波片型偏振变换器

*“十五”科技攻关项目“40 Gb/s SDH (STM-256)光纤通信设备与系统”资助课题。

作者简介: 王军利(1976~),男,西安交通大学电信学院博士研究生,主要从事高速光纤通信系统中偏振效应的研究。
E-mail: wj_lb@163.com.

收稿日期: 2004-03-18; 收到修改稿日期: 2004-05-25

主要通过对 $\lambda/4$ 波片(QWP)和 $\lambda/2$ 波片(HWP)进行一定的组合和旋转,实现对光信号偏振态的任意变换。光纤型主要利用对光纤施加应力而产生的双折射来实现对偏振的变换,长期使用这种方法会对光纤造成一定的损伤。对于液晶型和光电晶体型的偏振变换器来说,它们都受到所需的调制电压的影响,使它们的应用受到限制,但是液晶型和光电调制型偏振变换器具有很快的响应速度,在需要快速变换偏振态的场合具有应用优势。常用的波片型偏振变换器造价低廉,插入损耗小,适合用于对光信号的偏振态进行低速变换的场合。文献[8]研究了 $\lambda/4+\lambda/2+\lambda/4$ 组合实现偏振态的变换问题,给出了两个任意偏振态之间变换的八条不同路径,但是并未给出三波片实现任意偏振态变换的所有组合。我们研究发现,实际上两个 $\lambda/4$ 波片和一个 $\lambda/2$ 波片的任意组合都可以实现任意偏振态的变换。本文利用庞加莱球方法研究了实现任意偏振态变换所需要的其他两种三波片组合方式,即 $\lambda/2+\lambda/4+\lambda/4$ 和 $\lambda/4+\lambda/4+\lambda/2$,并推导出了用它们波片组合实现任意偏振态变换时,波片的配置和方位角的计算公式。

2 实现任意偏振态变换的理论基础

单色光的任意偏振态都可以通过一个单位半径球面上的点来一一对应。这样的单位球称为庞加莱球^[8]。庞加莱球赤道上的点所对应的偏振态为线偏振态。上半球面北极点对应的是右旋圆偏振态,其它点代表右旋椭圆偏振态。下半球面南极点对应左旋圆偏振态,其它点代表左旋椭圆偏振态。作为一种偏振态的三维几何表示方法,庞加莱球可以很方便地处理和偏振态有关的很多问题。图 1 中的 S_1 ,

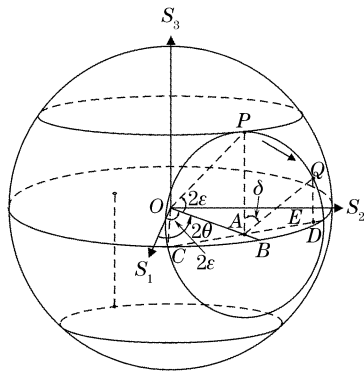


图 1 波片对偏振光作用的庞加莱球表示和偏振投射平面表示

Fig. 1 Action of wave plates of SOP on Poincaré sphere and on SOP projection plane

S_2, S_3 为斯托克斯空间的坐标系,它们分别代表偏振态的三个斯托克斯分量。为了简洁明了起见,这里将庞加莱球面上的点投射到其赤道平面上,在赤道平面上我们就可以找到对应所有偏振态的点,这样就能以平面的方法研究偏振态的变换。这样既可以简化在立体庞加莱球面上讨论问题的复杂性,又不失处理问题的准确性。我们称这样的平面为偏振态投射平面。用小圆圈表示下半球面在赤道平面的投射点,小黑点表示上半球面在赤道平面的投射点。圆的半径为 1。

我们知道,一定方位的入射偏振光通过线性延迟的晶体波片时,一般来说,线性波片的两个本征态为相互垂直的线偏振态,它们在庞加莱球中位于赤道大圆周上。波片对入射偏振光的物理作用在庞加莱球面上体现为入射光偏振态绕该波片的快轴对应的线段顺时针旋转一定的角度。旋转角度由波片所延迟的相位决定。图 1 表示了快轴为 OB ,延迟相位为 δ 的线性晶体波片对入射偏振光 P 的作用, Q 为出射偏振光。图 1 中,点 A 是偏振态 P 在偏振投射平面上的投影。可以看到庞加莱球上 $P \rightarrow Q$ 的偏振态变化对应偏振投射平面上 $A \rightarrow E$ 的偏振态变化。 2θ 和 2ϵ 分别表示斯托克斯空间中偏振态 P 的方位角和椭率角^[8]。我们可以看到旋转轴为波片快轴 OB ,顺时针旋转角度为 δ 。研究图 1 我们发现, $\triangle COA$ 全等于 $\triangle POA$,即 $\angle AOC = \angle AOP = 2\epsilon$ 。这样就可以在偏振投射平面内来处理和偏振态相关的问题。所以,我们可以通过一系列的波片组合实现对偏振态的任意变换。这就是利用波片实现任意偏振态变换的理论基础。下面我们讨论实现任意偏振态变换的最简单的波片组合以及每个波片的具体位置。

