

关于部分偏振光能量传递和偏振态的光线椭圆分析方法*

刘超¹⁾ 岑兆丰^{1)†} 李晓彤¹⁾ 许伟才²⁾ 尚红波²⁾ 能芬¹⁾ 陈立¹⁾

1)(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

2)(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 长春 130033)

(2011年9月7日收到; 2011年11月23日收到修改稿)

部分偏振光传播时的光强和偏振态变化情况比较复杂, 尤其是当大数值孔径成像时, 光束的偏振态还会影响成像质量. 本文提出一种用于分析部分偏振光能量传递和偏振态的光线椭圆方法, 采用光线椭圆叠加的办法来分析光束在各向同性的均匀介质中传输时能量和偏振态的变化情况, 同时直观性好, 计算量小. 论文最后, 对大数值孔径、高像质的齐明透镜系统讨论了入射无偏振光的能量、偏振态变化, 以及偏振效应问题. 结果表明, 大数值孔径使成像光束中 TM 偏振光强度相对增加, 影响成像对比度; 提高像方介质的折射率, 会改善此种偏振效应问题.

关键词: 部分偏振光, 大数值孔径, 能量, 偏振效应

PACS: 42.15.-i, 42.15.Dp, 42.15.Eq, 42.25.Ja

1 引言

在光学设计与仿真中, 分析入射光的能量传递是一个基本需求, 而不同偏振态的光的能量的计算方法是不一样的. 某一时刻, 完全偏振光的振动方向和振幅唯一, 其能量计算相对简单. 而无偏振光和部分偏振光, 在振动面(垂直于光传播方向的平面)内的任意方向都存在振动. 无偏振光各个方向的振幅相等, 部分偏振光各个方向的振幅不全相等, 它们的能量计算相对复杂. 在一些具有很高像质要求的光学系统中, 提高物镜的数值孔径可以满足对高分辨率的需求^[1,2]. 但是随着数值孔径的不断增大, 基于偏振性的矢量衍射效应对像质的影响会越来越明显, 特别是当数值孔径大于 0.5 以后, 偏振效应问题变得突出, 严重影响成像质量^[3]. 因此在很多系统中, 偏振成像控制已成为光学界越来越重视的研究方向^[4-10].

现有的光偏振态分析方法主要有三种, Jones 矢量法、Stokes 矢量法和几何表示法. Jones 矢量

法不能描述部分偏振光; Stokes 矢量法是最常用到的方法, 它可以从解析式上描述部分偏振光, 但是缺乏直观性, 而且 Stokes 矢量有 4 个参数, 表征光学面型的 Mueller 矩阵更是有 16 个参数, 计算量较大^[11]; 几何表示法虽然直观, 但是需要将光的偏振态分成无偏振和完全偏振分别处理.

在以前的研究中, 我们提出用线偏振光来描述部分偏振光的方法^[12]. 部分偏振光在其振动面内任意方向都存在振动, 每个振动可以看成一束线偏振光, 那么, 部分偏振光便是无数束线偏振光的组合. 因此, 在振动面内对振动沿圆周均匀间隔取样, 每个振动代表一束线偏振光. 如果取样数 N 足够大, 这些取样线偏振光的组合效果可以代替部分偏振光. 例如, 如图 1(a) 所示, 取样数 $N = 60$, 无偏振光看成 60 束线偏振光的组合. 无偏振光经某个光学系统到达像面时的能量和偏振态, 可以看成这 60 束线偏振光到达像面时的能量的平均和偏振态的组合, 如图 1(b) 所示.

图 1(b) 中, 椭圆中心和轮廓的 60 条连线, 与取样的 60 束线偏振光对应. 连线的长度代表光束的

* 国家自然科学基金(批准号: 10875105, 60977010)、航空科学基金(批准号: 20090176001)和应用光学国家重点实验室开发基金(批准号: Y1Q03FQK09)资助的课题.

† E-mail: cenzf@zju.edu.cn

能量大小, 长度都小于 1, 表示线偏振光经过光学系统后能量有损失. 对于出射光来说, 其能量值就是 60 束出射线偏振光能量的平均值, 其偏振态就是 60 束出射线偏振光偏振态的组合. 从图 1(b) 中可以看出, 此时光束变为部分偏振光. 此方法能够直观而准确地描述部分偏振光的能量和偏振态, 但是需要较大的取样数才能满足较高的精度, 因此存在计算量大的缺点.

