

## 偏振对光学系统成像质量的影响\*

庞武斌<sup>1)</sup> 岑兆丰<sup>1)†</sup> 李晓彤<sup>1)</sup> 钱炜<sup>1)</sup> 尚红波<sup>2)</sup> 许伟才<sup>2)</sup>

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5月10日收到; 2012年6月25日收到修改稿)

通常情况下, 评价光学成像系统像质的几个重要参数, 如能量集中度 (Strehl 比)、分辨率、焦深等, 都是以标量衍射理论为基础进行计算和分析的. 考虑光波的矢量偏振特性, 尤其是在高数值孔径系统中, 标量衍射的精度已不能满足精度要求. 本文讨论了在采用矢量衍射计算方法基础上, 上述成像参数的变化, 所讨论系统入瞳面各点为偏振方向一致的线偏光或部分偏光, 以便于考察偏振对所述成像参数的影响, 通过公式推导和数值计算, 得出了由于偏振的影响, 系统衍射斑能量极大值变小, 像面和偏振平行方向分辨率降低, 分辨率出现各向异性, 只有系统焦深受偏振影响较小. 而这些矢量效应会随着系统数值孔径的提高而愈加明显, 因此在分析处理数值孔径较高的光学系统时必须使用矢量衍射方法. 最后讨论了轴外点衍射斑的计算.

**关键词:** 偏振光, 矢量衍射理论, 成像质量, 数值孔径

**PACS:** 42.25.HZ, 42.25.Ja, 42.30.-d

## 1 引言

传统的光学成像分析方法认为在小的出射孔径角条件下, 成像光束内的所有光线近似正入射于像面, 因此每根光线的偏振方向近似一致, 忽略了光线倾斜所造成的偏振方向的差异, 这就是光学成像的标量分析方法, 该近似在一般的成像系统分析中拥有足够的精度, 在获取系统点扩散函数 (PSF)、光学传递函数 (OTF) 等方面取得了成功, 因此也被传统的光学分析软件所广泛采用. 然而随着光学成像系统分辨力的不断提升, 这种传统的标量方法不能满足所需的精度要求<sup>[1]</sup>, 这是伴随着偏振激光照明光源、高数值孔径 ( $NA > 0.6$ ) 或超高  $NA (> 0.7)$  光学器件<sup>[2]</sup>、微纳光学等新一代光学技术的发展所出现的问题, 在这些新问题中需要采用更高精度的光线矢量偏振分析方法.

本文基于 Ignatowski<sup>[3]</sup>, Richards 和 Wolf<sup>[4]</sup> 的

计算公式, 给出了轴上点在不晕成像系统无像差情况下几何像面上的光强分布, 即系统点扩散函数<sup>[5]</sup>. 对成像系统在考虑和未考虑光线偏振性两种情况时的像质进行了分析, 同时考察了系统 NA 值从低到高变化过程中光线偏振性对像质的影响程度, 通过公式推导和数值模拟, 计算出了单一方向线偏光成分的加入对中心亮度比、分辨率、焦深三个最常用的传统像质评价参数的影响. 在系统 NA 较高的时候, 忽略光线的矢量偏振效应将会导致计算结果和实际结果偏差较大. 通过全文的分析可以明显得出, 引入矢量计算以后, 衍射斑中心亮度变低, 斑点形状失去圆对称性, 并且可能出现多个可以和中心极大值峰相比拟的其他尖峰, 同时也得出了加入单一方向线偏振成分不会影响到系统焦深的结论. 最后, 对于轴外视场点的计算引入修正计算. 由于在光学领域, 像面上的感光机理都是对电场响应, 因此本文只计算衍射场的电场量, 没有考虑磁场量的特征和分布.

\* 国家自然科学基金 (批准号: 10875105, 60977010)、航空科学基金 (批准号: 2090176001) 和应用光学国家重点实验室开放基金 (批准号: Y1Q03FQK09) 资助的课题.

† E-mail: cenzf@zju.edu.cn

## 2 衍射积分

考虑一个无穷远处轴上点物成像的单色光成像系统, 并假设系统不晕成像, 即满足阿贝正弦条件和无像差, 像方数值孔径  $NA = n \sin \alpha$ , 取像面位于空气中, 所以  $n \approx 1$ ,  $NA = n \sin \alpha$ ,  $\alpha$  表示像方最大半孔径角. 系统坐标选取如图 1 所示, 坐标原点  $o$  位于高斯像点中心, 轴  $ox$  方向平行于入射线偏光偏振方向, 轴  $oz$  平行系统光轴并指向光线正方向 [6].