2.1 线性双折射波片作用后的偏振态

设任意偏振光在笛卡儿坐标系 X, Y 坐标轴上的电场分量分别为:

$$\begin{cases} E_X = a_1 \exp(-j\phi_X), \\ E_Y = a_2 \exp(-j\phi_Y). \end{cases} \quad (1)$$

在笛卡儿坐标系中方位角指绕原点逆时针旋转偏离 X 轴的角度。偏振光的方位角指它的长轴和 X 轴正方向的夹角^[8]。它满足下式:

$$\tan(2\psi) = \frac{2a_1 a_2 \cos(\phi_X - \phi_Y)}{a_1^2 - a_2^2}. \quad (2)$$

如图 2 所示,当(1)式所描述的任意偏振光经过快轴(F 轴)方位角为 θ ,相位延迟为 δ 的线性双折射波片后,在 F 轴和 S 轴(慢轴)上的电场分量分别为

$$\begin{cases} E_F = [a_1 \exp(-j\phi_X) \cos \theta + a_2 \exp(-j\phi_Y) \sin \theta] \exp(-j\delta), \\ E_S = a_2 \exp(-j\phi_Y) \cos \theta - a_1 \exp(-j\phi_X) \sin \theta \end{cases} \quad (3)$$

展开(3)式得到

$$\begin{cases} E_F = [a_1 \cos \phi_X \cos \theta \cos \delta + a_2 \cos \phi_Y \sin \theta \cos \delta - a_1 \sin \phi_X \cos \theta \sin \delta - a_2 \sin \phi_Y \sin \theta \sin \delta] - \\ \quad j(a_1 \sin \phi_X \cos \theta \cos \delta + a_2 \sin \phi_Y \sin \theta \cos \delta + a_1 \cos \phi_X \cos \theta \sin \delta + a_2 \cos \phi_Y \sin \theta \sin \delta), \\ E_S = a_2 \cos \phi_Y \cos \theta - a_1 \cos \phi_X \sin \theta - j(a_2 \sin \phi_Y \cos \theta - a_1 \sin \phi_X \sin \theta), \end{cases} \quad (4)$$

由(4)式可以得到 E_F 和 E_S 各自的相位分别为

$$\begin{cases} \varphi_F = \arctan \left(\frac{a_1 \sin \phi_X \cos \theta \cos \delta + a_2 \sin \phi_Y \sin \theta \cos \delta + a_1 \cos \phi_X \cos \theta \sin \delta + a_2 \cos \phi_Y \sin \theta \sin \delta}{a_1 \cos \phi_X \cos \theta \cos \delta + a_2 \cos \phi_Y \sin \theta \cos \delta - a_1 \sin \phi_X \cos \theta \sin \delta - a_2 \sin \phi_Y \sin \theta \sin \delta} \right), \\ \varphi_S = \arctan \left(\frac{a_1 \sin \phi_X \sin \theta - a_2 \sin \phi_Y \cos \theta}{a_2 \cos \phi_Y \cos \theta - a_1 \cos \phi_X \sin \theta} \right). \end{cases} \quad (5)$$

由(4)式可以得到经过波片后光的所有偏振态信息。

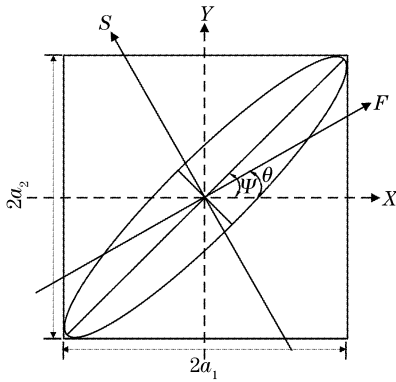


图 2 波片和任意偏振光在笛卡儿坐标系中的位置

Fig. 2 Azimuth angle of waveplates and arbitrary polarized light in the cartesian co-ordinates

