

# 完全偏振光在圆/椭圆基矢下的表征及其光矢轨迹做图法

王政平 余 龙

(哈尔滨工程大学理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 完全偏振光的圆基矢与椭圆基矢表述是表征光学偏振态的两种重要手段。基于偏振光学理论与琼斯矩阵算法, 导出了两套采用圆基矢与椭圆基矢表述光的偏振态的基本公式; 提出用光矢的两个元素同时表示四个物理参量的方法与先将复的光矢分解成两个列矢之和, 再用这两个列矢形成的椭圆叠加形成最终椭圆的处理复光矢做图问题的方法; 利用一些典型偏振态的例子评估了方法的可行性。结果表明导出的理论结果正确, 提出的方法可行。

**关键词** 物理光学; 偏振光学; 琼斯矩阵运算; 正交基矢; 相位

**中图分类号** O436.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0526001

## Expressions of Totally Polarized Light Employing Circular and Elliptical Basic Vectors and Methods of Locus Plotting of Optical Vectors

Wang Zhengping Yu Long

(Science School, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract** The expressions of totally polarized light with circular and elliptical basic vectors are two of the approaches to characterize states of optical polarization. Based on the theory of polarization optics and Jones calculus, we derive two sets of fundamental formulae expressing the states of optical polarization exploiting circular and elliptical basic vectors, propose a way to describe simultaneously four physical parameters using two elements of an optical vector, and an approach of drawing complex optical vectors's locuses. The first step of the approach is to turn the complex optical vector into the form of a sum of two row vectors, and then, to superpose the two ellipses drawn according to the two vectors, into the final ellipse. We assess the feasibility of the methods proposed here, exploiting some typical examples of states of optical polarization. The results show that the formulae derived here are correct and the methods proposed here are feasible.

**Key words** physical optics; polarization optics; Jones calculus; orthogonal basic vectors; phase

**OCIS codes** 260.5430; 350.5030

## 1 引 言

随着激光技术的出现与发展, 在近几十年里, 作为物理光学的重要分支之一的偏振光学不仅在传统的晶体光学器件和光纤传感等领域获得了大量的应用<sup>[1~5]</sup>, 在近一、二十年来迅速发展起来的诸如等离子学<sup>[6]</sup>、光子晶体<sup>[7,8]</sup>与超材料<sup>[9,10]</sup>等新兴领域中也扮演了重要的角色。

完全偏振光(简称为偏振光)包括线偏振光、圆偏振光(简称为圆光)与椭圆偏振光(简称为椭圆

光)。根据偏振光学理论, 所有可能存在的偏振光构成一个酉空间。该酉空间中的任何一对正交基矢都可用于描述光学偏振态。依据选取的正交基矢的不同, 可将其分类成直线正交基矢(笛卡儿坐标系), 圆正交基矢(简称为圆基矢)与椭圆正交基矢(简称为椭圆基矢)三种。其中每一种都包含无穷多对正交基矢构成方式。用笛卡儿坐标系描述偏振光的方法已广为人知也用得最多。用圆基矢与椭圆基矢对偏振光的表述也是表征光学偏振态的两种重要手段。

**收稿日期**: 2012-11-28; **收到修改稿日期**: 2013-01-14

**作者简介**: 王政平(1949—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事偏振光学传感理论与技术等方面的研究。

E-mail: zpwang@hrbeu.edu.cn(中国光学学会会员号: S042011267S)

然而用圆基矢与椭圆基矢表征光学偏振态的相关内容在权威专著中却鲜有述及<sup>[11~14]</sup>,在笔者所能搜集到的专业文献中也罕见报道。而在与偏振光学有关的教学与科研中经常会遇到需用圆基矢或椭圆基矢表征光学偏振态的情形。为解决这一问题,基于偏振光学理论与琼斯矩阵算法<sup>[15]</sup>,导出两套采用圆基矢与椭圆基矢表述偏振光的基本公式;提出在采用圆基矢或椭圆基矢表征偏振光时用琼斯矢的两个元素同时表示四个物理参量(两个振幅与两个相位)的方法;提出先将复的琼斯列矢分解成两个列矢之和,再用这两个列矢形成的椭圆叠加成最终椭圆的处理复琼斯矢做图问题的方法;并利用一些典型偏振态的例子论证提出方法的可行性。

## 2 用圆基矢表征偏振光

在笛卡儿坐标系中,光矢的两个分量的大小分别沿  $x$  与  $y$  两个直线方向上以三角函数的形式往复振荡,故可采用振幅与  $e$  的复指数相乘的方式来描述这一过程。在采用圆基矢或椭圆基矢表征光学偏振态时,光矢的两个分量的端点则是分别在左、右旋圆或左、右旋椭圆轨道上循环旋转,故应直接采用相位角(旋转角)描述其相位。但因此情形下相位角不再能直接与振幅相乘,故需提出新的同时表示光矢分量振幅与相位的方法。为此,在本文下面的章节中将分别用  $F\exp[j(\omega t + \delta)]$  和  $F|_{\omega t + \delta}$  的方式表示光矢某分量在笛卡儿坐标系和以圆或椭圆为基矢的坐标系中的振幅与相位。其中  $F$  为该分量的振幅

(左、右旋圆 / 椭圆分量半径 / 长轴与基矢半径 / 长轴的比值);  $\omega t + \delta$  为分量的相位。

三种坐标系之间的变换关系取决于各自事先定义的正交基矢的形式,并不是唯一的。

为突出偏振特性并减少占用版面,下面的推导过程中除非必要,一般将略去光矢两个分量共有的振幅与相位并将接续的式子仍用等号连接。讨论中不考虑归一化问题。本文时间因子采用  $\exp(j\omega t)$  形式。

### 2.1 用圆基矢与方位角及椭率角表征偏振光

将光矢用方位角及椭率角表示为

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \epsilon - j \sin \theta \sin \epsilon \\ \sin \theta \cos \epsilon + j \cos \theta \sin \epsilon \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中  $\theta$  是线偏振光或椭圆光长轴与  $x$  轴的夹角(方位角),  $\epsilon$  是偏振光的椭率角,  $\omega$  是光学振动圆频率。

再分别选用左、右旋圆光  $\mathbf{e}_l = \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix}$  与  $\mathbf{e}_r =$

$\begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix}$  作为一对正交基矢,下脚标  $l, r$  分别表示左旋与右旋。因它们之间具有相同的相位,因此在做轨迹图时,若两个分量圆之间没有额外的相位差,则两个圆均应自  $x$  轴开始分别沿逆、顺时针方向旋转。在此定义下,从笛卡儿坐标系到圆基矢坐标系之间的变换关系为

$$\begin{bmatrix} E_l \\ E_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & j \\ 1 & -j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}, \quad (2)$$