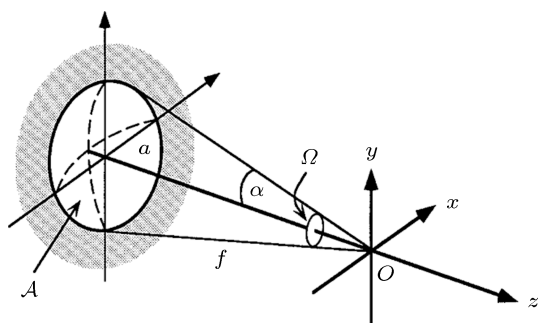


图 1 系统衍射聚焦结构, 物方入射线偏光的偏振方向平行于  $ox$  轴

当忽略掉光波的矢量偏振特性, 采用标量衍射近似下, 系统脉冲响应函数可以由下面积分式求出

$$e = i2A \int_0^\alpha \cos^{\frac{1}{2}} \theta \sin \theta e^{ikr_p \cos \theta \cos \theta_p} \times J_0(kr_p \sin \theta \sin \theta_p) d\theta, \quad (1)$$

则光斑光强可以表示为

$$I_u^p(r_p, \theta_p, \varphi_p) = e \cdot e^* \quad (2)$$

考虑光波的矢量偏振效应, 则所考虑系统入瞳和出瞳处光波偏振态可由图 2 表示.

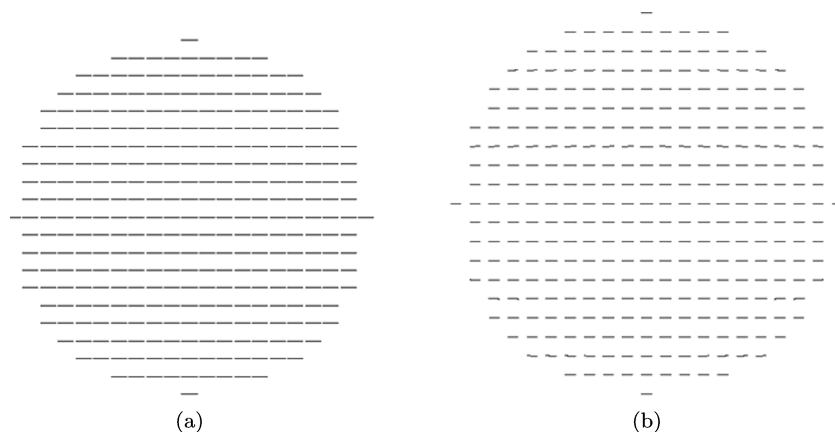


图 2 (a) 入射平面波在入瞳面上的偏振方向  $ox$  方向; (b) 出射球面波在出瞳面上的偏振方向

本文将取一系列 NA 值从小到大的系统进行计算, 以便于对各个不同 NA 值的系统成像情况进行对比, 同时选取不同的光线偏振度, 比较偏振度对成像的影响. 像面上光斑的光强分布需要采用文献 [4] 中的公式和方法计算, 即对于像面附近任一坐标点  $p(x, y, z)$ , 计算该点的光振幅可采用积分式 [4]:

$$e(x, y, z) = -\frac{ik}{2\pi} \iint_{\Omega} \frac{a(s_x, s_y)}{s_z} e^{ik[\Phi(s_x, s_y) + s_x x + s_y y + s_z z]} \times ds_x ds_y, \quad (3)$$

其中  $\Phi(s_x, s_y)$  表示系统波前像差, 此处取  $\Phi(s_x, s_y) = 0$ , 即无像差系统;  $(s_x, s_y, s_z)$  是光线方向余弦矢量. 由于系统的对称性, 采用球坐标系, 极轴取光轴  $oz$  轴正方向, 极角  $\phi$  正方向取  $ox$  轴转向  $oy$  轴, 则像面附近任意坐标点  $p(r_p, \theta_p, \phi_p)$  处光振幅由下列公式 [7] 算出:

$$\begin{aligned} e_x &= -\frac{iA}{\pi} \int_0^\alpha \int_0^{2\pi} \cos^{\frac{1}{2}} \theta \sin \theta \{ \cos \theta \\ &\quad + (1 - \cos \theta) \sin^2 \phi \} e^{ikr_p \cos \varepsilon} d\theta d\phi, \\ e_y &= -\frac{iA}{\pi} \int_0^\alpha \int_0^{2\pi} \cos^{\frac{1}{2}} \theta \sin \theta (1 - \cos \theta) \\ &\quad \times \cos \phi \sin \phi e^{ikr_p \cos \varepsilon} d\theta d\phi, \\ e_z &= -\frac{iA}{\pi} \int_0^\alpha \int_0^{2\pi} \cos^{\frac{1}{2}} \theta \sin^2 \theta \cos \phi \\ &\quad \times e^{ikr_p \cos \varepsilon} d\theta d\phi, \end{aligned} \quad (4)$$

其中  $e = (e_x, e_y, e_z)$  是矢量光振幅,  $\alpha$  是像方光束最大半孔径角, 如文献中所述,

$$\cos \varepsilon = \cos \theta \cos \theta_p + \sin \theta \sin \theta_p \cos(\phi - \phi_p),$$

则点  $p(r_p, \theta_p, \phi_p)$  处总光强  $I(r_p, \theta_p, \phi_p) = e_x \cdot e_x^* + e_y \cdot e_y^* + e_z \cdot e_z^*$ , 其中“\*”号表示取复共轭.