从(5)式中可以看出,要使任意偏振光经过 $\lambda/4$ 后变成线偏振光,需要 $\varphi_F = \varphi_S$ 。对于 $\lambda/4$ 来说, $\delta = \pi/2$,代入到(5)式,并且令 $\varphi_F = \varphi_S$,则:

$$\frac{a_1 \cos \phi_X \cos \theta + a_2 \cos \phi_Y \sin \theta}{a_1 \sin \phi_X \cos \theta + a_2 \sin \phi_Y \sin \theta} = \frac{a_1 \sin \phi_X \sin \theta - a_2 \sin \phi_Y \cos \theta}{a_2 \cos \phi_Y \cos \theta - a_1 \cos \phi_X \sin \theta}, \quad (6)$$

整理(6)式得到:

$$\tan(2\theta) = 2a_1 a_2 \cos(\phi_Y - \phi_X) / (a_1^2 - a_2^2). \quad (7)$$

这个角度和(2)式中任意偏振光的长轴方位角相等,即当 $\lambda/4$ 的快轴方向和任意偏振光的长轴方向重合时,出射光是线偏振光。图 3(a)为偏振投射平面中 $\lambda/4$ 将任意偏振光变换为线偏振光的几何表示。

$\lambda/4$ 波片是在指定波长下利用波片的双折射使入射的光产生 $\pi/2$ 的附加相位变化的器件。在图 3(a)所示的偏振态投射平面上, BC 垂直 OF ($\lambda/4$), 并且 $AB = BC/2$ 。 $\lambda/2$ 波片是在给定波长下利用波片的双折射使入射光产生 π 的附加相位变化的器件。如图 3(b)所示,在偏振态投射平面上体现为变换前后两个偏振态对应的点 C 和 E 对称的分布在 $\lambda/4$ 快轴 OF 所在直线的两侧,即 $CD = DE$, 且 CE 垂直于 OF 。

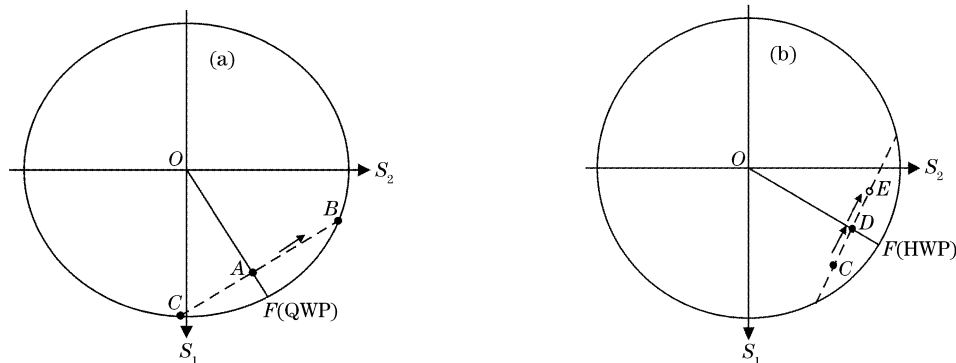


图 3 (a) $\lambda/4$ 波片把任意偏振态 A 变换为线偏振态 B , (b) $\lambda/2$ 波片把任意偏振态 C 变换为任意偏振态 E

Fig. 3 (a) SOP A is converted to linear SOP B by QWP. AB is perpendicular to OF . OF is the fast axis of QWP, (b) SOP C is converted to SOP E by QWP. CE is perpendicular to OF , and $CD = DE$. OF is the fast axis of HWP

