

# 光学系统的偏振效应研究

李国华 肖胜安 李继仲

(曲阜师范大学激光研究所, 曲阜 273165)

## 提 要

本文研究了光线经过光学系统时偏振度的变化,发现:对某一类非消偏振光学系统,部分偏振光经过它时偏振度降低。

关键词 非消偏振光学系统,偏振度。

## 1 引 言

最简单的描述部分偏振光通过光学系统后,使偏振态变化的方法是用相干矩阵来表示光波的偏振态,用琼斯(Jones)矩阵来表示使偏振态改变的光学系统<sup>[1]</sup>。

本文将琼斯矩阵按群的知识进行分类,对部分偏振光经过它们时偏振度的变化进行了研究,结果表明:对于其中某些琼斯矩阵,部分偏振光经过对应的光学系统时,偏振度降低,产生了退偏效应。

## 2 琼斯矩阵的分类

按琼斯矩阵是否奇异进行分类:由于研究中绝对相位因子无意义,就不再考虑它。

### 2.1 奇异琼斯矩阵

这类矩阵总可表示成

$$T = e^{i\nu} \begin{bmatrix} ae^{i\alpha} & be^{i\beta} \\ ce^{-i\beta} & de^{-i\alpha} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中  $ad - bc = 0$ 。不考虑位相因子  $e^{i\nu}$ , 这一矩阵具有 5 个独立变量, 本文用  $\Sigma_s$  表示这类矩阵的集合。

### 2.2 非奇异矩阵

所有的非奇异琼斯矩阵构成一两维线性群  $GL(2, C)$ <sup>[2,3]</sup>, 该群的任一元素为

$$T = (\det T)^{1/2} T' \quad (2)$$

$$T' \in SL(2, C). \quad (3)$$

因此  $T$  总可写成

$$T = \lambda e^{i\nu} T'$$

其中  $T' \in SL(2, C)$  为对应行列式等于 1 的复  $2 \times 2$  矩阵。一般地  $T'$  具有 6 个独立参量, 考虑它的实正数  $\lambda$ ,  $T$  为具有 7 个独立参量的琼斯矩阵, 将这种琼斯矩阵的集合记为  $\Sigma_{NS}$ 。

$SL(2, C)$ 中有一特殊的子群  $SU(2)$ 群, 对于  $U \in SU(2)$ , 有  $U^+ = U^{-1}$ ,  $U$  矩阵只有 3 个独立变量, 将形如

$$T = \lambda e^{i\nu} U \quad (5)$$

的矩阵构成的集合记为  $\Sigma_u$ .

容易看到,  $\Sigma_U \subset \Sigma_{NS}$ , 记  $\Sigma_{NU} = \Sigma_{NS} - \Sigma_U$ .

### 3 部分偏振光经过光学系统偏振度的变化

相干矩阵为  $J_i$  的入射光经过一光学系统  $T$  后, 出射光的相干矩阵  $J_o$  为<sup>[1]</sup>

$$J_o = T J_i T^+ \quad (6)$$

相干矩阵为  $J$  的部分偏振光的偏振度为<sup>[1]</sup>

$$\mathcal{P} = \left[ 1 - \frac{4 \det J}{(T_r J)^2} \right]^{1/2} \quad (7)$$

#### 3.1 当 $T \in \Sigma_S$ 时

无论  $J_i$  的形式如何,  $\det J_o = 0$ , 因此

$$\mathcal{P}_o = 1, \quad (8)$$

即任意偏振态的入射光经过这类光学系统后, 出射光为全偏光.

#### 3.2 对 $T \in \Sigma_U$

$$\det J_o = \lambda^4 \det J_i, \quad (9)$$

$$T_r J_o = \lambda^2 T_r J_i. \quad (10)$$

将(9)、(10)代入(7)式得

$$\mathcal{P}_o = \mathcal{P}_i. \quad (11)$$

部分偏振光经过这类光学系统后, 偏振度不变.