### 3 线偏光下的系统光斑

对于  $NA \geq 0.7$  的光学系统, 光的偏振性质必须加以考虑 [7]. 本节所要讨论的主要内容是光的偏振效应对系统成像质量参数的影响. 考察不同偏振度的光线下, 成像斑能量集中度, 系统分辨率, 系统焦深等变化.

#### 3.1 中心亮度比

传统光学里 Strehl 比是指当系统存在像差时, 其成像衍射斑的中心和不存在像差时衍射斑的中心亮度之比, 用字母 S.D 来表示, 当  $S.D > 0.8$  时, 认为光学系统的成像质量是完善的. 考虑到光波的矢量偏振效应, 定义新的作用类似于 Strehl 比的成像参量, 即能量集中度. 该量的定义为采用矢量衍射方法计算和标量衍射近似计算的光斑中心亮度之比, 下面用小写字母 s.d 来表示. 上标  $v$  表示采用矢量法的计算结果,  $s$  表示标量法. 根据其定义, 可以知道当系统 s.d 越接近 1, 则标量近似程度越好, 反之则需要考虑采用矢量计算方法.

$$s.d = \frac{\max(I^v)}{\max(I^s)}, \quad (5)$$

本文只对通常情况下的部分偏振光进行讨论, 暂不涉及椭圆偏光. 对于部分偏振光, 可以将其分解成优势偏振方向上强度为  $I_l$  的线偏振光和强度为  $I_u$  的非偏振光的叠加, 则光线偏振度  $P$  可以按定义表达为

$$P = \frac{I_l}{I_l + I_u} \quad (6)$$

对于偏振度  $P$  光强为  $I$  的部分偏振光, 可以由 (6) 式得出:  $I_l = PI, I_u = (1 - P)I$ . 把采用该偏振态的光束成像下光斑中心亮度和标量近似求法下光斑中心亮度进行对比, 可以计算出该偏振度下系统的中心亮度比:

$$s.d = \frac{P \cdot \max(I_{P=1}^v) + (1 - P) \cdot \max(I_{P=0}^v)}{\max(I^s)}. \quad (7)$$

假设对于无偏振光标量计算和矢量计算两种结果相近, 则  $I_{P=0}^v \approx I^s$ , (7) 式可以写成下面的形式:

$$s.d = 1 - \left[ 1 - \left( \frac{\max(I_{P=1}^v)}{\max(I^s)} \right) \right] \cdot P. \quad (8)$$

考虑第二节假设的系统, 偏振度  $P = 1$  的线偏振光, 像面附近的光强极大值:

$$\max(I_{P=1}^v) = I(r_p = 0, \theta_p = 0, \phi_p = 0)$$

代入积分 (2) 式得:

$$e_x = -iA \left( \frac{16}{15} - \frac{2}{3} \cos^{\frac{3}{2}} \alpha - \frac{2}{5} \cos^{\frac{5}{2}} \alpha \right), \quad (9)$$

$$e_y = 0, \quad e_z = 0,$$

从而求出:

$$\begin{aligned} \max(I_{P=1}^v) &= e_x \cdot e_x^* \\ &= A^2 \left( \frac{16}{15} - \frac{2}{3} \cos^{\frac{3}{2}} \alpha - \frac{2}{5} \cos^{\frac{5}{2}} \alpha \right)^2. \end{aligned} \quad (10)$$

同理, 利用积分 (1) 式, 经计算可得:

$$\begin{aligned} \max(I^s) &= I^s(r_p = 0, \theta_p = 0, \phi_p = 0) \\ &= \frac{16}{9} A^2 \left( 1 - \frac{2}{3} \cos^{\frac{3}{2}} \alpha \right)^2. \end{aligned} \quad (11)$$

利用  $\cos \alpha = \sqrt{1 - \sin^2 \alpha} = \sqrt{1 - NA^2}$ , 给定系统 NA 值和光线偏振度  $P$ , 结合 (7), (10), (11) 式就可以计算系统的 s.d 值, 表 1 列举了不同 NA 和不同  $P$  值下系统的 s.d 数值计算结果.

