

激光偏振性的传输定理

高致慧 过已吉

(西安电子科技大学技术物理系, 西安 710071)

(1992年9月7日收到;1994年3月29日收到修改稿)

建立了激光偏振性的传输理论。导出在任一光学系统中, 表征激光偏振性变换的传输矩阵。进而导出了一个重要定理——激光偏振性的传输定理。分析了激光偏振性的传输特性。

PACC: 4260;4220;7730;4210

1 引言

激光偏振性是激光的重要特性之一, 它的研究涉及激光的基本理论和应用。有关激光器输出的激光束的偏振特性已有不少研究^[1,2], 但在激光技术和许多应用中, 激光束往往还要通过各种光学系统, 如平面光学系统、光波导系统等。经过光学系统传输, 激光的偏振性将发生变化, 这种变化直接影响着激光的应用。例如: 在光纤相干通信系统中, 为了获得高信噪比和检测灵敏度, 要求信号光的偏振态与本振光的偏振态在光检测器处保持恒定一致, 以避免或尽可能减少所谓的“极化噪声”, 因此需要研究并获得控制激光偏振状态的方法。在集成光学中, 当用单模光纤与集成光波导相耦合时, 为了提高耦合效率, 使光纤与光波导中基模场的偏振方向一致十分重要。所以激光偏振性传输特性的研究具有较高的理论与应用价值。目前激光传输特性的研究大都限于标量场, 对高斯光束的变换特性上^[3~5], 而对激光矢量、偏振特性的研究工作开展不多^[6,7], 缺乏系统的理论分析。本文在光学理论、激光理论的基础上, 建立了描述激光偏振性的矢量传输理论。给出了任一光学系统中, 表征光场矢量特性的传输矩阵—— H 矩阵。导出了激光偏振性的传输定理—— z 参数的 H 定理。根据这一定理可以分析、研究光学元件、系统对激光偏振性的变换特性。作为例子, 本文还分析了几种常用光学系统的偏振传输特性。

2 激光偏振性的传输定理

2.1 激光偏振性的传输定理—— z 参数的 H 定理

设激光场由 m 个模组成。由电磁场理论, 电场强度 E 为

$$E = \sum_m E_m, \quad (1)$$

E_m 表示第 m 个模的光场。在正交基矢下, 取 $e_1 = x, e_2 = y$, 则 E_m 可以分解为两个正交分量 E_{mx}, E_{my} , 有

$$\begin{aligned} \mathbf{E} = & \sum_m \mathbf{x} [E_{mx} \exp(-i\omega_m t + i\mathbf{k}_m \cdot \mathbf{r}) + E_{mx}^* \exp(i\omega_m t - i\mathbf{k}_m \cdot \mathbf{r})] \\ & + \mathbf{y} [E_{my} \exp(-i\omega_m t + i\mathbf{k}_m \cdot \mathbf{r}) + E_{my}^* \exp(i\omega_m t - i\mathbf{k}_m \cdot \mathbf{r})], \end{aligned} \quad (2)$$

ω_m 表示模 m 的角频率, $\mathbf{k}_m$ 表示模 m 的波矢, $\mathbf{r}$ 为矢径。

在左右旋基矢下, 取 $\mathbf{e}_1 = \mathbf{e}_-$ (左旋基矢), $\mathbf{e}_2 = \mathbf{e}_+$ (右旋基矢), $\mathbf{E}_m$ 可以分解为左右旋模 E_{m-}, E_{m+} , 有

$$\begin{aligned} \mathbf{E} = & \sum_m \mathbf{e}_- E_{m-} \exp(-i\omega_m t + i\mathbf{k}_m \cdot \mathbf{r}) + \mathbf{e}_+^* E_{m-}^* \exp(i\omega_m t - i\mathbf{k}_m \cdot \mathbf{r}) \\ & + \mathbf{e}_+ E_{m+} \exp(-i\omega_m t + i\mathbf{k}_m \cdot \mathbf{r}) + \mathbf{e}_+^* E_{m+}^* \exp(i\omega_m t - i\mathbf{k}_m \cdot \mathbf{r}). \end{aligned} \quad (3)$$