基于几何光学原理, 本文建立了一种新的分析部分偏振光能量和偏振态的方法, 引入光线椭圆来描述部分偏振光的能量和偏振态, 并采用光线椭圆叠加的办法来分析光束在经各向同性的均匀介质界面时的能量和偏振态的变化情况, 在保持很好的直观性的同时, 计算量大大减小.

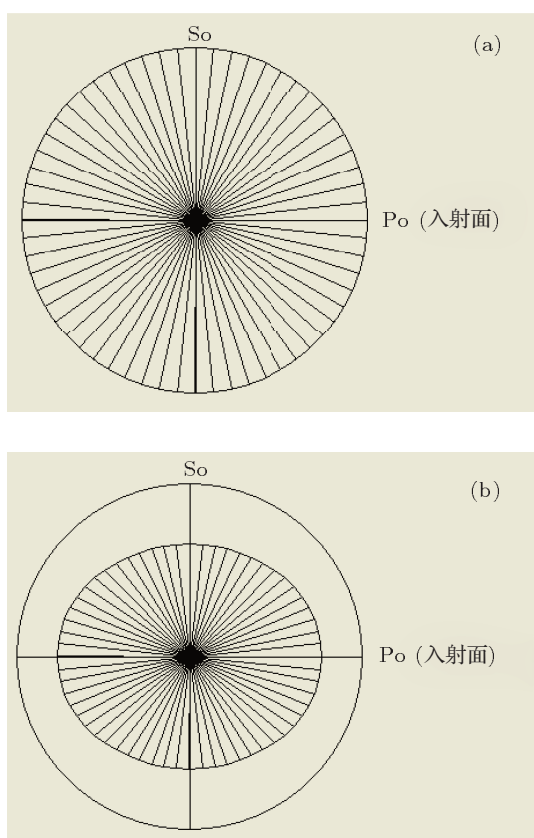


图 1 这里 P_o - S_o 轴表示的平面是垂直于传播方向的光振动面, P_o 轴位于入射面内, S_o 轴垂直于入射面 (a) 无偏振光看成 60 束线偏振光的组合; (b) 入射光到达像面时的能量和偏振态分布

2 部分偏振光的能量和偏振态用光线椭圆来表示

2.1 引入光线椭圆

通过对大量光学系统设置不同的初始条件的

仿真结果分析发现, 无偏振光经光学表面后的偏振态轮廓近似一个椭圆, 如图 1(b) 中所示. 因此, 光束的能量和偏振态分布可以用一个椭圆来近似地描述. 椭圆上的点到椭圆圆心的连线的长度平均值表示光束的能量, 椭圆的长短轴及倾角反映光束的偏振态的分布. 这个椭圆我们称之为光线椭圆. 该椭圆由半长轴 a 、半短轴 b 和长轴的方向唯一确定, 从而得到此光束的能量和偏振态分布.

2.2 采用光线椭圆叠加的办法来描述部分偏振光的能量和偏振态的变化情况

在图 2 中, 以光束在各向同性均匀介质表面反射的情况为例, 长轴沿 o - y_1 方向的近似椭圆 (非标准椭圆, 但形状类似椭圆) 表示光学界面的反射率随光束振动方位角 α 的分布, 记为近似椭圆 1. 另一个长轴倾斜的椭圆是表示入射光的能量和偏振态的光线椭圆, 记为椭圆 2. 一般情况下, 近似椭圆 1 的长轴和椭圆 2 的长轴存在一定夹角 β , 而且夹角 β 可以通过光线追迹计算得到.