表 1 不同 NA 和不同  $P$  值下系统的 s.d 数值计算结果

偏振度 $P$	NA				
	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0	1	1	1	1	1
0.25	0.9763	0.9661	0.9542	0.9385	0.9100
0.5	0.9526	0.9322	0.9083	0.8770	0.8200
0.75	0.9289	0.8984	0.8625	0.8155	0.7300
1.0	0.9052	0.8645	0.8167	0.7540	0.6400

从表 1 可以得出, 相同 NA 下, 随着偏振度的提高, 中心亮度比随之降低; 相同偏振度下, 随着 NA 增大, 中心亮度比也是随之降低, 也就是数值孔径越大, 所用光线偏振度越高, 系统成像光斑的中心亮度比也就越低.

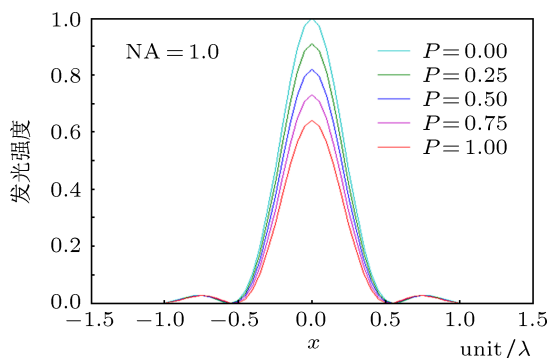


图3 NA = 1 系统  $ox$  轴方向 PSF 图, 采用  $P = 0$  时最大值归一化处理, 横坐标以波长  $\lambda$  为单位, 文中所有涉及衍射光斑的图片尺寸单位均为波长

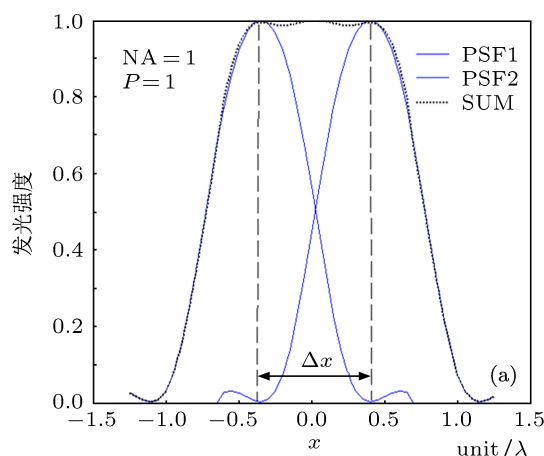
### 3.2 偏振对系统分辨率的影响

分辨率反映光学系统分辨物体细节的能力, 是一个很重要的指标参数. 由于一般光学系统以光轴为中心旋转对称, 在标量近似下, 物方点物的衍射斑是圆形光斑. 然而对于大数值孔径光学系统, 光波的矢量偏振效应对光斑形状产生了明显影响, 衍射斑偏离圆对称呈椭圆状, 也就是像面上出现分辨率各向异性, 该现象如图 5 所示, 衍射光斑甚至会出现多个显著的次级尖峰.

瑞利指出一个亮点的衍射图案中心与另一个亮点的衍射图案的第一暗环重合时, 这两个亮点则能被分辨, 若两亮点更靠近时, 则光能接收器就不能分辨出它们是分离的亮点了 [8].

在标量近似下, 系统的分辨率可以通过 (1) 式导出, 也就是通常所提到的艾里斑半径:

$$r_0 = \frac{0.61\lambda}{\tan \alpha} = \frac{0.61\lambda\sqrt{1 - \sin^2 \alpha}}{\sin \alpha} = \frac{0.61\lambda\sqrt{1 - \text{NA}^2}}{\text{NA}}, \quad (12)$$



应用矢量计算方法, 对于线偏振光, 应用文献 [4] 中 (3.2), (3.14) 式计算像面上  $ox$  和  $oy$  方向的光强度分布:

$$\begin{aligned} I_{ox} &= A^2[(I_0 + I_2)^2 + 4I_1^2], \\ I_{oy} &= A^2[(I_0 - I_2)^2], \end{aligned} \quad (13)$$

其中

$$\begin{aligned} I_0 &= \int_0^\alpha \cos^{\frac{1}{2}} \theta \sin \theta (1 + \cos \theta) \\ &\quad \times J_0(kr \sin \theta) d\theta, \\ I_1 &= \int_0^\alpha \cos^{\frac{1}{2}} \theta \sin^2 \theta J_1(kr \sin \theta) d\theta, \\ I_2 &= \int_0^\alpha \cos^{\frac{1}{2}} \theta \sin \theta (1 - \cos \theta) \\ &\quad \times J_2(kr \sin \theta) d\theta. \end{aligned} \quad (14)$$

根据 Bessel 函数的性质, 上式中  $I_2$  相对于  $I_0$  和  $I_1$  是一个小量, 可以忽略掉.