Lenstra 给出了描述激光偏振性的一组参量^[4], 模 m 的三个参量如下:

$$\begin{aligned} I_m &= |E_{m-}|^2 + |E_{m+}|^2, \\ \sin 2\chi &= \frac{|E_{m-}|^2 - |E_{m+}|^2}{|E_{m-}|^2 + |E_{m+}|^2}, \\ V_m &= \frac{1}{2} \text{Arg}(E_{m+} E_{m-}^*), \end{aligned} \quad (4)$$

$I_m, \sin 2\chi, V_m$ 分别表示模 m 的光强、偏振度、椭圆长轴或线偏振光的偏振方向与 z 轴的夹角。

为便于分析, 我们引入 z 参数

$$z_m = \frac{E_{m+}}{E_{m-}}. \quad (5)$$

将(5)式代入(4)式, 经变换得表征激光偏振特性的一组参量如下:

$$\begin{aligned} I_m &= |E_{m-}|^2 (1 + |z_m|^2), \\ S_m &= \frac{1 - |z_m|^2}{1 + |z_m|^2} \quad -1 \leq S_m \leq 1, \\ \theta_m &= \frac{1}{2} \text{Arg}(z_m), \end{aligned} \quad (6)$$

式中 I_m, S_m 分别为模 m 的光强、偏振度, θ_m 表示模 m 的椭圆长轴或线偏振光的偏振方向与 x 轴的夹角, $S_m = 0$, 模 m 为线偏振光; $S_m < 0$, 模 m 为右旋椭圆偏振光; $S_m > 0$, 模 m 为左旋椭圆偏振光; $S_m = -1$, 模 m 为右旋圆偏振光; $S_m = 1$, 模 m 为左旋圆偏振光。从(6)式可以看出 z 参数是确定光束偏振性的一个重要的参数。

已有的理论和实验表明由激光器输出的单模激光是完全偏振光, 如果是多模激光, 则相邻模的偏振方向相互垂直或相互平行^[2]。假定第 m 模(单模)激光场 $\mathbf{E}_m$ 入射到一光学系统, 经光学系统传输后得出射光场 $\mathbf{E}'_m$ 。在左右旋基矢下, 用列矢量表示为

$$\mathbf{E}_m = \begin{bmatrix} E_{m+} \\ E_{m-} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\mathbf{E}'_m = \begin{bmatrix} E'_{m+} \\ E'_{m-} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

本文把(7)和(8)式表示的光矢量称为 H 矢量。 $\mathbf{E}'_m$ 与 $\mathbf{E}_m$ 有一定的关系, 引入相应光学系

统的变换系数 $h_{11}, h_{12}, h_{21}, h_{22}$, 有

$$\begin{aligned} E'_{m+} &= h_{11}E_{m+} + h_{12}E_{m-}, \\ E'_{m-} &= h_{21}E_{m+} + h_{22}E_{m-}. \end{aligned} \quad (9)$$

写成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} E'_{m+} \\ E'_{m-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{m+} \\ E_{m-} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

即

$$\begin{aligned} E'_m &= H E_m, \\ H &= \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (11)$$

本文称(11)式为光学系统的H矩阵,对于确定的光学系统,H矩阵是唯一的。只要入射光场的H矢量一经确定,则出射激光场的H矢量就被完全地确定了。

由(5),(7)–(9)式,得

$$z'_m = \frac{h_{11}z_m + h_{12}}{h_{21}z_m + h_{22}}. \quad (12)$$

(12)式简明地给出了偏振性的传输规律,我们命其为 z 参数的H定律。按(6)式出射光的偏振参量为

$$\begin{aligned} I'_m &= |E'_{m-}|^2(1 + |z'_m|^2) = |E_{m-}|^2 \cdot |h_{21}z_m + h_{22}|^2 \cdot (1 + |z'_m|^2), \\ S'_m &= \frac{1 - |z'_m|^2}{1 + |z'_m|^2}, \\ \theta'_m &= \frac{1}{2} \text{Arg}(z'_m). \end{aligned} \quad (13)$$