将(1)式变换到圆基矢坐标系可得到

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} E_l \\ E_r \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & j \\ 1 & -j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\cos \theta \cos \epsilon - j \sin \theta \sin \epsilon) + j(\sin \theta \cos \epsilon + j \cos \theta \sin \epsilon) \\ (\cos \theta \cos \epsilon - j \sin \theta \sin \epsilon) - j(\sin \theta \cos \epsilon + j \cos \theta \sin \epsilon) \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} (\cos \epsilon - \sin \epsilon) \\ (\cos \epsilon + \sin \epsilon) \exp(-j2\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\cos \epsilon - \sin \epsilon) |_{\omega t} \\ (\cos \epsilon + \sin \epsilon) |_{\omega t - 2\theta} \end{bmatrix}, \quad (3) \end{aligned}$$

(3)式是用圆基矢与方位角及椭率角表征所有可能的偏振光的基本公式。下面利用(3)式导出几种典型情形的基本表达式。

#### 2.1.1 沿任意 $\theta$ 角方向振动的线偏振光

此情形下有  $\theta = \theta, \epsilon = 0$ , 代入(3)式可得

$$\begin{bmatrix} E_l \\ E_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\cos \epsilon - \sin \epsilon) |_{\omega t} \\ (\cos \epsilon + \sin \epsilon) |_{\omega t - 2\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 |_{\omega t} \\ 1 |_{\omega t - 2\theta} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

利用(4)式做图时,可令列矢两个分量的  $\omega t$  从 0 变化到  $2\pi$ , 即令左、右旋圆光从  $t = 0$  时刻的起始点开始分别沿各自规定的方向旋转一周,在各取样

点处将两个分量半径利用平行四边形方法合成矢量,最后将各合成的矢量端点连接成轨迹图。在(4)式中右旋圆分量比左旋圆分量相位滞后  $2\theta$ , 故在画图时若左旋圆分量的起始点在  $x$  轴上,则右旋圆分量的起始点应选在自  $x$  轴算起逆时针旋转过  $2\theta$  角的位置上。

#### 2.1.2 椭圆光与圆光

1) 左、右旋正椭圆光

此时有  $\theta = 0, \epsilon > 0$  (右旋) 或  $\epsilon < 0$  (左旋)。将其代入(3)式得:

$$\begin{bmatrix} E_l \\ E_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\cos \varepsilon - \sin \varepsilon) |_{\omega t} \\ (\cos \varepsilon + \sin \varepsilon) |_{\omega t} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中,当 $(\cos \varepsilon - \sin \varepsilon) < (\cos \varepsilon + \sin \varepsilon)$ 时为右旋正椭圆光,反之则为左旋正椭圆光。

### 2) 左、右旋圆光

此时有 $\theta = 0, \varepsilon = \pi/4$  (右旋) 或  $\varepsilon = -\pi/4$  (左旋), 将其代入(3)式分别得到

$$\begin{bmatrix} E_l \\ E_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\cos \varepsilon - \sin \varepsilon) |_{\omega t} \\ (\cos \varepsilon + \sin \varepsilon) |_{\omega t - 2\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \sqrt{2} |_{\omega t} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

与

$$\begin{bmatrix} E_l \\ E_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\cos \varepsilon - \sin \varepsilon) |_{\omega t} \\ (\cos \varepsilon + \sin \varepsilon) |_{\omega t - 2\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2} |_{\omega t} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

它们分别是右旋圆光与左旋圆光。

### 3) 左、右旋斜椭圆光

此时有 $\theta \neq 0, \varepsilon > 0$  (右旋) 或  $\varepsilon < 0$  (左旋), (3)式即其表达式。由(3)式可见此时两个圆分量半径不同,且二者之间还差一个相位。以 $\theta = \pi/4$  的情形为例,依(3)式画出的斜椭圆光的轨迹如图1所示。

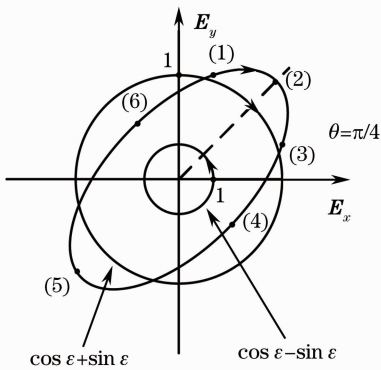


图1 依(3)式画出的 $\theta = \pi/4$ 的右旋斜椭圆光的轨迹图

Fig.1 Moving locus of right-handed obliquely polarized light with  $\theta = \pi/4$  according to eq. (3)

图1中左旋圆基矢与 $x$ 轴交点的圆点及右旋圆基矢别与 $y$ 轴交点的圆点(分别标注“1”之处)是运动的起始点,箭头表示光矢各分量及最终合成光矢端点的运动方向,数字表示数据采样顺序。

## 2.2 用圆基矢与光矢 $x, y$ 分量振幅及二者之间相位差表征偏振光

此情形下(2)式变形为

$$\begin{bmatrix} E_l \\ E_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & j \\ 1 & -j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{x_0} \\ E_{y_0} \exp(j\delta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{x_0} + jE_{y_0} \exp(j\delta) \\ E_{x_0} - jE_{y_0} \exp(j\delta) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中 $E_{x_0}$ 与 $E_{y_0}$ 分别是光矢 $x, y$ 分量的振幅, $\delta$ 是 $y$ 分量

相对 $x$ 分量的相位差。令 $A = \sqrt{E_{x_0}^2 + [E_{y_0} \exp(j\delta)]^2}$ , 有 $E_{x_0}/A = \cos \Delta$ 与 $E_{y_0} \exp(j\delta)/A = \sin \Delta$ 及 $\Delta = \arctan[E_{y_0} \exp(j\delta)/E_{x_0}]$ 。于是(8)式可改写为

$$\begin{bmatrix} E_l \\ E_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \Delta + j \cos \Delta \\ \sin \Delta - j \cos \Delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \exp(j\Delta) \\ \exp(-j\Delta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \exp(-j2\Delta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 |_{\omega t} \\ 1 |_{\omega t - 2\Delta} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

(9)式即用圆基矢与光矢 $x, y$ 分量振幅及二者之间相位差表征偏振光的基本公式,其物理含义为:两个圆基矢的振幅均为1;且分别沿规定的旋向相反的方向旋转;其中右旋圆矢起始的角度比左旋基矢少 $2\Delta$ 。应注意一般情形下 $\Delta$ 是复函数。