从 (13), (14) 式可以看出,  $oy$  方向分辨率只和  $I_0$  量有关, 对应于标量衍射时分辨率公式. 而对于  $ox$  方向 (入射光偏振方向), 同时受到  $I_0$  和  $I_1$  两个量的影响, 尖峰宽度变宽, 从而使分辨率下降. 从积分 (14) 式可以看出,  $I_1$  量随着积分孔径  $\alpha$  的增大, 对光强的影响也越来越大, 使得  $ox$  方向脉宽越来越偏离标量衍射近似下的宽度, 这也正是为什么在越高 NA 的光学成像中, 系统越要考虑光波的矢量偏振性质的原因.

图 4 是在系统 NA = 1 时, 像面  $ox$  和  $oy$  方向的分辨率示意图. 从图中可以很清楚地看到, 对于偏振方向平行于  $ox$  坐标轴的入射线偏振光, 经系统成像后, 衍射像斑在  $ox$  方向上的分辨率小于  $oy$  方向上的分辨率 [9].

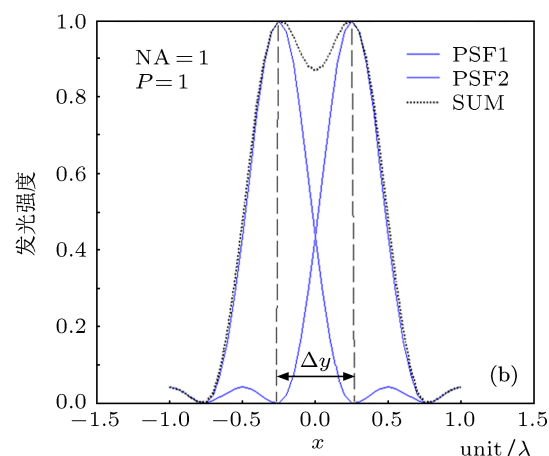


图4 NA = 1 时, 像面  $ox$  和  $oy$  方向上的分辨率失对称情况 (a)  $ox$  方向; (b)  $oy$  方向

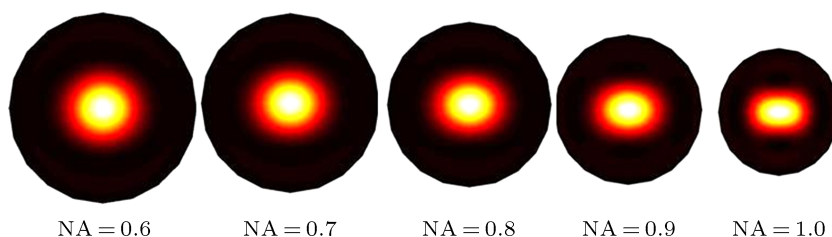


图5 不同 NA, 线偏振光系统衍射光斑

### 3.3 偏振对系统焦深的影响

焦深是物体上的点在镜头后的成像轴线上能够获得较清晰的成像距离, 决定了系统在对焦过程中所需要的精细程度, 尤其对于高 NA 甚至超高 NA 的投影光刻系统, 准确的对焦能力是系统良好工作性能的重要保证. 对于成像光学系统来说, 在分辨率达到所要求的情况下, 焦深一般是越大越好, 因为这样就降低了系统的对焦难度.

假设像面沿光轴前后移动, 光斑中心点亮度降低为理想像面一半所允许的移动距离称为系统焦深. 首先考虑标量近似下的系统焦深, 考虑的是无穷远轴上点的成像, 将  $r_p = z_p$ ,  $\cos \theta_p = 1$ ,  $\sin \theta_p = 0$  代入 (1) 式, 忽略掉倾斜因子, 即  $\cos^{\frac{1}{2}} \theta \approx 1$ , 并考虑到  $J_0(0) = 1$ , 从而得到有  $z_p$  离焦量时的轴上点光振幅表达式:

$$\begin{aligned} e &= i2A \int_0^\alpha \cos^{\frac{1}{2}} \theta \sin \theta e^{ikz_p \cos \theta} d\theta \\ &\approx \frac{2A}{kz_p} (e^{ikz_p} - e^{ikz_p \cos \alpha}), \end{aligned} \quad (15)$$

光强

$$I = e \cdot e^* = 4A \frac{1 - \cos[kz_p(1 - \cos \alpha)]}{(kz_p)^2}. \quad (16)$$

理想像点  $z_p = 0$  光强:  $I_{z_p=0} = 2A(1 - \cos \alpha)^2$ , 使  $I = \frac{1}{2}I_{z_p=0}$ , 即解方程:

$$4A \frac{1 - \cos[kz_p(1 - \cos \alpha)]}{(kz_p)^2} = A(1 - \cos \alpha)^2. \quad (17)$$