#### 3.3 $\Sigma_{NU}$ 上的任一元素 $T$ 总可写成

$$T = \lambda U_2 S U_1, \quad (U U^+ = 1) \quad (12)$$

$$S = \begin{pmatrix} u & 0 \\ 0 & u^{-1} \end{pmatrix}, \quad (u > 1) \quad (13)$$

将入射光的相干矩阵写成

$$J_i = U_1^+ \tilde{J}_i U_1,$$

式中

$$\tilde{J}_i = \begin{pmatrix} a & c \\ a^* & b \end{pmatrix}, \quad (14)$$

$\tilde{J}_i$  为半正定 Hermitian 矩阵于是

$$\det J_o = \lambda^4 \det J_i, \quad (15)$$

$$T_r J_o = \lambda^2 (u^2 a + u^{-2} b). \quad (16)$$

此时入射光的偏振度  $\mathcal{P}_i$  和出射光的偏振度  $\mathcal{P}_o$  (将(15)、(16)式代入(7)式)分别为

$$\mathcal{P}_i = \left[ 1 - \frac{4 \det J_i}{(a+b)^2} \right]^{1/2}, \quad (17)$$

$$\mathcal{P}_0 = \left[ 1 - \frac{4 \det J_i}{(u^2 a + u^{-2} b)^2} \right]^{1/2}. \quad (18)$$

当  $u^2 a + u^{-2} b < a + b$ , 即  $(b/a) > u^2$  时,  $\mathcal{P}_0 < \mathcal{P}_i$ , 即部分偏振光经过该非消偏振光学系统后, 偏振度降低.

## 4 举例与实验验证

### 4.1 假设入射光的相干矩阵 $J_i = \begin{pmatrix} a & 0 \\ 0 & b \end{pmatrix}$

即强度为  $a, b$  的沿  $x$  方向和  $y$  方向的两线偏光的非相干叠加, 经过一平面反射, 这时

$$T = \begin{pmatrix} r_s & 0 \\ 0 & r_p \end{pmatrix},$$

$r_s, r_p$  为反射菲涅耳系数. 可以看到,  $T \in \Sigma_{N\bar{u}}$  出射光相干矩阵为

$$J_0 = \begin{pmatrix} a|r_s|^2 & 0 \\ 0 & b|r_p|^2 \end{pmatrix}$$

因此,  $\mathcal{P}_0 = (|r_s|^2 a - |r_p|^2 b) / (a|r_s|^2 + b|r_p|^2)$ ; 对应的,  $\mathcal{P}_i = |a - b| / (a + b)$

当  $(a/b) < (|r_p|^2 / |r_s|^2)$  时,  $\mathcal{P}_0 < \mathcal{P}_i$  (考虑到  $|r_p|^2 / |r_s|^2 < 1$ );

当  $(a/b) = (|r_p|^2 / |r_s|^2)$  时,  $\mathcal{P}_0 = 0$ , 此时出射光为完全非偏振光.

### 4.2 实验装置

采用图 1 的装置进行验证. 图中  $L$  为激光器 (632.8 nm),  $P_1, P_2, P_3$  为 Glan-Taylor 棱镜,  $c$  为  $\lambda/4$  波片,  $S_1, S_2$  为平行分束器,  $R$  为平面反射镜,  $D$  为探测器.  $P_1, c$  的作用是获得圆偏光,  $S_1, S_2$  的作用是获得相干矩阵形如  $\begin{pmatrix} a & 0 \\ 0 & b \end{pmatrix}$  的部分偏振光.