下面用(9)式分别处理各种偏振态的光矢轨迹问题。

### 1) 沿任意角 $\theta$ 方向振动的线偏振光

此时有 $\delta = 0, E_{x_0} \neq E_{y_0}, \Delta = \arctan(E_{y_0}/E_{x_0}) = \theta$ 。将上述条件代入(9)式有:

$$\begin{bmatrix} E_l \\ E_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 |_{\omega t} \\ 1 |_{\omega t - 2\Delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 |_{\omega t} \\ 1 |_{\omega t - 2\theta} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

该结果与2.1节中得到的(4)式完全相同。

### 2) 左、右旋正椭圆光

此时有 $\delta = \pm \pi/2$ 及 $\Delta = \arctan(\pm jE_{y_0}/E_{x_0})$ 。光矢变换(8)式变为

$$\begin{bmatrix} E_l \\ E_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_x + jE_y \\ E_x - jE_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{x_0} \mp E_{y_0} \\ E_{x_0} \pm E_{y_0} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

式中若 $E_l < E_r$ 为右旋正椭圆光,反之则为左旋正椭圆光。

### 3) 圆光

当 $E_{x_0} = E_{y_0}$ 时,由(11)式可知有 $E_l = 0$ 及 $E_r = 0$ 两种情形,它们分别对应右旋圆光与左旋圆光。

### 4) 左、右旋斜椭圆光

此时有 $\delta \neq 0, \pm \pi/2, \pm \pi, \pm 3\pi/2, \Delta = \arctan[E_{y_0} \exp(j\delta)/E_{x_0}]$ 。因此(9)式就是用圆基矢描述左、右旋斜椭圆的公式。为使其物理含义更清晰,将其改写为

$$\begin{bmatrix} E_l \\ E_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \exp[-j2\Delta(\delta)] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 |_{\omega t} \\ 1 |_{\omega t - 2\Delta(\delta)} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

应指出的是,虽然(12)式与描述斜线偏振的(10)式具有类似的形式,但在(10)式所描述的线偏振情形中因 $\delta = 0$ 而使得 $\Delta$ 与 $\delta$ 无关;反之在描述斜椭圆偏振的(12)式中 $\Delta$ 是随 $\delta$ 不同而改变的复杂的复函数。此情形下,难以直接利用(12)式推断可能的轨迹图形。解决这个问题的办法是将(8)式改写成两个列矢之和的形式,即

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{x_0} + jE_{y_0} \exp(j\delta) \\ E_{x_0} - jE_{y_0} \exp(j\delta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{x_0} \\ E_{x_0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_{y_0} |_{\omega t + \delta + \pi/2} \\ E_{y_0} |_{\omega t + \delta - \pi/2} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

然后利用两个列矢分别做出椭圆,最后将两个椭圆相位相同的点按照矢量叠加方法叠加在一起形成最终的椭圆轨迹,可将称其为“列矢分解叠加法”。

### 3 用椭圆基矢表征偏振光

#### 3.1 用椭圆基矢与方位角及椭率角表征偏振光

将二椭圆基矢分别设为  $\boldsymbol{\varepsilon}_\mu = \begin{bmatrix} a \\ jb \end{bmatrix}$  (右旋正椭圆

基矢)与  $\boldsymbol{\varepsilon}_\nu = \begin{bmatrix} jb \\ a \end{bmatrix}$  (左旋正椭圆基矢)。二者之间的

正交性由  $\boldsymbol{\varepsilon}_\mu * \boldsymbol{\varepsilon}_\nu = 0$  保证,式中  $*$  表示厄米运算。由这两个椭圆基矢的定义式可知,左旋椭圆基矢比右旋椭圆基矢相位超前  $\pi/2$ 。因此,在两个分量椭圆之间无额外附加相位差的情形下,在做图时右旋椭圆应自  $x$  轴开始旋转,而左旋椭圆从  $y$  轴开始旋转。为后续做图方便,假定有  $a/b=2$ 。依对椭圆基矢的上述定义式得出的自笛卡儿坐标系向椭圆基矢坐标系的变换关系为

$$\begin{bmatrix} E_\mu \\ E_\nu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & -jb \\ -jb & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}. \quad (14)$$

将用方位角及椭率角表示的光矢(1)式代入(14)式得到

$$\begin{bmatrix} E_\mu \\ E_\nu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos(\phi - \varepsilon) - j \sin \theta \sin(\phi + \varepsilon) \\ \sin \theta \cos(\phi + \varepsilon) - j \cos \theta \sin(\phi - \varepsilon) \end{bmatrix}, \quad (15)$$

式中  $\phi = \arctan(b/a)$  为椭圆基矢的椭率角,且在推导过程中略去了  $A_0 = \sqrt{a^2 + b^2}$ 。

(15)式中各分量的大小表示其长/短轴长度与椭圆基矢长/短轴长度之比。分量椭圆的椭率与基矢椭率相同,各分量的初相位则决定了各分矢量端点开始沿分量椭圆运动的起始点。(15)式就是用椭圆基矢与几何参量表征所有可能存在的偏振光的基本公式。若已知待表达的椭圆光的方位角  $\theta$ 、椭率角  $\varepsilon$  与椭圆基矢的椭率角  $\phi$ ,就可用(15)式做出光矢端点运动轨迹图。下面利用(15)式导出几种典型情形下光矢的基本表达式。

##### 3.1.1 线偏振光

此时有  $\varepsilon=0$ 。将其代入(15)式有

$$\begin{bmatrix} E_\mu \\ E_\nu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \phi - j \sin \theta \sin \phi \\ \sin \theta \cos \phi - j \cos \theta \sin \phi \end{bmatrix}, \quad (16)$$

令

$$A_1 = \sqrt{(\cos \theta \cos \phi)^2 + (\sin \theta \sin \phi)^2}, \quad (17)$$

则有

$$\cos \Delta_1 = \cos \theta \cos \phi / A_1, \quad (18)$$

$$\sin \Delta_1 = \sin \theta \sin \phi / A_1, \quad (19)$$

$$\Delta_1 = \arctan(\tan \theta \tan \phi), \quad (20)$$

令

$$A_2 = \sqrt{(\sin \theta \cos \phi)^2 + (\cos \theta \sin \phi)^2}, \quad (21)$$

则有

$$\cos \Delta_2 = \sin \theta \cos \phi / A_2, \quad (22)$$

$$\sin \Delta_2 = \cos \theta \sin \phi / A_2, \quad (23)$$

$$\Delta_2 = \arctan(\cot \theta \tan \phi), \quad (24)$$

则(16)式可改写为

$$\begin{bmatrix} E_\mu \\ E_\nu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 (\cos \Delta_1 - j \sin \Delta_1) \\ A_2 (\cos \Delta_2 - j \sin \Delta_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 |_{\omega t} \\ A_2/A_1 |_{\omega t - (\Delta_2 - \Delta_1)} \end{bmatrix}, \quad (25)$$