将  $\cos[kz_p(1 - \cos \alpha)]$  用 Taylor 级数展开到第三项:

$$\begin{aligned} &\cos[kz_p(1 - \cos \alpha)] \\ &\approx 1 - \frac{1}{2}[kz_p(1 - \cos \alpha)]^2 + \frac{1}{6}[kz_p(1 - \cos \alpha)]^4, \end{aligned} \quad (18)$$

代入 (17) 式整理得:

$$[kz_p(1 - \cos \alpha)]^2 = \frac{2}{3}[kz_p(1 - \cos \alpha)]^4, \quad (19)$$

解上式得:

$$z_p = \frac{\sqrt{6}}{2k(1 - \cos \alpha)} = \frac{\sqrt{6}\lambda}{4\pi(1 - \sqrt{1 - \text{NA}^2})}. \quad (20)$$

由于轴上光强关于理想像点前后对称, 焦深:

$$\Delta z = 2z_p = \frac{\sqrt{6}\lambda}{2\pi(1 - \sqrt{1 - \text{NA}^2})}. \quad (21)$$

当系统 NA 值比较小时, 采用近似:

$$\sqrt{1 - \text{NA}^2} \approx 1 - \frac{1}{2}\text{NA}^2.$$

(21) 式可以近似为

$$\Delta Z \approx \frac{\sqrt{6}\lambda}{\pi \cdot \text{NA}^2}. \quad (22)$$

(22) 式正是小系统 NA 标量近似下的系统焦深公式.

下面考虑光波的矢量偏振特性对焦深  $\Delta Z$  的影响, 首先将  $r_p = z_p$ ,  $\cos \theta_p = 1$ ,  $\sin \theta_p = 0$  代入 (1) 式得:

$$\begin{aligned} e_x &= -iA \int_0^\alpha \cos^{\frac{1}{2}} \theta \sin \theta (1 + \cos \theta) \\ &\quad \times e^{ikz_p \cos \theta} d\theta, \end{aligned} \quad (23)$$

$$e_y = 0,$$

$$e_z = 0.$$

同样忽略波面倾斜因子, 同时对积分使用中值定理, 则:

$$\begin{aligned} \mathbf{e} &= e_x \mathbf{i} + e_y \mathbf{j} + e_z \mathbf{k} \\ &= [-iA(1 + \xi) \int_0^\alpha \sin \theta e^{ikz_p \cos \theta} d\theta] \cdot \mathbf{i}, \end{aligned} \quad (24)$$

其中  $1 \leq 1 + \xi \leq 2$ , (24) 式和 (15) 式形式是完全一致的, 光波中加入线偏振成分后焦深是不受影响的, 焦深和数值孔径 NA 的平方成反比, 和波长成正比. 表 2 是几组不同偏振态和不同 NA 下的焦深数值计算结果.

从表 2 中可以看出相同 NA 下, 不同偏振度焦深几乎没有变化, 这个性质在  $NA = 1$  的情况下也保持着, 即焦深在我们所讨论的系统参数下完全不受线偏振成分的影响, 该结论不需要做小孔径近似也是成立的.

表 2 几组不同偏振态和不同 NA 下的焦深数值计算结果 (焦深单位:  $\lambda$ )

偏振度 $P$ \ NA	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0	4.49	3.02	2.18	1.60	0.98
0.25	4.49	3.03	2.21	1.61	1.00
0.5	4.48	3.08	2.22	1.60	1.00
0.75	4.48	3.08	2.22	1.60	1.02
1.0	4.48	3.08	2.22	1.60	1.04

### 3.4 轴外点衍射光斑计算

本节对成像系统的三个重要参数的讨论分析

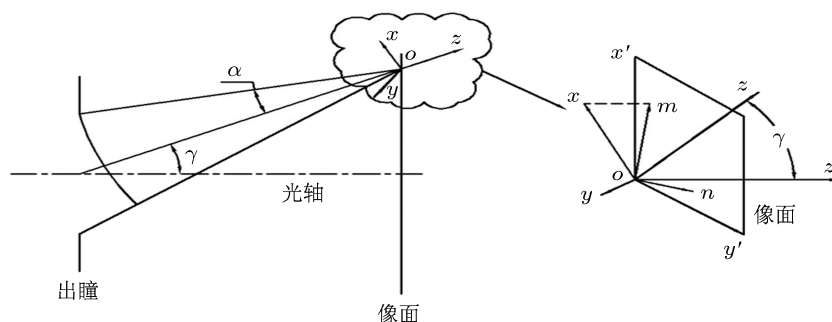


图 6 轴外视场衍射场结构和坐标系选取

对于上图所示的轴外点衍射场结构, 无穷远入射光偏振方向一致, 假设像方视场角为  $\omega$ , 光线偏振方向和子午面的夹角为  $\gamma$ , 坐标系原点  $o$  取在轴外高斯像点上,  $oz$  轴沿主光线方向,  $ox$  轴沿入射光偏振方向,  $oy$  轴垂直  $oxz$  面, 并符合  $ox, oy, oz$  右手螺旋性质, 则像平面在该坐标系下的平面方程为