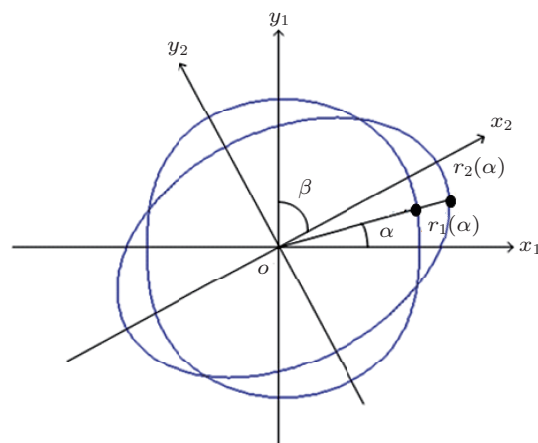


图 2 两近似椭圆叠加. o - x_1 轴位于入射面内, o - y_1 轴垂直于入射面

近似椭圆 1 上的点到椭圆圆心的连线 $r_1(\alpha)$, 表示此界面对振动方位角为 α 的入射光束的反射率大小; 椭圆 2 上的点到椭圆圆心的连线 $r_2(\alpha)$, 表示入射光束在沿方位角 α 方向上的振动的能量大小. 因此, 一条振动方位角为 α 的入射线偏振光到达该光学界面时, 反射线偏振光能量是 $E_r(\alpha) = r_2(\alpha) \times r_1(\alpha)$; 反射线偏振光的振动方位角 α' 可以通过光线追迹得到 [13,14].

考虑入射光是部分偏振光的情况, 部分偏振光可看作无数束振动方位角沿任意方向的线偏振光的总和. 对每一条线偏振光用以上方法得到反射线

偏振光的能量和偏振态分布后,我们用所有这些反射线偏振光的能量的平均值,表示部分偏振光反射后的能量;用所有反射线偏振光的偏振态的组合,表示部分偏振光反射后的偏振态.为了简化模型,反射时的特殊情况在此不讨论,如全反射、布鲁斯特反射等.我们以 $E_r(\alpha)$ 为极半径, α 从 0 到 2π 变化,作图得到反射光的能量和偏振态分布图,如图 3 所示.

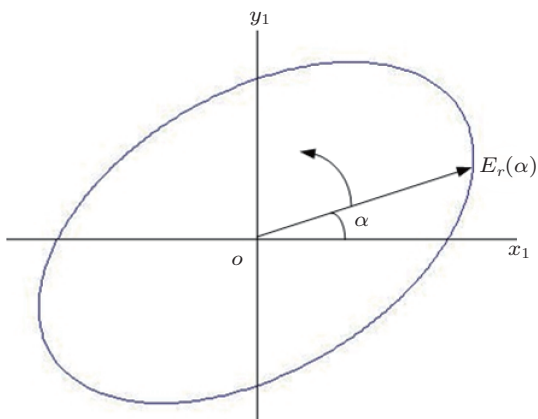


图 3 反射光的能量和偏振态分布图

从图 3 也可以看出,反射光的能量和偏振态分布图近似一个椭圆.光束透射时,也具有此种现象.因此,在精度要求不是非常严格的情况下,可以用光线椭圆来代替此近似椭圆,表示反射光的能量和偏振态.以下将讨论椭圆的半长轴 a 、半短轴 b 和长轴的方向如何反映光束能量和偏振态的分布.

3 光线椭圆的获得方法

3.1 光线椭圆长短轴与光束能量的关系

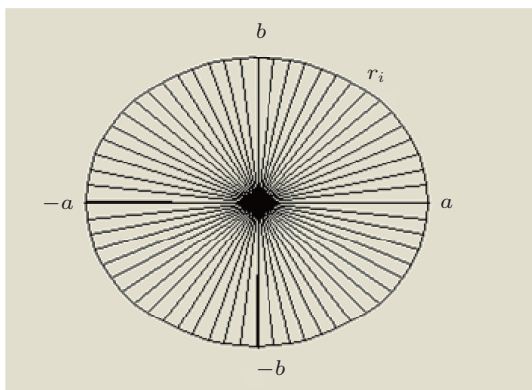


图 4 表示光束能量和偏振态的光线椭圆

光线椭圆上的点到椭圆圆心的连线 r_i , 代表一个取样的振动. r_i 的长度表示取样振动的能量 E_i . 光束的能量值等于所有取样振动的能量值的平均值, 所以光束能量:

$$E = \sum_{i=1}^N \frac{E_i}{N} = \sum_{i=1}^N \frac{r_i}{N} = \bar{r}, \quad (1)$$

(其中 N 是取样数).