(25)式就是用椭圆基矢描述线偏振光的一般性公式。下面开列出利用各种典型线偏振光的特点及由(17)~(25)式得到的与其相应的公式。

1) 沿  $x$  方向的线偏振光

此时有  $\theta=0$ 。将其代入(17)~(25)式得

$$\begin{bmatrix} E_\mu \\ E_\nu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 |_{\omega t} \\ b/a |_{\omega t - (\Delta_2 - \Delta_1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 |_{\omega t} \\ b/a |_{\omega t - \pi/2} \end{bmatrix}, \quad (26)$$

由前定义已知左旋椭圆基矢比右旋椭圆基矢相位超前  $\pi/2$ 。但在(26)式中左旋椭圆分量比右旋椭圆分量相位还滞后  $\pi/2$ ,总体结果是两个分量同相位。故在用(26)式做图时两个分量均应自  $x$  轴开始向各自规定的旋转方向沿各自的椭圆轨道运转。依(26)式得到的光矢轨迹图如图2所示。

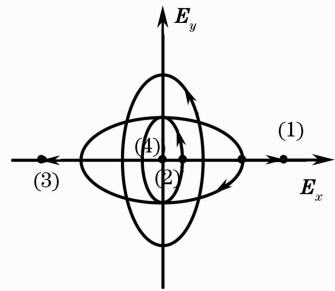


图2 依(26)式画出的沿  $x$  方向的线偏振光轨迹图  
Fig.2 Moving locus of linearly polarized light along  $x$ -direction according to eq. (26)

2) 沿  $y$  方向振动的线偏振光

此时有  $\theta = \pi/2$ 。将其代入(17)~(25)式得

$$\begin{bmatrix} E_\mu \\ E_\nu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 |_{\omega t} \\ b/a |_{\omega t - (\Delta_2 - \Delta_1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 |_{\omega t} \\ b/a |_{\omega t + \pi/2} \end{bmatrix}, \quad (27)$$

依(27)式得到的光矢轨迹图如图 3 所示。

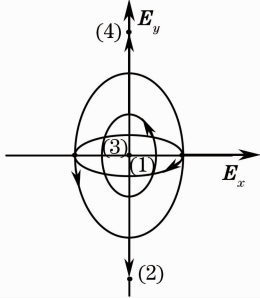


图 3 依(27)式画出的沿  $y$  方向的线偏振光轨迹图

Fig. 3 Moving locus of linearly polarized light along  $y$ -direction according to eq. (27)

3) 沿  $\theta = \pi/4$  方向振动的线偏振光

将  $\theta = \pi/4$  代入(17)~(25)式得

$$\begin{bmatrix} E_\mu \\ E_\nu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 |_{\omega t} \\ 1 |_{\omega t - (\Delta_2 - \Delta_1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 |_{\omega t} \\ 1 |_{\omega t} \end{bmatrix}, \quad (28)$$

依(28)式得到的光矢轨迹图如图 4 所示。

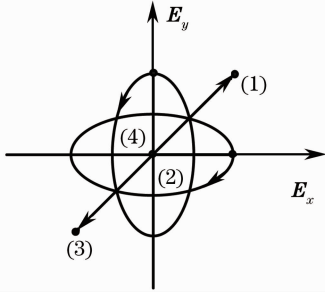


图 4 依(28)式画出的沿  $\theta = \pi/4$  方向振动的线偏振光轨迹图

Fig. 4 Moving locus of linearly polarized light along  $\theta = \pi/4$  direction according to eq. (28)

4) 沿任意方位角  $\theta$  方向振动的线偏振光

此时即为(25)式表达的一般性情形。由于在此情形下由(17)~(24)式得到的均为一般性的数值，直接合成椭圆轨迹时要求精细操作，实际上不具有可行性。此时可采用列矢分解叠加法处理此问题。在此以  $\theta = \pi/6$  的情形为例，具体的处理过程如下。

将(25)式改写为

$$\begin{bmatrix} E_\mu \\ E_\nu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \cos \Delta_1 \\ -jA_2 \sin \Delta_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -jA_1 \sin \Delta_1 \\ A_2 \cos \Delta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \tan \phi |_{-\pi/2} \end{bmatrix} + \tan \theta \begin{bmatrix} \tan \phi |_{-\pi/2} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (29)$$

因  $a/b = 2$ , 故  $\tan \phi = 1/2$ , 取  $\theta = \pi/6$ , 则  $\tan \theta = \sqrt{3}/3$ , 于是(29)式变成

$$\begin{bmatrix} E_\mu \\ E_\nu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1/2 |_{-\pi/2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sqrt{3}/6 |_{-\pi/2} \\ \sqrt{3}/3 \end{bmatrix}. \quad (30)$$

做光矢轨迹图时先依等号右边第一、二项画出两个椭圆，再依次将两个椭圆相位对应的点按照平行四边形法则形成最终的矢量运行轨迹。依(30)式得到的光矢轨迹图如图 5 所示。

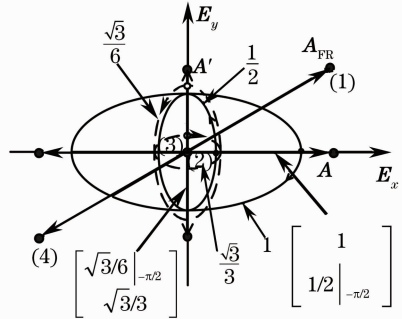


图 5 依(30)式画出的沿  $\theta = \pi/6$  方向振动的线偏振光轨迹图

Fig. 5 Moving locus of linearly polarized light along  $\theta = \pi/6$  direction according to eq. (30)

(30)式中的第一项合成图 5 中的矢量  $A$ , 第二项合成矢量  $A'$ , 二者再合成最终矢量  $A_{FR}$ 。

3.1.2 左、右旋正椭圆光

对于长轴沿  $x$  方向的正椭圆光有  $\theta = 0, \epsilon \neq 0, \epsilon > 0$  时右旋,  $\epsilon < 0$  时左旋。将上述条件代入(15)式得到

$$\begin{bmatrix} E_\mu \\ E_\nu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\phi - \epsilon) \\ -j \sin(\phi - \epsilon) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\phi - \epsilon) |_{\omega t} \\ \sin(\phi - \epsilon) |_{\omega t - \pi/2} \end{bmatrix}, \quad (31)$$

依(31)式得到的光矢轨迹图如图 6 所示。

对于长轴沿  $y$  方向的正椭圆光有  $\theta = \pi/2, \epsilon \neq 0$ 。将上述条件代入(15)式有

$$\begin{bmatrix} E_\mu \\ E_\nu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j \sin(\phi + \epsilon) \\ \cos(\phi + \epsilon) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\phi + \epsilon) |_{\omega t} \\ \cos(\phi + \epsilon) |_{\omega t + \pi/2} \end{bmatrix}, \quad (32)$$