$$y \sin \gamma - x \cos \gamma = -\frac{z}{\sin \omega}, \quad (25)$$

转换为球坐标形式

$$\sin \omega \tan \theta \cos(\varphi + \gamma) = 1. \quad (26)$$

取  $\mu = kz \sin^2 \alpha$ ,  $\nu = k\sqrt{x^2 + y^2} \sin \alpha$  其中,  $\alpha$  是光束半孔径角, (26) 式可以写成:

$$\phi = \arccos\left(\frac{\mu}{\nu \sin \omega \sin \alpha}\right) - \gamma. \quad (27)$$

下面分别考察平行和垂直入射光偏振方向上光强分布的情况, 设  $om$  方向是  $ox$  轴在像面上的垂

中, 只考虑了轴上点. 对于视场很小的光学系统, 轴外点的成像特性可以用轴上点近似替代, 而不至于产生较大的误差. 然而在处理大视场大孔径的投影光刻物镜之类的成像系统时, 就必须考虑到轴外视场与轴上视场的差别了.

在像方远心系统中, 所有视场的主光线垂直于像面, 也就是与光轴平行, 出瞳位于无穷远处. 如果系统有渐晕, 则轴外点的成像光束孔径角小于轴上点, 也就是相应的 NA 值降低. 而且随着视场的增大, 渐晕越严重, 光束孔径角越小, 这就导致了轴外点和轴上点相比, 分辨率减小, 衍射斑亮度降低, 焦深变长.

在非像方远心系统中, 轴外像点除了因渐晕产生的上述变化外, 还由于主光线的倾斜, 造成了光斑更加严重的失对称. 下面就矢量衍射方法下轴外点的光斑特性在轴上点基础上做出修正计算.

直投影, 像面上  $on$  方向垂直于  $ox'$  方向.

$on$  方向方程:

$$\begin{cases} \cos(\gamma + \phi) \sin \alpha \sin \omega = \frac{u}{\nu}, \\ \phi = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}. \end{cases} \quad (28)$$

$om$  方向方程:

$$\begin{cases} \cos(\gamma + \phi) \sin \alpha \sin \omega = \frac{u}{\nu}, \\ \phi = 0, \pi \end{cases} \quad (29)$$

将上面式子代入文献 [4] 中的 (3.2) 式进行计算, 分别计算入射光偏振方向垂直于子午面, 即  $\gamma = \pi/2$ , 和入射光偏振方向平行于子午面, 即  $\gamma = 0$ , 图 7 是对  $60^\circ$  像方视场角, 光束半孔径角为  $81^\circ$  轴外光束矢量衍射数值模拟并和轴上光斑做对比的光斑轮廓图: 可以看到子午面由于光线倾斜导致的光斑光强轮廓展宽.