在分析偏振特性中,主要参数是偏振度与偏振方向,由(6)和(13)式可知这一问题又归结到分析 z 参数的变化或称之为 z 参数的传输特性上。因此(12)式又可称之为激光偏振性的传输定理—— z 参数的H定律。

若已知出射光的偏振特性,反过来也可以确定入射激光场的偏振特性。由(12)式得

$$z_m = -\frac{h_{22}z'_m - h_{12}}{h_{21}z'_m - h_{11}}. \quad (14)$$

不同的H矢量,有不同的偏振参量,表示不同的偏振状态。几种偏振态的H矢量与偏振参量如表1所示。

2.2 H 矩阵

由偏振传输定理(12)式可知,任一光学系统,只要H矩阵一经确定,则其偏振变换特性就被完全地确定。H矩阵与一般光学传输理论中的传输矩阵不同。H矩阵表示的是激光光场之间的矢量变换矩阵,而T矩阵对应的是光线束几何参量的标量变换矩阵。因此涉及到激光场的矢量特性时,通常的传输矩阵T是无能为力的。而H矩阵对应于左右旋基矢下的变换矩阵,其一般形式给出如下。

光波场 E_m 在正交基矢下,可表示为

$$E_m = \begin{bmatrix} E_{mx} \\ E_{my} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

表 1 几种偏振态的 H 矢量、 z 参数和偏振参量

偏振态	H 矢量	z 参数	偏振参量
线偏振光 光矢量沿 x 轴 光矢量沿 y 轴 光矢量与 x 轴夹角 θ	$E_m = A \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$	$z_m = 1$	$I_m = 2A^2, S_m = 0, \theta_m = 0$
	$E_m = A \begin{bmatrix} i \\ -i \end{bmatrix}$	$z_m = -1$	$I_m = 2A^2, S_m = 0, \theta_m = \frac{\pi}{2}$
	$E_m = A \begin{bmatrix} e^{i\theta} \\ e^{-i\theta} \end{bmatrix}$	$z_m = e^{2i\theta}$	$I_m = 2A^2, S_m = 0, \theta_m = \theta$
圆偏振光 右旋 左旋	$E_m = A \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$z_m \rightarrow \infty$	$I_m = A^2, S_m = -1, \theta_m = 0$
	$E_m = A \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$z_m = 0$	$I_m = A^2, S_m = 1, \theta_m = 0$
椭圆偏振光 右旋($A > B$) 左旋($A < B$)	$E_m = \begin{bmatrix} Ae^{i\delta_{m+}} \\ Be^{i\delta_{m-}} \end{bmatrix}$	$z_m = \frac{A}{B} e^{i(\delta_{m+} - \delta_{m-})}$	$I_m = A^2 + B^2,$ $-1 < S_m < 0, \theta_m = \frac{1}{2}(\delta_{m+} - \delta_{m-})$
	$E_m = \begin{bmatrix} Ae^{i\delta_{m+}} \\ Be^{i\delta_{m-}} \end{bmatrix}$	$z_m = \frac{A}{B} e^{i(\delta_{m+} - \delta_{m-})}$	$I_m = A^2 + B^2,$ $0 < S_m < 1, \theta_m = \frac{1}{2}(\delta_{m+} - \delta_{m-})$

(15)式所表征的光矢量就是所谓的琼斯矢量^[8]。琼斯矢量与 H 矢量的变换关系有

$$\begin{bmatrix} E_{mx} \\ E_{my} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{i}{\sqrt{2}} & \frac{i}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{m+} \\ E_{m-} \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} E_{m+} \\ E_{m-} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

令

$$C = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{i}{\sqrt{2}} & \frac{i}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}, \quad (17)$$

C 是 H 矢量与琼斯矢量的变换矩阵,其逆矩阵

$$C^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{i}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{i}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (18)$$