依(32)式即可得到长轴沿  $y$  方向的正椭圆光矢轨迹图。

3.1.3 圆光

对于圆光而言  $\theta$  无定义, 此时(15)式中关于  $\theta$  的正、余弦函数已没有意义。不再能用(15)式来讨论用其对圆光的表达问题。但对于圆光而言有  $\epsilon = \pm \pi/4$  且基矢椭圆率角  $\phi$  为已知这两个条件可以利用。

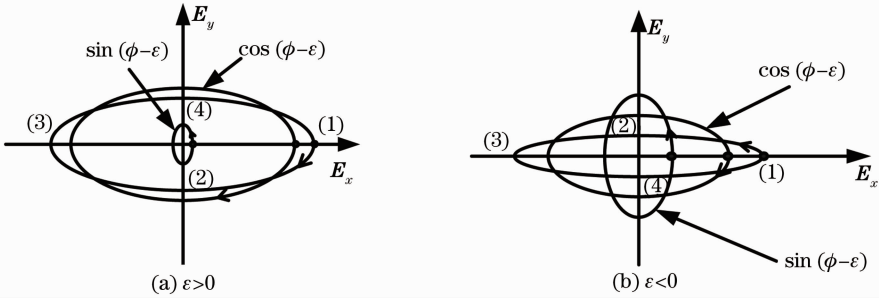


图 6 依(31)式画出的长轴沿  $x$  方向正椭圆偏振光轨迹图。(a)右旋；(b)左旋

Fig. 6 Moving locus of normal-elliptically polarized light with its long axis along  $x$ -direction according to eq. (31).

(a) Right-handed; (b) left-handed

将  $\varepsilon = \pm \pi/4$  代入(32)式得到

$$\begin{bmatrix} E_\mu \\ E_\nu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\phi \pm \pi/4) |_{\omega t} \\ \cos(\phi \pm \pi/4) |_{\omega t + \pi/2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 |_{\omega t} \\ \cot(\phi \pm \pi/4) |_{\omega t + \pi/2} \end{bmatrix}, \quad (33)$$

依(33)式得到的光矢轨迹图如图 7 所示。

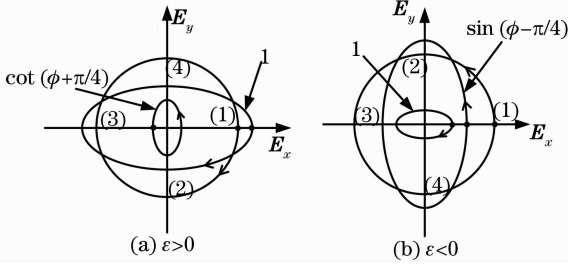


图 7 依(33)式画出的圆偏振光轨迹图。(a)右旋；(b)左旋

Fig. 7 Moving locus of circularly polarized light according to eq. (33). (a) Right-handed; (b) left-handed

### 3.1.4 左、右旋斜椭圆光

对于左、右旋斜椭圆光而言，有  $\theta \neq k\pi$  且  $\theta \neq (2k+1)\pi/2$ ,  $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ , 且  $\varepsilon \neq 0$ 。因此(15)式就是其一般表达式。(15)式中的两个元素仍然是复数，需用列矢分解叠加法处理此问题。以  $\theta = \pi/3$  的右旋斜椭圆光为例。为简化计算，假定  $\phi = \varepsilon = \pi/3$ ，则(15)式成为

$$\begin{bmatrix} E_\mu \\ E_\nu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos(\phi - \varepsilon) \\ \cos \theta \sin(\phi - \varepsilon) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sin \theta \sin(\phi + \varepsilon) \\ \sin \theta \cos(\phi + \varepsilon) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.75 |_{\omega t - \pi/2} \\ 0.433 |_{\omega t - \pi} \end{bmatrix}, \quad (34)$$

为做图方便令  $b/a = \tan(\pi/3) = \sqrt{3}$ 。所得光矢轨迹图如图 8 所示。

图中由(34)式的第一项的两个分量椭圆合成椭圆矢量  $\mathbf{A}$ ，第二项的两个分量椭圆合成椭圆矢量  $\mathbf{A}'$ ，二者再合成最终椭圆光矢量  $\mathbf{A}_{FR}$ 。

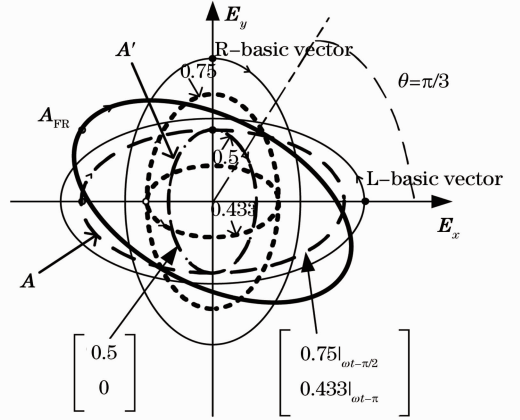


图 8 依(34)式画出的右旋斜椭圆光轨迹图

Fig. 8 Moving locus of right-handed incline-elliptically polarized light according to eq. (34)

## 3.2 用椭圆基矢与光矢 $x, y$ 分量振幅及二者之间相位差表征偏振光

继续沿用上节定义的椭圆基矢。将光矢变换到椭圆基矢坐标系得到

$$\begin{bmatrix} E_\mu \\ E_\nu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & -jb \\ -jb & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{x_0} \\ E_{y_0} \exp(j\delta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} aE_{x_0} - jbE_{y_0} \exp(j\delta) \\ -jbE_{x_0} + aE_{y_0} \exp(j\delta) \end{bmatrix}. \quad (35)$$

(35)式为在椭圆基矢坐标系下所有可能存在的偏振态的一般性表达式。下面利用(35)式讨论各种偏振光的表达问题。

### 3.2.1 线偏振光

此情形下有  $\delta = 0, E_x = E_{x_0}$  及  $E_y = E_{y_0}$ 。则(35)式可写成

$$\begin{bmatrix} E_\mu \\ E_\nu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} aE_{x_0} - jbE_{y_0} \exp(j\delta) \\ -jbE_{x_0} + aE_{y_0} \exp(j\delta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} aE_{x_0} - jbE_{y_0} \\ -jbE_{x_0} + aE_{y_0} \end{bmatrix}. \quad (36)$$