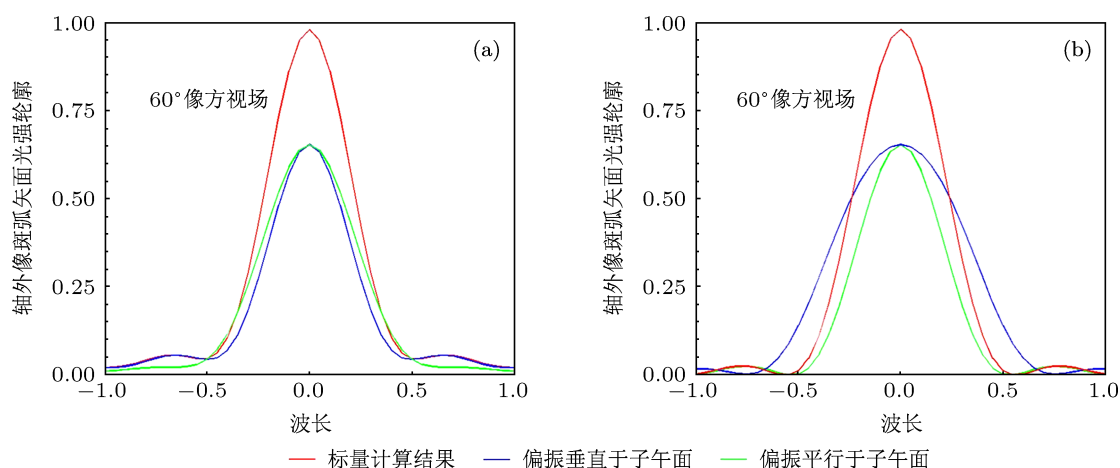


图7 (a) 轴外点午方向光斑轮廓; (b) 轴外点弧矢方向光斑轮廓

## 4 结论

本文在文献 [7] 的矢量偏振衍射计算基础上, 通过进一步的公式推导和数值计算, 重新定义并分析讨论了几个对于光学成像特别重要的参数, 如中心亮度比、分辨率、焦深. 在加入不同比重相同偏振方向线偏光成分后, 比较这些参数与标量衍射近似的差异, 并推导了产生这些差异的数学原理. 可以看出, 随着系统 NA 值的增大, 这些参数所受光波矢量偏振特性的影响变得越来越明显. 当然对于实际光学系统, 由于各个光学表面对不同方向偏振光的投射或反射特性不同, 会导致入射到像面的光线偏振态比较复杂. 随着光成像技术的飞速进

步, 光学成像系统越来越向更高分辨率以及更大视场范围方向发展, 不断增大成像系统的 NA 值是提高分辨率有效方法 [10]. 因此在进行此类光学系统的设计和分析时, 必须采用更加严密的矢量光线追迹方法以及矢量衍射方法, 常用的光学设计软件, 如 ZEMAX 和 CODEV, 虽然也有一定的偏振光线追迹能力, 然而却不具备矢量光衍射计算能力, 这样就需要矢量光处理能力更加强大的光学设计以及分析软件. 孔径矢量衍射聚焦方面的研究, 对于高分辨率显微镜以及光刻投影物镜的设计分析以及微波、激光等高相干性波场在焦点附近的场量分布有着重要的意义.

- [1] Hopkins H H 1943 *Proc. Phys. Soc.* **55** 116  
 [2] Flagello D G, Rosenbluth A E, Proglor C, Armitage J 1992 *Micro-electronic Engineering*. **17** 105  
 [3] Ignatowski W S 1919 *Trans. Opt. Inst. Petrograd*. **1** 36  
 [4] Richards B, Wolf E 1959 *Proc. R. Soc. London A* **253** 358  
 [5] Kant R 1991 *Tech. Rep. TR02*. **1713.B** 25  
 [6] Wang W J, Friberg A T, Wolf E 1997 *J. Opt. Soc. Am. A* **14** 491  
 [7] Bowkamp C J 1954 *Rep. Pro. Phys.* **17** 35  
 [8] Born M, Wolf E 2009 *Principles of Optics*. (7th Ed.) (Beijing:

- Publishing House of Electronics Industry Press) p383 (in Chinese)  
 [马科斯·玻恩, 埃米尔·沃耳夫 2009 光学原理 (第七版) (北京: 电子工业出版社) 第 383 页]  
 [9] Liu C, Cen Z F 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 134201 (in Chinese) [刘超, 岑兆丰 2012 物理学报 **61** 134201]  
 [10] Xu W C 2011 *Ph. D. Dissertation* (Changchun: The Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science) (in Chinese) [许伟才 2011 博士学位论文 (长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所)]

# The effect of polarization light on optical imaging system\*

Pang Wu-Bin<sup>1)</sup> Cen Zhao-Feng<sup>1)†</sup> Li Xiao-Tong<sup>1)</sup> Qian Wei<sup>1)</sup>  
Shang Hong-Bo<sup>2)</sup> Xu Wei-Cai<sup>2)</sup>

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 10 May 2011; revised manuscript received 25 June 2012)

## Abstract

Normally, Strehl ratio, resolution, and focus depth, the parameters that are used to evaluate the performance of an optical imaging system, are always calculated by scalar diffraction method. Considering the vectorial properties of light, especially when the system numerical aperture (NA) is high, the accuracy of scalar method can no longer fulfill the requirement of analysis. The variations of properties of these parameters accompanied by using of vectorial method are discussed. In order to describe the effects of polarization clearly, assuming a system with identical polarization state within the entrance pupil, by formula deduction and numerical simulation, we conclude that due to the influence of the polarization, the maximum intensity of system diffraction spot decreases, the resolution between image plane and parallel polarized orientation of incident light drops down, then the diffraction spot loses its circular symmetry, the focus depth changes slightly, and these effects becomes more apparent with the increase of system NA. Finally, the method of calculating the off-axis images is discussed in the paper.

**Keywords:** polarization, vectorial diffractive theory, imaging quality, numerical aperture

**PACS:** 42.25.HZ, 42.25.Ja, 42.30.-d

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10875105, 60977101), the Aero-Science Foundation, China (Grant No. 2009017001), and the Open Foundation of State Key Laboratory of Applied Optics, China (Grant No. Y1Q03FQK09).

† E-mail: cenzf@zju.edu.cn