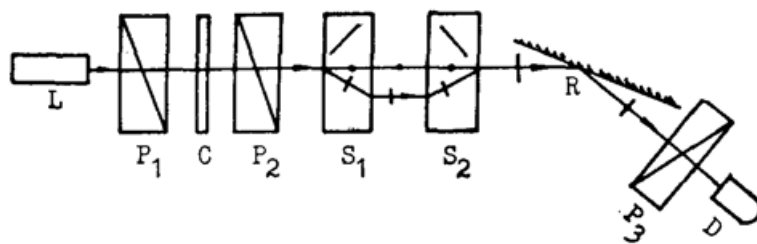


Fig. 1 Scheme for measuring the change of degree of polarization of light

### 4.3 实验步骤

- 1) 调整  $\lambda/4$  波片的方位, 使  $P_2$  的入射光为圆偏光;
- 2) 在光路中无  $S_1, S_2$  及  $P_3$  时, 转动  $P_2$ , 记下探测器上读数最大和最小时  $P_2$  的方位, 此位置即为  $P_2$  的出射电矢量平行于  $s$  和  $p$  的两位置, 最大、最小光强之比就是  $(|r_s|^2 / |r_p|^2)$  之值.
- 3) 将  $P_2$  转至光强最大的位置, 将  $S_1$  插入, 旋转  $S_1$  使探测器  $D$  上读数最大, 然后插入  $S_2$  进行同样的调整.
- 4) 将  $P_2$  转至某一位置, 将  $P_3, D$  置于反射镜之前, 转动  $P_3$ , 读出最大光强  $I_{\max}$  和最小光强  $I_{\min}$ , 再将  $P_3, D$  置于反射镜之后, 转动  $P_3$  读出最大光强  $I_{0\max}$  和最小光强  $I_{0\min}$ , 重

复测量 3 次, 取其平均值.

将  $P_2$  转至另几个位置, 重复上述实验. 其实验结果如表 1 所示. 从表 1 中看到, 当  $I_{i \max}, I_{i \min}$  相差较大时, 出射光的偏振度低于入射光的偏振度, 与前面的理论推算一致.

Table 1

$P_2$ position	$I_{i \max}$ (mW)	$I_{i \min}$ (mW)	$P_i$	$I_{0 \max}$ (mW)	$I_{0 \min}$ (mW)	$P_0$
1	14.31	10.82	0.14	5.83	3.46	0.25
2	16.52	8.65	0.31	4.74	3.98	0.087
3	18.23	7.15	0.44	4.39	3.91	0.058

## 5 结 论

1) 本文的分析表明, 可用形如 3.3 中的 Jones 矩阵描述的光学系统, 当部分偏振光经过它时, 偏振度可能降低.

2) 一般的非消偏振系统的 Mueller 矩阵元素之间只有 9 个相互联系的 2 次方程 (对应的 Jones 矩阵有 7 个独立变量), 在我们的分类中, 有些类中 Jones 矩阵的独立参量少于 7 个, 因此相应的 Mueller 矩阵元之间有额外的关系式, 对这些关系式的研究将加深对 Mueller 矩阵与 Jones 矩阵相互关系的研究.

本文只对过去定义的光学系统进行了分析, 对于部分偏振光经过这一意义下的消偏振系统时偏振度的变化, 分析更为复杂, 有待进一步研究.

## 参 考 文 献

- [1] R. M. A. 阿查姆等著, 梁民基译, 椭圆偏振测量术和偏振光. 北京: 科学出版社, 1986: 42, 92
- [2] Nathan, Jacobson, *Basic Algebra I*. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1985: 342~401
- [3] 徐振环. 群论导引. 哈尔滨: 黑龙江科技出版社, 1985 版

## Study on polarization effect of optical system

LI GUOHUA    XIAO SHENGAN    LI JIZHONG  
(Laser Institute, QuFu Normal University)

(Received 1 November 1991; revised 19 March 1992)

## Abstract

Transformation of the degree of polarization under the action of a nondepolarizing system is analysed. We find that the degree of polarization may be reduced in some nonpolarizing systems and it does not agree with the belief before.

**Key words** Nondepolarizing optical system, Degree of polarization.