在正交基矢下,模 m 的入射光场 $\begin{bmatrix} E_{mx} \\ E_{my} \end{bmatrix}$, 经过光学系统,出射光场为 $\begin{bmatrix} E'_{mx} \\ E'_{my} \end{bmatrix}$, 有

$$\begin{bmatrix} E'_{mx} \\ E'_{my} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{mx} \\ E_{my} \end{bmatrix} = G \begin{bmatrix} E_{mx} \\ E_{my} \end{bmatrix}, \quad (19)$$

其中

$$G = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix} \quad (20)$$

是两个琼斯矢量之间的变换矩阵,即琼斯矩阵^[8]。将(16)式代入(19)式得

$$\begin{bmatrix} E'_{m+} \\ E'_{m-} \end{bmatrix} = C^{-1}GC \begin{bmatrix} E_{m+} \\ E_{m-} \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} E_{m+} \\ E_{m-} \end{bmatrix}, \quad (21)$$

所以

$$H = C^{-1}GC, \quad (22)$$

即

$$\begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & i \\ 1 & -i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -i & i \end{bmatrix}. \quad (23)$$

(22)式和(23)式给出了H矩阵与G矩阵的变换关系。由此可见,只要知道了琼斯矩阵,通过(23)式便可确定H矩阵。从而确定输出光场的偏振特性。

如果光学系统由若干个光学元件或光学子系统组成,对应的偏振变换矩阵分别为 $H_1, H_2, \dots, H_n$,则整个光学系统的H矩阵为

$$H = H_n \cdot H_{n-1} \cdots H_2 \cdot H_1. \quad (24)$$

这时整个光学系统的G矩阵与H矩阵仍满足(22)式。表2给出几种常用光学元器件的H矩阵。

表2 几种光学元、器件的H矩阵

光学元、器件		H矩阵
线偏振器	α : 线偏振器的透光轴与 x 轴的夹角	$H_L(\alpha) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & e^{i2\alpha} \\ e^{-i2\alpha} & 1 \end{bmatrix}$
波片	α : 波片快轴与 x 轴的夹角 δ : 波片快、慢轴之间的位相延迟	$H_P(\alpha, \delta) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 + e^{i\delta} & (1 - e^{i\delta})e^{i2\alpha} \\ (1 - e^{i\delta})e^{-i2\alpha} & 1 + e^{i\delta} \end{bmatrix}$
全波片	$\delta = 2\pi$	$H_P(\alpha, 2\pi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
半波片	$\delta = \pi$	$H_P(\alpha, \pi) = \begin{bmatrix} 0 & e^{i2\alpha} \\ e^{-i2\alpha} & 0 \end{bmatrix}$
$\frac{1}{4}$ 波片	$\delta = \frac{\pi}{2}$	$H_P(\alpha, \frac{\pi}{2}) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 + i & (1 - i)e^{i2\alpha} \\ (1 - i)e^{-i2\alpha} & 1 + i \end{bmatrix}$
旋光元件	α : 偏振方向逆时针旋转的角度	$H_R(\alpha) = \begin{bmatrix} e^{i\alpha} & 0 \\ 0 & e^{-i\alpha} \end{bmatrix}$
平面反射元件	垂直于入射面的振动(s 分量)为 x 轴方向 r_s, r_p 为 s 分量与 p 分量的反射系数	$H_r(r_s, r_p) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} r_s + r_p & r_s - r_p \\ r_s - r_p & r_s + r_p \end{bmatrix}$
各向同性移相器	ϕ : 相移	$H_i(\phi) = \begin{bmatrix} e^{i\phi} & 0 \\ 0 & e^{i\phi} \end{bmatrix}$
圆起偏器	$\begin{cases} \text{右旋} \\ \text{左旋} \end{cases}$	$H_c(R) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ $H_c(L) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$

3 激光偏振性的传输特性

下面简要分析几种光学元件(系统)对激光束的偏振变换特性。由多个元件组成的光学系统运用(24)式后可进行类似的分析。

假定入射激光是线偏振光,相应的 H 矢量为

$$\mathbf{E}_m = A \begin{bmatrix} e^{i\theta} \\ e^{-i\theta} \end{bmatrix}, \quad (25)$$

$$z_m = e^{2i\theta}, \quad I_m = 2A^2, \quad \theta_m = \theta, \quad S_m = 0. \quad (26)$$