(36)式是椭圆基坐标系下所有可能存在的线偏振光的另一个一般表达式。

1) 沿  $x$  轴方向偏振的线偏振光

此时有  $E_{y_0} = 0$ , 代入(36)式得

$$\begin{bmatrix} E_\mu \\ E_\nu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} aE_{x_0} - jbE_{y_0} \\ -jbE_{x_0} + aE_{y_0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} aE_{x_0} \\ -jbE_{x_0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} aE_{x_0} |_{\omega t} \\ bE_{x_0} |_{\omega t - \pi/2} \end{bmatrix}. \quad (37)$$

依(37)式得到的光矢轨迹图如图 9 所示。

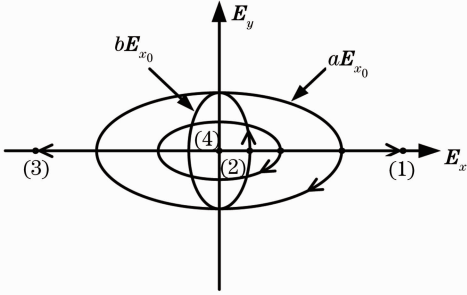


图 9 依(37)式画出的沿  $x$  方向线偏振光轨迹图

Fig. 9 Moving locus of linearly polarized light along  $x$ -direction according to eq. (37)

2) 沿  $y$  轴方向偏振的线偏振光

此时有  $E_{x_0} = 0$ , 代入(36)式得

$$\begin{bmatrix} E_\mu \\ E_\nu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -jbE_{y_0} \\ aE_{y_0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} bE_{y_0} |_{\omega t - \pi/2} \\ aE_{y_0} |_{\omega t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} bE_{y_0} |_{\omega t} \\ aE_{y_0} |_{\omega t + \pi/2} \end{bmatrix}. \quad (38)$$

依(38)式得到的光矢轨迹图如图 10 所示。

3) 与  $x$  轴夹角  $\pi/4$  的线偏振光

此时有  $E_{x_0} = E_{y_0}$ , 代入(36)式得

$$\begin{bmatrix} E_\mu \\ E_\nu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a - jb \\ a - jb \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha - j \sin \alpha \\ \cos \alpha - j \sin \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \exp(-j\alpha) \\ \exp(-j\alpha) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 |_{\omega t} \\ 1 |_{\omega t} \end{bmatrix}, \quad (39)$$

式中  $\alpha$  为与  $x$  轴的夹角,  $\alpha = \pi/4$ , 该结果与(28)式完全相同。

4) 与  $x$  轴夹角  $\theta$  的线偏振光

此时有  $E_{x_0} \neq E_{y_0}$ , 代入(36)式得

$$\begin{bmatrix} E_\mu \\ E_\nu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a - jb \tan \theta \\ a \tan \theta - jb \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_\mu (\cos \Delta_1 - j \sin \Delta_1) \\ A_\nu (\cos \Delta_2 - j \sin \Delta_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_\mu \exp(-j\Delta_1) \\ A_\nu \exp(-j\Delta_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_\mu \\ A_\nu \exp(-j\Delta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_\mu |_{\omega t} \\ A_\nu |_{\omega t - \Delta(\theta)} \end{bmatrix}, \quad (40)$$

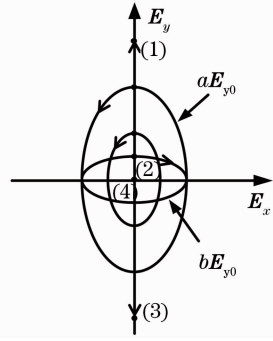


图 10 依(38)式画出的沿  $y$  方向线偏振光轨迹图

Fig. 10 Moving locus of linearly polarized light along  $y$ -direction according to eq. (38)

式中  $A_\mu = \sqrt{a^2 + b^2 \tan^2 \theta}$ ,  $A_\nu = \sqrt{a^2 \tan^2 \theta + b^2}$ ,  $\Delta_1 = \arctan(b \tan \theta / a)$ ,  $\Delta_2 = \arctan[b / (a \tan \theta)]$ ,  $\Delta = \Delta_2 - \Delta_1 = \arctan\left(\frac{b}{a \tan \theta}\right) - \arctan\left(\frac{b \tan \theta}{a}\right)$ 。

(40) 式表明两个椭圆基矢的振幅分别为  $A_\mu$  与  $A_\nu$ , 且二者之间具有  $\Delta = \Delta_2 - \Delta_1$  的相位差。比如, 取  $E_{x_0} = 1, a = 2, b = 1$  及  $\theta = \pi/3$ , 代入(40)式计算出的列矢表达式为

$$\begin{bmatrix} E_\mu \\ E_\nu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.65 |_{\omega t} \\ 3.61 |_{\omega t - 0.092\pi} \end{bmatrix}, \quad (41)$$

从(41)式中可见, 直接用(41)式做图时  $-0.092\pi$  的相位延迟点极难掌握。因此需采用列矢分解叠加法处理该问题。

### 3.2.2 左、右旋正椭圆光

此时有  $\delta = \pm \pi/2$ , 故可将光矢表示为

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{x_0} \\ E_{y_0} \exp(\pm j\pi/2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{x_0} \\ \pm jE_{y_0} \end{bmatrix}, \quad (42)$$

将(42)式代入(35)式得

$$\begin{bmatrix} E_\mu \\ E_\nu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} aE_{x_0} \pm bE_{y_0} \\ -jbE_{x_0} \pm jaE_{y_0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (aE_{x_0} \pm bE_{y_0}) |_{\omega t} \\ (bE_{x_0} \mp aE_{y_0}) |_{\omega t - \pi/2} \end{bmatrix}, \quad (43)$$

由(43)式知左、右旋正椭圆偏振光在椭圆基坐标系下表达式中两个分量大小不等且左旋椭圆分量比右旋椭圆分量相位滞后  $\pi/2$ 。

1) 当满足条件  $bE_{x_0} \mp aE_{y_0} = 0$  时光矢轨迹为与右旋椭圆基矢椭圆具有相同椭率, 但其大小是其  $(aE_{x_0} \pm bE_{y_0})$  倍的右旋正椭圆, 如图 11 所示; 当满足条件  $aE_{x_0} \pm bE_{y_0} = 0$  时光矢轨迹为与左旋椭圆基矢椭圆具有相同椭率, 但其大小是其  $(bE_{x_0} \mp aE_{y_0})$  倍的左旋正椭圆, 如图 12 所示。