根据椭圆性质可得平均值 \bar{r} 与椭圆长短轴的关系为:

$$\bar{r} = \sqrt{ab}. \quad (2)$$

由 (1), (2) 式, 得到光线椭圆的长短轴与光束的能量值的关系:

$$E = \sqrt{ab}. \quad (3)$$

3.2 光线追迹中, 光束能量的计算方法

在各向同性均匀介质表面处, 入射偏振光分解成相互垂直的两个分量 s 光和 p 光. 利用电磁场的边值关系得到的菲涅耳公式给出了 s 光和 p 光在界面处能量传递关系. 当入射光的振动方位角为 α 时, 入射光的反射比 $\rho_\alpha = \rho_s \sin^2 \alpha + \rho_p \cos^2 \alpha$ [15] (ρ_s, ρ_p 分别是 s 光和 p 光的反射比). 当入射光为无偏振光时, 对所有可能的方位角 α ($0 \rightarrow 2\pi$) 所对应的反射比取平均, 得到无偏振光的反射比为: $\rho = (\rho_s + \rho_p)/2$. 根据能量守恒, 光的透射比 $\tau = (1 - \rho)e^{-\alpha d}$, 其中 α 是吸收系数, d 为光在介质中通过的路程. 这里考虑各向同性介质, 吸收系数不随偏振态而改变. 光学材料厂家通常给出通光谱段内离散波长传播一定距离后的透过率. 对于透射成像的光学系统, 假设入射光的能量值为 1, 光束经过 n 个光学表面透射后, 光束的能量值变为:

$$E = \tau_1 \tau_2 \cdots \tau_n, \quad (4)$$

由 (3), (4) 式, 光束的能量值表示为:

$$E = \tau_1 \tau_2 \cdots \tau_n = \sqrt{ab}, \quad (5)$$

其中透射比 $\tau_1 \tau_2 \cdots \tau_n$ 在光线追迹中可以得到, 因此, 只要求出光线椭圆的半长轴 a 及其方向, 半短轴 b 可以通过 (5) 式得到, 从而描述部分偏振光能量和偏振态的光线椭圆便确定.

3.3 椭圆长轴及其方向的确定方法

以取 $\rho_s = 0.6, \rho_p = 0.5$ 为例, α 从 0 到 2π 变化, 在直角坐标系中分别画出函数 $r_1(\alpha), r_2(\alpha)$

和 $E_r(\alpha)$ 曲线, 其中, $r_1(\alpha), r_2(\alpha)$ 分别表示图 2 中近似椭圆 1 和椭圆 2 上的点到它们圆心的连线的长度值, 如图 5 所示.

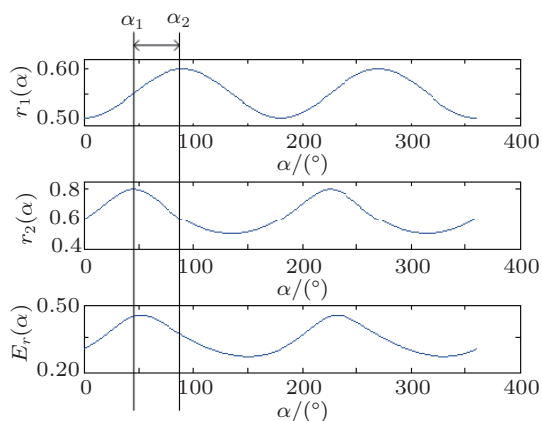


图 5 $r_1(\alpha), r_2(\alpha)$ 和 $E_r(\alpha)$ 函数在 $\alpha_1 \rightarrow \alpha_2$ 区间内寻找 $E_r(\alpha)$ 最大值点

函数 $r_1(\alpha), r_2(\alpha)$ 和 $E_r(\alpha)$ 曲线都类似于三角函数曲线. 求椭圆的半长轴 a 和其方向的问题转化为求 $E_r(\alpha)$ 最大值的问题. 观察图 2, 因为对于每个振动方位角 α , 有 $E_r(\alpha) = r_2(\alpha) \times r_1(\alpha)$, 最大值 $E_r(\alpha)_{\max}$ 应该出现在近似椭圆 1 长轴和椭圆 2 长轴之间, 即角 β 范围内. 近似椭圆 1 的长轴对应图 5 中 $r_1(\alpha)$ 的第一个最大值点 $\alpha = \alpha_2 = \pi/2$; 椭圆 2 的长轴对应图 5 中 $r_2(\alpha)$ 的第一个最大值点 $\alpha = \alpha_1$. 因此, $E_r(\alpha)$ 最大值点应该出现在 α_1 和 α_2 之间.