3.1 线偏振器

$$H_L(\alpha) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & e^{i2\alpha} \\ e^{-i2\alpha} & 1 \end{bmatrix}. \quad (27)$$

起偏器的方向与 x 轴的夹角为 α 。入射光场 $\mathbf{E}_m$ 经过光学系统一线起偏器后,出射光场为 $\mathbf{E}'_m$ 。由 z 参数的 H 定律(12)式,

$$z'_m = \frac{z_m h_{11} + h_{12}}{z_m h_{21} + h_{22}} = \frac{z_m + e^{i2\alpha}}{z_m e^{-i2\alpha} + 1} = e^{i2\alpha}. \quad (28)$$

(28)式表明 z'_m 与 z_m 无关,即无论入射光场的偏振态如何,经线偏振器后偏振特性就是唯一确定的。将(28),(26)式代入(13)式得

$$I'_m = \frac{I_m}{2} [1 + \cos(2\theta - 2\alpha)], \quad (29a)$$

$$S'_m = 0, \quad (29b)$$

$$\theta'_m = \alpha. \quad (29c)$$

(29b)和(29c)式表明出射光为线偏振光,且偏振方向与线偏振器的方向一致,与入射光无关。对于入射光而言相当于将入射光的偏振方向旋转了 $(\alpha - \theta)$ 。(规定逆时针为正)。

(29a)式表明出射光强与入射光强有关,与线偏振器的方向有关。当 $\alpha = \theta$ 时, $I'_m = I_m$;

$\theta - \alpha = \pm \frac{\pi}{4}$, 则 $I'_m = \frac{I_m}{2}$; 而 $\theta - \alpha = \pm \frac{\pi}{2}$, 则 $I'_m = 0$ 。

3.2 波片

光学系统为一波片, α 表示波片快轴与 x 轴的夹角, δ 表示波片快、慢轴之间的位相延迟,则

$$H_p(\alpha, \delta) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 + e^{i\delta} & (1 - e^{i\delta})e^{i2\alpha} \\ (1 - e^{i\delta})e^{-i2\alpha} & 1 + e^{i\delta} \end{bmatrix}. \quad (30)$$

1) $\delta = \frac{\pi}{2}$, $\frac{1}{4}$ 波片

$$H_p\left(\alpha, \frac{\pi}{2}\right) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 + i & (1 - i)e^{i2\alpha} \\ (1 - i)e^{-i2\alpha} & 1 + i \end{bmatrix}. \quad (31)$$

(1) 入射光为线偏振光, 偏振方向与 x 轴夹角为 θ , 则

$$z'_m = \frac{(1+i)e^{2i\theta} + (1-i)e^{i2\alpha}}{(1-i)e^{2i\theta}e^{-i2\alpha} + (1+i)}, \quad (32)$$

$$S'_m = \sin 2(\theta - \alpha), \quad (33a)$$

$$\theta'_m = \begin{cases} \alpha & |\theta - \alpha| < \frac{\pi}{4}, \\ \frac{\pi}{2} - \alpha & \frac{\pi}{4} < |\theta - \alpha| \leq \frac{\pi}{2}, \end{cases} \quad (33b)$$

$$I'_m = I_m. \quad (33c)$$

$\frac{1}{4}$ 波片使入射光的偏振状态发生改变, 但不改变强度特性。

当 $\theta - \alpha = 0$ (或 $|\theta - \alpha| = \frac{\pi}{2}$)

$$S'_m = 0, \theta'_m = \alpha \quad (\text{或 } \theta'_m = \frac{\pi}{2} - \alpha)$$