2.2 利用三波片组合实现偏振态的任意变换

2.2.1 利用 $\lambda/2 + \lambda/4 + \lambda/4$ 波片组合实现偏振态的任意变换

图 4(a) 给出了利用 $\lambda/2 + \lambda/4 + \lambda/4$ 三波片组合实现两个偏振态间任意变换的原理和所有途径。为了不失讨论的普遍性,我们选定入射偏振光对应的偏振态在庞加莱球上半球面,出射偏振光对应的偏振态位于庞加莱球下半球面。同时,这里仅给出一种变换途径 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$ 的变换原理,其他变换途径的处理方法类似下面的处理方法。首先利用一个 $\lambda/2$ 波片把入射偏振态 1 变换到偏振态 2(椭率角和 1 相同,方位角不同),接着把偏振态 2 经一个 $\lambda/4$ 波片变换为线偏振态 3,最后把线偏振态 3 经过以 $\lambda/4$ 波片变换为要求的偏振态 4。整个变换的过程顺序为 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$ 。实现 $1 \rightarrow 2$ 变换所需的 $\lambda/2$ 波片可以有两个位置,它们对应的快轴方位角相差 π ,分别对应图 4(a) 中的 OA 和 OC 。实现 $2 \rightarrow 3$ 的变换所需的 $\lambda/4$ 波片的位置是唯一的,它的快轴对应图 4(a) 中的 OB 。实现 $3 \rightarrow 4$ 的变换所需的 $\lambda/4$ 波片的位置也是唯一的,它的快轴对应图 4(a) 中的 OD 。

如果描述偏振态 1 和偏振态 4 的物理参量已知,从图 4(a) 中可以直接得到第二个 $\lambda/4$ 波片的方位角是 $2\theta_{out}$ 。下面推导 $\lambda/2$ 波片和第一个 $\lambda/4$ 波片的方位角。

利用图 4 来推导三个波片在斯托克斯空间的方位角。这对于其他偏振态的情形可以利用下面的方法给予相应的推导。设偏振态 1 的偏振参量为

表 1 $\lambda/2 + \lambda/4 + \lambda/4$ 波片组合实现任意偏振态变换时三波片快轴方位角列表(斯托克斯空间)

Table 1 Azimuth angles of fast axis of waveplates in $\lambda/2 + \lambda/4 + \lambda/4$ waveplates transformer (in Stokes space)

Route of transformation	Position of fast axis of HWP	Position of ast axis of first QWP	Position of fast axis of second QWP
$1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$	$\theta_{in} + \theta_{out} + \epsilon_{out} - \epsilon_{in} + \pi$	$2\epsilon_{out} + 2\theta_{out} - 2\epsilon_{in} + \pi$	$2\theta_{out}$
	$\theta_{in} + \theta_{out} + \epsilon_{out} - \epsilon_{in}$		
$1 \rightarrow 2' \rightarrow 3 \rightarrow 4$	$\theta_{in} + \theta_{out} + \epsilon_{out} + \epsilon_{in}$	$2\epsilon_{out} + 2\theta_{out} + 2\epsilon_{in}$	$2\theta_{out}$
	$\theta_{in} + \theta_{out} + \epsilon_{out} + \epsilon_{in} + \pi$		
$1 \rightarrow 2'' \rightarrow 3 \rightarrow 4$	$\theta_{in} + \theta_{out} - \epsilon_{out} - \epsilon_{in} + \pi$	$2\theta_{out} - 2\epsilon_{in} - 2\epsilon_{out} + \pi$	$2\theta_{out} + \pi$
	$\theta_{in} + \theta_{out} - \epsilon_{out} - \epsilon_{in}$		
$1 \rightarrow 2''' \rightarrow 3' \rightarrow 4$	$\theta_{in} + \theta_{out} - \epsilon_{out} + \epsilon_{in} + \pi$	$2\theta_{out} - 2\epsilon_{out} + 2\epsilon_{in}$	$2\theta_{out} + \pi$
	$\theta_{in} + \theta_{out} - \epsilon_{out} + \epsilon_{in}$		

2.2.2 利用 $\lambda/4 + \lambda/4 + \lambda/2$ 波片组合实现偏振态的任意变换

图 4(b) 是 $\lambda/4 + \lambda/4 + \lambda/2$ 三波片组合实现任意偏振态变换时的路径图。和 $\lambda/2 + \lambda/4 + \lambda/4$ 三波片组合的处理方法一样。这里仅给出其中一种变换途径 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$ 的变换原理,首先利用第一个 $\lambda/4$ 波片把入射偏振态 1 变换到线偏振态 2,接着偏振

($2\theta_{in}, 2\epsilon_{in}$), 要变换到的偏振态 4 的偏振参量为 ($2\theta_{out}, 2\epsilon_{out}$)。其中 $\theta_{in}, \theta_{out}$ 分别代表变换前后偏振光的方位角。 $\epsilon_{in}, \epsilon_{out}$ 分别代表变换前后偏振光的椭率角^[9]。从图 4 我们首先得到第二个 $\lambda/4$ 波片快轴的方位角为 $2\theta_{out}$ 。现在来求第二个 $\lambda/4$ 波片快轴和 $\lambda/2$ 波片快轴对应的方位角。