在 $\alpha_1 \rightarrow \alpha_2$ 区间内, 函数 $r_1(\alpha)$ 和 $r_2(\alpha)$ 都是单调函数, 且单调性相反. 例如在图 5 例子中, $r_1(\alpha)$ 在该区间内是单调递增的, 而 $r_2(\alpha)$ 是单调递减的.

我们写出 $E_r(\alpha)$ 的表达式:

$$E_r(\alpha) = \frac{ab(\rho_s \sin^2 \alpha + \rho_p \cos^2 \alpha)}{\sqrt{b^2 \cos^2(\alpha - \beta) + a^2 \sin^2(\alpha - \beta)}}, \quad (6)$$

(β 是椭圆 1 长轴与椭圆 2 长轴的夹角).

讨论函数 $E_r(\alpha)$ 在区间 $\alpha_1 \rightarrow \alpha_2$ 内的单调性, 发现 $E_r(\alpha)$ 最多存在一个极值点, 这对我们求 $E_r(\alpha)$ 的最大值点很有帮助. 借助数学方法, 求得最大值点和最大值, 最大值对应光线椭圆的长轴, 最大值点对应长轴的方位角. 光线椭圆的长轴及其方向得到以后, 由 (5) 式再求得光线椭圆的短轴, 描述部分偏振光能量和偏振态的光线椭圆也便得到了.

相比用大量取样线偏振光来描述部分偏振光的方法, 上述方法的优点明显. 它只需要在光束到达介质界面时, 计算出光线椭圆的长轴和方向, 而

不需要大量计算取样的线偏振光的能量和偏振态. 这种分析方法在保持很好的直观性的同时, 计算量大大减小. 计算中光学材料的折射率根据材料库中的参数和色散公式计算, 材料库中也包括吸收系数. 单色光或复色光均可照此分析. 选取不同的光学系统, 分别采用上述两种方法对入射光的能量和偏振态变化进行分析. 两者的分析结果相差较小, 能量计算值差异不超过 2.2%, 偏振度差异不超过 1.5%, 说明光线椭圆方法同时具有较高的准确性.

4 应用举例

在许多光学设备中, 采用大数值孔径成像是提高分辨率的一种常用方法. 但大数值孔径成像会使成像光束的入射角变大, 此时光束的偏振态变化较大, 偏振效应对成像质量的影响也会变得明显^[16]. 在光刻系统中, 光的偏振性一般用 TE 偏振光和 TM 偏振光两种情况来表示 (TE 偏振光、TM 偏振光即 3.2 节中的 s 光、p 光). TE 偏振光的电场振动方向垂直于入射面, TM 偏振光的电场振动方向在入射面内. 如图 6(a) 所示, 当 TE 偏振光成像时, 由于成像光束的电矢量振动方向都垂直于入射面, 成像对比度没有因为入射角度的增大而改变. 如图 6(b) 所示, 当 TM 偏振光成像时, 由于成像光束的电矢量振动方向不平行, 偏振成像的对比度受成像光束的入射角影响, 成像光强分布和对比度分别如式 (7), (8) 所示.

$$I_{\text{TM}}[x] = E_x \cdot E_x^* + E_z \cdot E_z^* = 4E_{\text{TM}}^2 [\cos^2(\theta) \cos^2(k_x x) + \sin^2(\theta) \sin^2(k_x x)], \quad (7)$$

$$\text{Contrast}_{\text{TM}} = \frac{I_{\text{TM max}} - I_{\text{TM min}}}{I_{\text{TM max}} + I_{\text{TM min}}} = \cos(2\theta). \quad (8)$$

对 TM 偏振光成像, 随着数值孔径的增大, 像面上的成像光束的入射角增大, 成像光束间夹角 θ 增大. 由式 (8) 可知, TM 偏振光成像对比度变差, 甚至会发生对比度反转. 可见 TM 偏振光成像对比度随着数值孔径的增大而降低^[17]. 因此, TE 偏振光成像比 TM 偏振光成像要具有更好的像质. 无偏振光成像时, 既存在 TE 偏振光, 又存在 TM 偏振光, 在大数值空间成像的条件下, 光束中 TE 偏振光成分的占比越高, 而 TM 偏振光成分的占比越低, 会对获得好的像质更有利.