出射光仍为线偏振光, 偏振方向 α (或 $\frac{\pi}{2} - \alpha$)。

当 $|\theta - \alpha| = \frac{\pi}{4}$, $S'_m = \pm 1$ 。

线偏振光变换为圆偏振光, 当 $\theta - \alpha = \frac{\pi}{4}$, 出射光为左旋圆偏振光; 当 $\theta - \alpha = -\frac{\pi}{4}$, 出射光为右旋圆偏振光。当 $\theta - \alpha \neq 0$, $|\theta - \alpha| \neq \frac{\pi}{4}$, 则

$$-1 < S'_m < 0 \quad \text{或} \quad 0 < S'_m < 1$$

线偏振光变换为椭圆偏振光。椭圆长轴为 α 或 $\frac{\pi}{2} - \alpha$ 。

(2) 入射光为圆偏振光, $z_m \rightarrow \infty$ (右旋圆偏振光),

$$\text{则} \quad z'_m = e^{i(\frac{\pi}{2} + 2\alpha)}, S'_m = 0, \theta'_m = \frac{\pi}{4} + \alpha, I'_m = I_m. \quad (34)$$

右旋圆偏振光入射到 $\frac{1}{4}$ 波片, 则出射光为线偏振光。偏振方向为 $\alpha + \frac{\pi}{4}$ 。类似的左旋

圆偏振光经 $\frac{1}{4}$ 波片变换为线偏振光, 偏振方向为 $\alpha - \frac{\pi}{4}$ 。

(3) 入射光为椭圆偏振光, 椭圆长轴与 x 轴夹角为 θ , 则

$$z_m = re^{2i\theta} \quad (r \neq 0; r \neq \infty),$$

有

$$z'_m = e^{i(\frac{\pi}{2} + 2\alpha)} \frac{re^{i(2\theta - 2\alpha)} - i}{re^{i(2\theta - 2\alpha)} + i}, \quad (35a)$$

$$S'_m = \frac{2r \sin(2\theta - 2\alpha)}{r^2 + 1}, \quad (35b)$$

$$\theta'_m = \frac{\pi}{4} + \alpha + \beta, \quad (35c)$$

其中

$$\beta = \frac{1}{2} \arctan \frac{2r \cos(2\theta - 2\alpha)}{1 - r^2}.$$

由(35b)式可见出射光一般仍为椭圆偏振光。但当 $\theta = \alpha$ 时, $S'_m = 0$, 此时出射光为线偏振光, 偏振方向由(35c)式确定。

2) $\delta = \pi$, 半波片

$$H_p(\alpha, \pi) = \begin{bmatrix} 0 & e^{i2\alpha} \\ e^{-i2\alpha} & 0 \end{bmatrix}, \quad (36)$$

$$z'_m = \frac{1}{z_m} e^{i4\alpha}, \quad (37a)$$

$$S'_m = -S_m, \quad I'_m = I_m, \quad \theta'_m = 2\alpha - \theta_m. \quad (37b)$$

(37b)式表明经半波片变换, 出射光场的强度不变, 偏振类型不变。如果入射光场为线偏振光, 出射光场仍为线偏振光; 如果入射光场为椭圆偏振光, 出射光场亦为椭圆偏振光, 但右旋将变换为左旋, 左旋将变换为右旋。同时半波片使线偏振光的振动方向(或椭圆偏振光的长轴)发生转动, $\theta'_m = 2\alpha - \theta_m$ 。

3) $\delta = 2\pi$, 全波片

$$H_p(\alpha, 2\pi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (38)$$

$z'_m = z_m$, 出射场与入射场的偏振态完全一致。

3.3 旋光元件

设 α 表示逆时针旋转的角度, 则

$$H_R(\alpha) = \begin{bmatrix} e^{i\alpha} & 0 \\ 0 & e^{-i\alpha} \end{bmatrix}, \quad (39)$$