令 $\angle 1OA = x, \angle S_1O1 = 2\theta_{in}, \angle S_1O4 = 2\theta_{out}$, 由图 1 中庞加莱球和其偏振态投射平面中的几何关系可以得到 $\angle 3O2 = 2\epsilon_{in}, \angle 3O4 = 2\epsilon_{out}$ 。根据图 4 中的几何关系我们可以得到下列等式

$$2\theta_{in} = 2\theta_{out} - 2\epsilon_{in} + 2\epsilon_{out} + 2x, \quad (8)$$

很显然, OA 的方位角为

$$\begin{aligned} \angle S_1OA &= 2\theta_{in} - x = \\ &\theta_{in} + \theta_{out} - \epsilon_{in} + \epsilon_{out}, \end{aligned} \quad (9)$$

OC 的方位角是

$$\angle S_1OA + \pi = \theta_{in} + \theta_{out} - \epsilon_{in} + \epsilon_{out} + \pi, \quad (10)$$

OB 的方位角为

$$\begin{aligned} \angle S_1OB &= 2\theta_{in} - 2x + \pi = \\ &2\theta_{out} - 2\epsilon_{in} + 2\epsilon_{out} + \pi, \end{aligned} \quad (11)$$

这样我们就得到了把偏振态 1 转换到偏振态 4 时,三个波片的方位角。在已知入射光偏振态的情况下,利用(8)式~(11)式可以很方便地得到三个波片的方位角,这样就可以得到我们所需要的偏振态,从而实现任意的偏振态变换。

表 1 给出了实现从偏振态 1 到偏振态 4 所有的波片方位角列表。

态 2 经第二个 $\lambda/4$ 波片变换为偏振态 3(和输出偏振态 4 具有相同的椭率角),最后把偏振态 3 经过一个 $\lambda/2$ 波片变换为要求的偏振态 4。整个变换的过程顺序为 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$ 。实现 $1 \rightarrow 2$ 的变换所需的第一个 $\lambda/4$ 波片的位置是唯一的,其快轴为图 4(b) 中 OE 。实现 $2 \rightarrow 3$ 的变换所需的第二个 $\lambda/4$ 波片的位置也是唯一的,它的快轴对应图 4(b) 中的 OF 。

3→4变换所需的 $\lambda/2$ 波片可以有两个位置,它们对应的快轴方位角相差 π ,分别对应图 4(b)中的 OG 和 OH 。表 2 列出了 $\lambda/4+\lambda/4+\lambda/2$ 波片组合作为

偏振变换器时,从偏振态 1 到偏振态 4 所有的波片方位角列表。

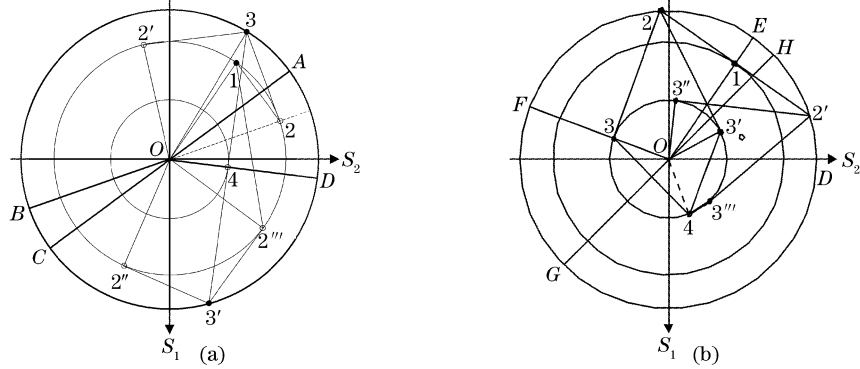


图 4 三波片组合对光波偏振态进行任意变换。(a) $\lambda/2+\lambda/4+\lambda/4$, (b) $\lambda/4+\lambda/4+\lambda/2$

Fig. 4 Arbitrary transform of SOP using three waveplates transformer. (a) $\lambda/2+\lambda/4+\lambda/4$, (b) $\lambda/4+\lambda/4+\lambda/2$

表 2 $\lambda/4+\lambda/4+\lambda/2$ 波片组合实现任意偏振态变换时三波片快轴方位角列表(斯托克斯空间)

Table 2 Azimuth angles of fast axis of waveplates in $\lambda/4+\lambda/4+\lambda/2$ waveplates transformer (in Stokes space)