2) 不满足上述两个条件的一般情形, 为椭率与椭圆基矢的椭率不相同的椭圆。其光矢运动轨迹由

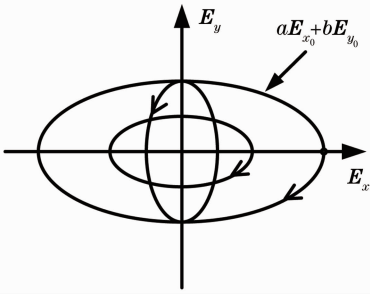


图 11  $bE_{x_0} \mp aE_{y_0} = 0$  时的光矢轨迹

Fig. 11 Locus of the optical vector when  $bE_{x_0} \mp aE_{y_0} = 0$

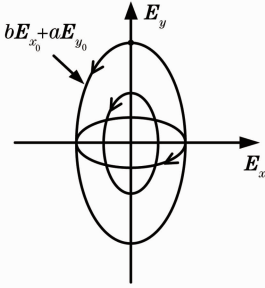


图 12  $aE_{x_0} \pm bE_{y_0} = 0$  时的光矢轨迹

Fig. 12 Locus of the optical vector when  $aE_{x_0} \pm bE_{y_0} = 0$

(35)式描述。令  $a = 2, b = 1, E_{x_0} = 3$  及  $E_{y_0} = 2$ , 将上述数值代入(35)式, 对于右旋正椭圆情形有

$$\begin{bmatrix} E_{\mu} \\ E_{\nu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (aE_{x_0} + bE_{y_0}) |_{\omega t} \\ (bE_{x_0} - aE_{y_0}) |_{\omega t - \pi/2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8 |_{\omega t} \\ -1 |_{\omega t - \pi/2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8 |_{\omega t} \\ 1 |_{\omega t + \pi/2} \end{bmatrix}. \quad (44)$$

依(44)式所得光矢轨迹如图 13 所示。

将  $a = 1, b = 1, E_{x_0} = 3$  及  $E_{y_0} = 2$  代入(35)式, 对于左旋正椭圆情形, 有

$$\begin{bmatrix} E_{\mu} \\ E_{\nu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (aE_{x_0} - bE_{y_0}) |_{\omega t} \\ (bE_{x_0} + aE_{y_0}) |_{\omega t - \pi/2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 |_{\omega t} \\ 7 |_{\omega t - \pi/2} \end{bmatrix}, \quad (45)$$

依(45)式所得光矢轨迹如图 14 所示。

### 3.2.3 左、右旋圆光

此时有  $\delta = \pm \pi/2, E_{x_0} = E_{y_0}$ , 将该条件代入(35)式有

$$\begin{bmatrix} E_{\mu} \\ E_{\nu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{\mu} (\cos \Delta_{\mu} \pm \sin \Delta_{\mu}) \\ A_{\nu} (\cos \Delta_{\nu} \mp \sin \Delta_{\nu}) \exp(\pm j\pi/2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{\mu} (\cos \Delta_{\mu} \pm \sin \Delta_{\mu}) |_{\omega t} \\ A_{\nu} (\cos \Delta_{\nu} \mp \sin \Delta_{\nu}) |_{\omega t \pm \pi/2} \end{bmatrix}, \quad (46)$$

式中  $A_{\mu} = \sqrt{(aE_{x_0})^2 + (bE_{y_0})^2}, \tan \Delta_{\mu} = bE_{y_0} / (aE_{x_0}), A_{\nu} = \sqrt{(aE_{y_0})^2 + (bE_{x_0})^2}, \tan \Delta_{\nu} =$

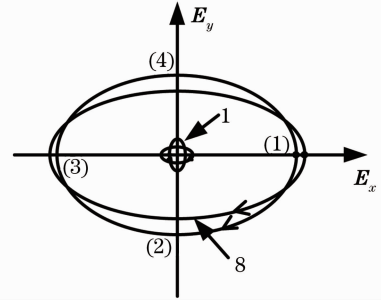


图 13 依(44)式画出的椭圆度与椭圆基矢的椭圆度不相同的右旋正椭圆光轨迹图

Fig. 13 Moving locus of right-handed normal-elliptically polarized light with different ellipticity from that of the basic vector according to eq. (44)

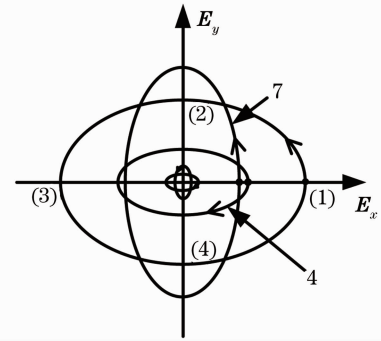


图 14 依(45)式画出的椭圆度与椭圆基矢的椭圆度不相同的左旋正椭圆光轨迹图

Fig. 14 Moving locus of left-handed normal-elliptically polarized light with different ellipticity from that of the basic vector according to eq. (45)

$bE_{x_0} / (aE_{y_0})$ 。

(46)式就是椭圆基矢坐标系下左、右旋圆光的一般表达式。该公式表明, 在椭圆基矢坐标系下左、右旋圆光的两个分量具有不同的振幅, 且二者之间存在  $\delta = \pm \pi/2$  的相位差。假定  $a/b = 2$ , 令  $a = 2, b = 1$  及  $E_{x_0} = E_{y_0} = 1$ 。对于右旋圆光有  $\delta = \pi/2$ , 于是(46)式为

$$\begin{bmatrix} E_{\mu} \\ E_{\nu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{\mu} (\cos \Delta_{\mu} + \sin \Delta_{\mu}) |_{\omega t} \\ A_{\nu} (\cos \Delta_{\nu} - \sin \Delta_{\nu}) |_{\omega t + \pi/2} \end{bmatrix}, \quad (47)$$

将  $a/b = 2$  及  $E_{x_0} = E_{y_0} = 1$  代入  $A$  与正弦、余弦函数的定义式得到各自数值后代入(47)式有

$$\begin{bmatrix} E_{\mu} \\ E_{\nu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{5}(2/\sqrt{5} + 1/\sqrt{5}) |_{\omega t} \\ \sqrt{5}(2/\sqrt{5} - 1/\sqrt{5}) |_{\omega t + \pi/2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 |_{\omega t} \\ 1 |_{\omega t + \pi/2} \end{bmatrix}. \quad (48)$$

依(48)式画出的光矢轨迹图如图 15 所示。

对于左旋圆光有  $\delta = -\pi/2$ , 则(46)式成为

$$\begin{bmatrix} E_{\mu} \\ E_{\nu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{\mu} (\cos \Delta_{\mu} - \sin \Delta_{\mu}) |_{\omega t} \\ A_{\nu} (\cos \Delta_{\nu} + \sin \Delta_{\nu}) |_{\omega t - \pi/2} \end{bmatrix}, \quad (49)$$