图 7 所示为大数值孔径 (NA=0.7) 的齐明透镜系统 (无镀膜), 其对像质有很高的要求, 入射

光 ($\lambda = 0.55 \mu\text{m}$) 是与光轴平行的无偏振光, 光束在透镜介质内部传输时的吸收损耗在本例中暂不考虑. 我们用本文提出的光线椭圆的分析方法, 分析不同数值孔径下入射光通过各光学界面到达像

面时的能量和偏振效应. 然后将成像介质改为折射率为 1.3343 的水和 1.5180 的折射率油, 如图 8 所示, 再做同样的分析. 分析时均取相对折射率, 因此空气的折射率为 1.0000.

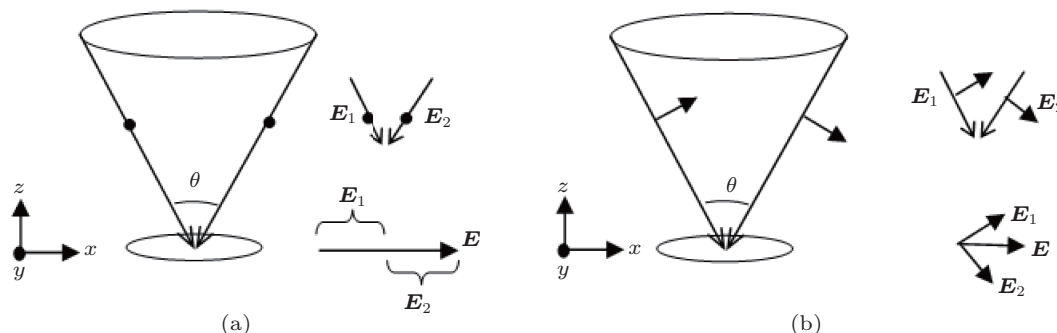


图 6 偏振光形式 (a) TE 偏振光; (b) TM 偏振光

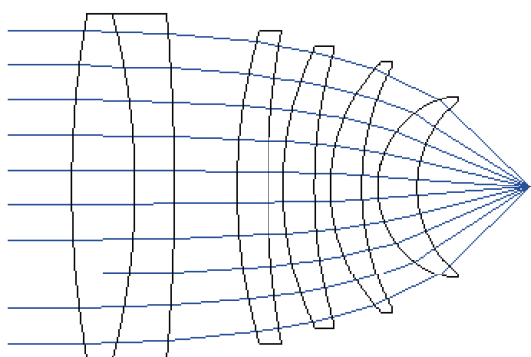


图 7 大孔径系统空气中成像

从表 1 可以看出, 光束入射时是无偏振光, 各个方向上振动强度相同, 光线椭圆是个圆; 光束到达像面时都变为部分偏振光, 各个方向上振动强度不相同. 由于系统没有镀膜, 光束到达像面时约有一半的能量损失. 并且数值孔径越大, 像面上光线椭圆越扁, TE 偏振光光强、TM 偏振光光强都减小, 光束总能量也减小. 这是由于数值孔径越大, 成像光束的入射角越大所造成的.

从表 2 可以看出, 随着数值孔径不断增大, TE 偏振光与 TM 偏振光光强之比减小. 当数值孔径 NA 为 0.2 时, TE 偏振光与 TM 偏振光光强相近, 比较接近与无偏振光的 TE 偏振光和 TM 偏振光成分比; 但当数值孔径 NA 为 0.7 时, TM 偏振光光强明显强于 TE 偏振光, 部分偏振变得明显. 可见, 虽然数值孔径增大, 使分辨率提高了, 但是在像面上, 成像光束中 TM 偏振光成分相对变大了, 而 TE 偏

振光成分相对变小了. 这与我们要尽量增加 TE 偏振光成分, 减少 TM 偏振光成分的目标相反, 因此成像对比度会变差. 此时高数值孔径带来的偏振效应问题将变得明显, 分辨率不再是与数值孔径成简单的反比关系, 还要考虑偏振效应可能带来的光斑模糊问题^[18].