Route of transformation	Position of fast axis of first QWP	Position of fast axis of second QWP	Position of fast axis of QWP
1→2→3→4	$2\theta_{in}$	$2\theta_{in}+2\epsilon_{in}+2\epsilon_{out}$	$\theta_{in}+\epsilon_{in}+\epsilon_{out}+\theta_{out}$
			$\theta_{in}+\epsilon_{in}+\epsilon_{out}+\theta_{out}+\pi$
1→2→3'→4	$2\theta_{in}$	$2\theta_{in}+2\epsilon_{in}-2\epsilon_{out}+\pi$	$\theta_{in}+\epsilon_{in}-\epsilon_{out}+\theta_{out}$
			$\theta_{in}+\epsilon_{in}-\epsilon_{out}+\theta_{out}+\pi$
1→2'→3''→4	$2\theta_{in}+\pi$	$2\theta_{in}-2\epsilon_{in}+2\epsilon_{out}$	$\theta_{in}-\epsilon_{in}+\epsilon_{out}+\theta_{out}$
			$\theta_{in}-\epsilon_{in}+\epsilon_{out}+\theta_{out}+\pi$
1→2'→3'''→4	$2\theta_{in}+\pi$	$2\theta_{in}-2\epsilon_{in}+2\epsilon_{out}+\pi$	$\theta_{in}-\epsilon_{in}-\epsilon_{out}+\theta_{out}$
			$\theta_{in}-\epsilon_{in}-\epsilon_{out}+\theta_{out}+\pi$

注：(1) 笛卡儿直角坐标中的角度是斯托克斯空间中角度的二分之一^[10]；(2) $0<\theta_{in},\theta_{out}<\pi, -\pi/2<\epsilon_{in},\epsilon_{out}<\pi/2$ ；(3) 偏振态对应黑点时, $0<\epsilon<\pi/2$ ；偏振态对应圆圈时, $-\pi/2<\epsilon<0$ ；偏振态位于偏振投射平面的圆周时 $\epsilon=0$ 。

3 实验验证

3.1 两种偏振变换器功能测试

测试偏振变换器功能的实验装置如图 5 所示。光源为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器。P₁, P₂ 是两个

线性偏振器。虚线框内为两种配置的偏振变换器。通过旋转 P₁ 和它相邻的 $\lambda/4$ 波片产生任意偏振光。从偏振变换器出射光偏振态的检测由一个 $\lambda/4$ 波片、检偏器和一个光功率计的组合来完成。

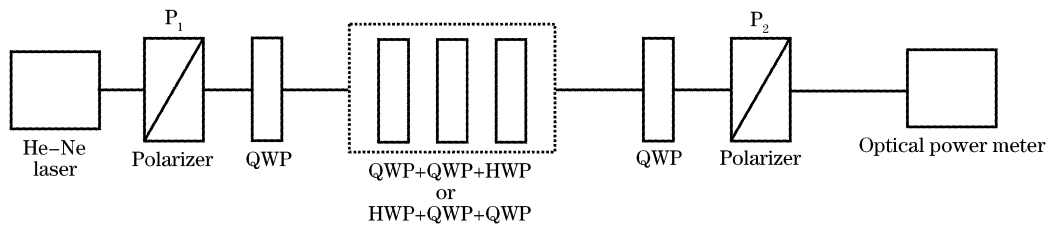


图 5 测试偏振变换器功能的实验装置

Fig. 5 Experimental setup for testing function of polarization transformations

3.2 实验结果

分别对 $\lambda/2+\lambda/4+\lambda/4$ 和 $\lambda/4+\lambda/4+\lambda/2$ 两种组合的偏振变换器进行偏振变换功能测试,为了不失变换的普遍性,我们随机选取入射光和出射光的

偏振态。对于 $\lambda/2+\lambda/4+\lambda/4$ 组合:入射光偏振态固定为 $SOP_{in}(120^\circ, 0^\circ)$,出射光偏振态 SOP_{out} 分别为 $(72^\circ, 120^\circ)$ 、 $(108^\circ, -60^\circ)$ 、 $(120^\circ, 45^\circ)$ 。变换路径为图 4(b)中的 1→2→3→4。实验结果如表 3 所示。对