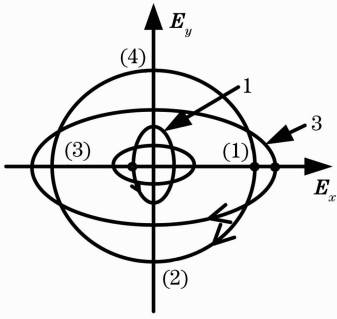


图 15 依(48)式画出的右旋圆光轨迹图

Fig. 15 Moving locus of right-handed circularly polarized light according to eq. (48)

将前面算得的振幅与三角函数值代入(49)式得

$$\begin{bmatrix} E_\mu \\ E_\nu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{5}(2/\sqrt{5} - 1/\sqrt{5}) |_{\omega t} \\ \sqrt{5}(2/\sqrt{5} + 1/\sqrt{5}) |_{\omega t - \pi/2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 |_{\omega t} \\ 3 |_{\omega t - \pi/2} \end{bmatrix}. \quad (50)$$

依(50)式画出的光矢轨迹图如图 16 所示。

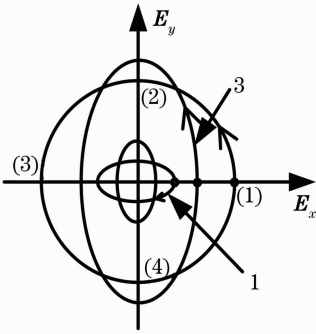


图 16 依(50)式画出的左旋圆光轨迹图

Fig. 16 Moving locus of left-handed circularly polarized light according to eq. (50)

### 3.2.4 左、右旋斜椭圆光的情形

注意到此情形下  $\delta$  不取特殊值。此时(35)式可改写成

$$\begin{bmatrix} E_\mu \\ E_\nu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_\mu (\cos \Delta_\mu - j \sin \Delta_\mu) \\ -j A_\nu (\cos \Delta_\nu + j \sin \Delta_\nu) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_\mu |_{\omega t} \\ A_\nu |_{\omega t + \Delta_\nu + \Delta_\mu - \pi/2} \end{bmatrix}, \quad (51)$$

式中

$$\begin{aligned} A_\mu &= \sqrt{(aE_{x_0})^2 + [bE_{y_0} \exp(j\delta)]^2}, \\ \tan \Delta_\mu &= bE_{y_0} \exp(j\delta) / (aE_{x_0}), \\ A_\nu &= \sqrt{[aE_{y_0} \exp(j\delta)]^2 + (bE_{x_0})^2}, \\ \tan \Delta_\nu &= aE_{y_0} \exp(j\delta) / (bE_{x_0}). \end{aligned}$$

(51)式为椭圆基矢坐标系下斜椭圆光矢轨迹的一般表达式。它表明在此情形下斜椭圆光的两个分量具

有不相等的振幅,且二者之间相位不同。因(51)式中两分量之间的相位差表达式  $\Delta_{\mu,\nu} = \Delta_\nu + \Delta_\mu - \pi/2$  为复函数,此情形需采用列矢分解叠加法处理。

从本节的讨论中可知,当处理圆偏振光,特别是椭圆偏振光的光矢轨迹做图的问题时,采用本节提出的方法要比在直角坐标系中用 e 指数表示相位的方法简便得多。

## 4 结 论

圆基矢或椭圆基矢是表征光学偏振态的重要手段。基于偏振光学理论与琼斯矩阵算法,导出了采用圆基矢与椭圆基矢表述各种偏振光的两套基本公式,提出了用光矢的两个元素同时表示四个物理参数的方法及依导出公式画出光矢顶端运动轨迹图时可能采用的列矢分解叠加做图法,并利用一些典型偏振态的例子评估了所提出方法的可行性。结果表明导出的理论结果正确,提出的方法可行。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Zhengping, Shi Jinhui, Ruan Shunling. Designs of infrared non-polarizing beam splitters [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2006, **39**(2): 394~399
- 2 Wang Zhengping, Liu Xiaoyu, Zhang Yimin. Theoretical analysis of the effects of linear birefringence upon optical glass current transformers with different optical designs [J]. *Measurement*, 2007, **40**(9-10): 811~815
- 3 Zhang Rongjun, Lu Weijie, Cai Qingyuan *et al.*. Study on ellipsometric spectra of Silicon nanocrystals [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 1891~1894  
张荣君, 陆卫杰, 蔡清元 等. 硅纳米晶的椭圆光谱研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 1891~1894
- 4 Jiang Nuan, Li Zhizhong, Yang Huayong *et al.*. Birefringence analysis of polarization maintaining fiber and research on characteristic of all-fiber beat-length experimental systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(7): 0706003  
姜 暖, 李智忠, 杨华勇 等. 保偏光纤双折射分析及全光纤拍长测试方法比对研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(7): 0706003
- 5 Guo Chucai, Ye Weimin, Yuan Xiaodong *et al.*. Research on sub-wavelength grating polarizing beam splitter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2690~2695  
郭楚才, 叶卫民, 袁晓东 等. 亚波长光栅偏振分束器的研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2690~2695
- 6 S. A. Maier. *Plasmonics: Fundamentals and Applications* [M]. New York: Springer Science+Business Media LLC, 2007
- 7 Zhang Juan, Yu Shuai, Guo Sen *et al.*. Design of flat-top polarization filters based on one-dimensional photonic crystal theory[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0105005  
张 娟, 于 帅, 郭 森 等. 基于一维光子晶体理论的平顶偏振滤波器设计[J]. *中国激光*, 2011, **38**(1): 0105005
- 8 Gu Peifu, Chen Haixing, Qin Xiaoyun *et al.*. Design of polarization band-pass filters based on the theory of thin-film photonic crystal superlattice [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(2): 773~776  
顾培夫, 陈海星, 秦小芸 等. 基于薄膜光子晶体超晶格理论的偏振带通滤波器[J]. *物理学报*, 2005, **54**(2): 773~776
- 9 N. I. Zheludev, E. Plum, V. A. Fedotov. *Metamaterial*

- polarization spectral filter; isolated transmission line at any prescribed wavelength [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, **99**(17): 171915
- 10 J. H. Shi, H. F. Ma, W. X. Jiang *et al.*. Multiband stereometamaterial-based polarization spectral filter [J]. *Phys. Rev. B*, 2012, **86**(3): 035103
- 11 M. Born, E. Wolf. Principles of Optics [M]. 7th ed Cambridge: Cambridge University Press, 1999
- 12 R. M. A. Azzam, N. M. Bashara. Ellipsoetry and Polarized Light [M]. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1977
- 13 P. S. Theocaris, E. E. Gdoutos. Matrix Theory of Photoelasticity [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1979
- 14 Liao Yanbiao. Polarization Optics [M]. Beijing: Science Press, 2003
- 廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003
- 15 R. C. Jones. A new calculus for the treatment of optical systems: I; II; III [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1941, **31**(7): 500~503

栏目编辑: 张 腾