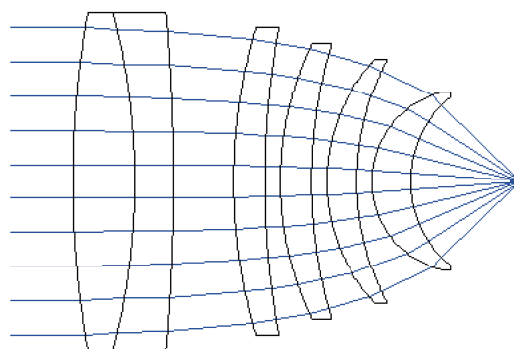


图 8 大孔径系统折射率油内成像

对比不同折射率介质内成像, 当数值孔径较小时, 成像光束中 TE 偏振光和 TM 偏振光光强相当, 并且改变成像介质, 对光强之比影响不大; 当数值孔径较大时, 增大成像介质的折射率, TE 偏振光和 TM 偏振光光强之比增大. 可见当数值孔径较大时, 提高成像介质的折射率, 使 TM 偏振光成分减小, TE 偏振光成分增大, 从而提高成像对比度. 此外高折射率介质对像面上倾斜的入射光有准直作用, 使其倾斜程度减小, 这样会使 TM 偏振光成像对比度变好, 而且增加了焦深. 因此, 使用高折射率的成像介质, 能改善高数值孔径带来的偏振效应问题.

表1 入射光束到达像面时能量和偏振态分布


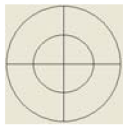
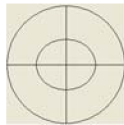



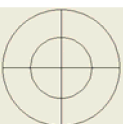
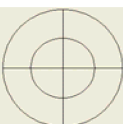
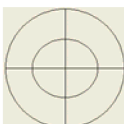
		NA	0.2	0.5	0.7
空气 ($n = 1.0000$)	光线椭圆				
	能量		0.5500	0.4884	0.3981
	TE 偏振光光强		0.5469	0.4714	0.3653
	TM 偏振光光强		0.5531	0.5054	0.4309
水 ($n = 1.3343$)	光线椭圆				
	能量		0.5334	0.5011	0.4577
	TE 偏振光光强		0.5309	0.4871	0.4295
	TM 偏振光光强		0.5359	0.5152	0.4859
折射率油 ($n = 1.5180$)	光线椭圆				
	能量		0.5133	0.4895	0.4570
	TE 偏振光光强		0.5109	0.4762	0.4299
	TM 偏振光光强		0.5157	0.5027	0.4842

表2 成像光束的 TE 与 TM 偏振光光强之比: TE/TM

	$n = 1.0000$	$n = 1.3343$	$n = 1.5180$
NA=0.2	0.9888	0.9907	0.9907
NA=0.5	0.9327	0.9455	0.9473
NA=0.7	0.8478	0.8839	0.8879

5 结论

在光学系统中, 针对部分偏振光, 本文提出了一种新的描述光束能量和偏振态的方法, 可用于分

析部分偏振光大数值孔径成像带来的偏振效应问题等. 该方法可以定性、定量地描述部分偏振光能量和偏振态的变化, 直观性强. 而且在光线追迹时, 只需要求出光线椭圆的长轴及其倾角, 需要计算的参数少, 算法简单. 相比我们以前提出的用采样线偏振光来描述部分偏振光的方法, 其计算量大大减小. 文章最后, 建立大数值孔径、高像质的齐明透镜系统, 并使用此方法分析了高数值孔径带来的偏振效应问题. 分析结果表明, 数值孔径越大, 对成像对比度存在负面影响的 TM 偏振光成分变大, 影响成像对比度. 而提高像方介质的折射率, 例如将像方介质改为折射率油, 会改善此种偏振效应问题.