于 $\lambda/4+\lambda/4+\lambda/2$ 组合,入射偏振光偏振态 SOP_{in} 分别为 $(22.5^\circ, 0^\circ)$ 、 $(60^\circ, 0^\circ)$ 、 $(240^\circ, 0^\circ)$,出射光偏振态固

定为 $SOP_{out}(90^\circ, 30^\circ)$ 。变换路径为图 4(b)中的 $1 \rightarrow 2' \rightarrow 3'' \rightarrow 4$ 。实验结果如表 4 所示。

表 3 $\lambda/2+\lambda/4+\lambda/4$ 组合偏振变换器偏振变换实验结果(斯托克斯空间)

Table 3 Experimental results of $\lambda/2+\lambda/4+\lambda/4$ waveplates transformer (in Stokes space)

SOP_{in}	Position of fast axis of HWP	Position of fast of first QWP	Position of fast axis of second QWP	SOP_{out}
$(120^\circ, 0^\circ)$	155.5°	191.6°	72°	$(72^\circ, 120^\circ)$
	335.5°			
	84°	227.5°	107.6°	$(108^\circ, -60^\circ)$
	264°			
	142.5°			
322.1°	345.3°	119.8°	$(120^\circ, 45^\circ)$	

表 4 $\lambda/4+\lambda/4+\lambda/2$ 组合偏振变换器偏振变换实验结果(斯托克斯空间)

Table 4 Experimental results of $\lambda/4+\lambda/4+\lambda/2$ waveplates transformer (in Stokes space)

SOP_{in}	Position of fast axis of first QWP	Position of fast axis of second QWP	Position of fast axis of QWP	SOP_{out}
$(22.5^\circ, 0^\circ)$	202.5°	52°	71.2°	$(90^\circ, 30^\circ)$
			251°	
$(60^\circ, 0^\circ)$	240°	90.3°	89.7°	
			269.8°	
$(240^\circ, 0^\circ)$	59.8°	119.6°	180.1°	
			359.6°	

表 3 和表 4 的实验结果表明,本文提出的两种偏振变换器可以完成任意偏振态之间的变换。同时可以看到,由于实验仪器精度的限制、波片位置(方位角)误差、光源引入的相位误差等,使得实验结果和理论计算值之间存在一定的偏差,所以研究这两种偏振变换器中波片方位角以及光源和波片本身引入的相位误差对偏振控制器变换精度的影响是很有必要的。

4 结 论

本文利用偏振态投射平面的几何方法研究了可以实现任意偏振态变换的三波片组合方式,发现两个 $\lambda/4$ 波片和一个 $\lambda/2$ 波片的任意组合都可以实现任意偏振态的变换。推导出了实现任意偏振态变换时三波片的配置和它们方位角的计算公式。最后给予了实验验证。这些结果对偏振变换器设计和实际应用具有重要意义。

参 考 文 献

1 D. A. Watley, K. S. Farley, B. J. Shaw. Compensation of polarization-mode dispersion exceeding one bit period using single high-

birefringence fiber[J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(13): 1094~1095
 2 T. Imai, K. Nosu, H. Yamaguchi. Optical polarization control utilizing an optical heterodyne detection scheme[J]. *Electron. Lett.*, 1985, **21**(2): 52~53
 3 T. Okoshi. Polarization-state control schemes for heterodyne or homodyne optical fiber communications[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1985, **3**(6): 1232~1237
 4 R. Noé, H. Heidrich, D. Hoffmann. Endless polarization control systems for coherent optics[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(7): 1199~1208
 5 W. H. J. Aarts, G. D. Khoe. New endless polarization control method using three fiber squeezers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(7): 1033~1043
 6 F. Heismann. Integrated-optic polarization transformer for reset-free endless polarization control[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1989, **25**(8): 1898~1906
 7 S. H. Rumbaugh, M. D. Jones, L. W. Casperson. Polarization control for coherent systems using nematic liquid crystals[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1990, **8**(3): 459~465
 8 Max Born, Emil Wolf. *Principles of Optics* 7th Edit[M]. New York: Cambridge University Press, 2001. 32~33
 9 Yao Yi, Shi Kun, Lu Weidong. In-line single fiber polarization controller[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(5): 636~640 (in Chinese)
 姚 毅,施 昆,路伟东等. 在线单模光纤偏振控制器研究[J]. *光学学报*, 1995, **15**(5): 636~640
 10 R. M. A. Azzam, N. M. Bashara. *Ellipsometry and Polarized Light* [M]. New York: North-Holland Publishing Co., 1977. 48~51