有

$$z'_m = e^{2i\alpha} z_m, \quad (40a)$$

$$S'_m = S_m, \quad \theta'_m = \theta + \alpha, \quad I'_m = I_m. \quad (40b)$$

旋光元件不改变入射光的偏振类型与光强, 只是使入射光的偏振方向(或椭圆长轴)旋转 α 角。

3.4 平面反射元件

假定垂直于入射面的振动(即 s 分量)为 x 方向, 平行于入射面的振动(p 分量)为 y 方向, 则

$$H_r(r_s, r_p) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} r_s + r_p & r_s - r_p \\ r_s - r_p & r_s + r_p \end{bmatrix}, \quad (41)$$

r_s, r_p 分别表示 s 分量与 p 分量的反射系数。

$$r_s = -\frac{\sin(i_1 - i_2)}{\sin(i_1 + i_2)}, \quad (42a)$$

$$r_p = \frac{\tan(i_1 - i_2)}{\tan(i_1 + i_2)}, \quad (42b)$$

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2, \quad (42c)$$

i_1 为入射角, i_2 为折射角.

(1) 入射光为线偏振光, $z_m = e^{i2\theta}$,

则
$$z'_m = \frac{e^{i2\theta}(r_s + r_p) + (r_s - r_p)}{e^{i2\theta}(r_s - r_p) + (r_s + r_p)} = e^{-i2\theta} e^{i2\delta}, \quad (43a)$$

$$\delta = \tan^{-1} \frac{(r_s + r_p) \sin 2\theta}{(r_s + r_p) \cos 2\theta + (r_s - r_p)},$$

$$S'_m = 0, \quad \theta'_m = \delta - \theta, \quad (43b)$$

$$I'_m = \frac{I_m}{2} (r_s^2 + r_p^2 + (r_s^2 - r_p^2) \cos 2\theta). \quad (43c)$$

(43)式表明线偏振光入射到平面反射元件,其反射光仍为线偏振光,偏振类型不变,但偏振方向转动了一个角度, $\theta'_m = \delta - \theta$,相当于偏振方向转动了 $\delta - 2\theta$. 反射光的光强取决于 r_s, r_p 及 θ 角.

(2) 入射光为圆偏振光

若入射光为右旋圆偏振光, $z_m \rightarrow \infty$.

则
$$z'_m = \frac{r_s + r_p}{r_s - r_p} = \tan i_1 \tan i_2, \quad (44a)$$

$$S'_m = \frac{-2r_s r_p}{r_s^2 + r_p^2} = \frac{1 - (\tan i_1 \tan i_2)^2}{1 + (\tan i_1 \tan i_2)^2}, \quad (44b)$$

$$\theta'_m = 0. \quad (44c)$$

经平面反射后,反射光一般为椭圆偏振光,椭圆长轴沿 x 方向.

在垂直入射情况下, $i_1 = i_2 = 0$, 有 $S'_m = 1$, 这表明右旋圆偏振光转换为左旋圆偏振光. 同样可以说明左旋圆偏振光经反射元件垂直反射后,将变换为右旋圆偏振光.

如果布儒斯特角入射, $i_1 = i_p, S'_m = 0$, 这时圆偏振光变换为线偏振光. 偏振方向沿 x 方向.

[1] D. Lenstra, *Physica*, **95C** (1978), 405.

[2] 过巴吉等, *光学学报*, **7**(1987), 97.

[3] H. Kogelnik, T. Li, *Proc. IEEE*, **54** (1966), 1312.

[4] E. Bernaben *et al.*, *Optik*, **83** (1989), 145.

[5] 吕百达等, *光学学报*, **11**(1991), 115.

[6] P. L. Lamekin *et al.*, *Sov. J. Quant. Electron.*, **12** (1982), 1516.

[7] 高致慧等, *激光与红外*, **20**(1990), 11.

[8] A. Gerrard *et al.*, *Introduction to Matrix Method in Optics* (Wiley, New York, 1975).

TRANSMISSION THEOREM OF LASER POLARIZATION

GAO ZHI-HUI GUO SI-JI

(*Department of Applied Physics, Xidian University, Xi'an 710071*)

(Received 7 September 1992; revised manuscript

received 29 March 1994)

ABSTRACT

The transmission theory of laser polarization is established in the present paper. The transmission matrix of laser polarization in optical system is derived. The important theorem—the transmission theorem of laser polarization is deduced. Transmission properties of laser polarization are analysed.

PACC: 4260; 4220; 7730; 4210