- [1] Hong K, Jia B H, Min G 2010 *Opt. Express* **18** 10813
- [2] Schön E, Munhoz F, Gasecka A, Brustlein S, Brasselet S 2008 *Opt. Express* **16** 20891
- [3] Yu G B, Yao H M, Liu Y Y, Hu S 2003 *China Electronics Manufacturing Technology Forum* ShenZhen, China, August 6–9, 2003 p388 (深圳: CIPC, 中国电子学会生产技术分会)
- [4] Zhang Y L, Zhao Y Q, Zhan Q W, Li Y P 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1253 (in Chinese) [张艳丽, 赵逸琼, 詹其文, 李永平 2006 物理学报 **55** 1253]
- [5] Zhang J, Kim Y, Yang S H, Milster T D 2010 *J. Opt. Soc. Am. A* **27** 2272
- [6] Wang C, Yuan J H, Wang G Y, Xu Z Z 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 3014 (in Chinese) [王琛, 袁景和, 王桂英, 徐至展 2003 物理学报 **52** 3014]
- [7] Yuan C J, Situ G H, Pedrini G, Ma J, Osten W G 2011 *Appl. Opt.* **5** B6

- [8] Tschimwang A, Zhan Q 2010 *Appl. Opt.* **49** 1574
- [9] Su H M, Zheng X G, Wang X 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1044 (in Chinese) [苏慧敏, 郑锡光, 王霞 2002 物理学报 **51** 1044]
- [10] Zhang E F, Dai H Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 064209 (in Chinese) [张二峰, 戴宏毅 2011 物理学报 **60** 064209]
- [11] Freniere E R, Gregory G G 1999 *SPIE Conference on Optical Design and Analysis Software* Denver, Colorado July 1999 p148
- [12] Liu Ch, Liu Q Sh, Cen Zh F, Li X T 2010 *SPIE Conference on Optical Design and Testing* Beijing, China, Oct. 18–21, 2010 p78490G-1
- [13] Born M, Wolf E (translated by Yang X S) 2009 *Principles of Optics* (7th Edition) (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) p39–45 (in Chinese) [马科斯·波恩, 埃米尔·沃耳夫著 杨葭菽译 2009 光学原理 (第7版) (北京: 电子工业出版社) 第39—45页]
- [14] Cen Zh F, Li X T 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5784 (in Chinese) [岑兆丰, 李晓彤 2010 物理学报 **59** 5784]
- [15] Yu D Y, Tan H Y 2005 *Engineering Optics* (2ed Edition) (Beijing: China Machine Press) p420–422 (in Chinese) [郁道银, 谈恒英 2005 工程光学 (第2版) (北京: 机械工业出版社) 第420—422页]
- [16] Lindlein N, Quabis S, Peschel U, Leuchs G 2007 *Opt. Express* **15** 5827
- [17] Yu G B 2006 *Ph. D. Dissertation* (Sichuan: the Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [余国彬 2006 百纳米级微细图形投影光学光刻偏振成像原理及方法研究 博士学位论文 (四川: 中国科学院光电技术研究所)]
- [18] Lerman G M, Levy U 2008 *Opt. Express* **16** 4567

Ray ellipse method of analyzing the power and polarization state of partially polarized light*

Liu Chao¹⁾ Cen Zhao-Feng^{1)†} Li Xiao-Tong¹⁾ Xu Wei-Cai²⁾
Shang Hong-Bo²⁾ Neng Fen¹⁾ Chen Li¹⁾

1) (State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

2) (State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

(Received 7 September 2011; revised manuscript received 23 November 2011)

Abstract

It is difficult to cope with the changes in power and polarization for partially polarized light. The light polarization will also affect the image quality, especially for imaging with large numerical aperture. A novel method of analyzing the power and the polarization state of partially polarized light is proposed in this paper. This method has a good intuitiveness and requires much smaller computation. An aplanatic lens system is simulated. Polarization effect caused is analyzed with this method. The results show that for the imaging light the intensity of TM polarized light relatively increases because of large numerical aperture, which will influence image contrast. Imaging in high refractive index medium can be used to improve this problem.

Keywords: partially polarized light, high numerical aperture, light power, polarization effect

PACS: 42.15.-i, 42.15.Dp, 42.15.Eq, 42.25.Ja

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10875105, 60977101), the Aviation-Science Foundation of China (Grant No. 20090176001), and the Open Foundation of State Key Laboratory of Applied Optics (Grant No. Y1Q03FQK09).

† E-mail: cenzf@zju.edu.cn