

文章编号 1004-924X(2003) 04-0416-05

# 双胶合透镜的三维成像研究

张耀举<sup>1</sup>, 肖化层<sup>2</sup>

(1. 温州师范学院 物理系, 浙江 温州 325027; 2. 温州师范学院 生物系, 浙江 温州 325027)

**摘要:**应用标量衍射理论分析了双胶合透镜的三维超分辨成像特性。对于所设计的双胶合透镜, 数值模拟表明, 焦平面上主瓣的强度是第 1 旁瓣的 57.14 倍, 是单一个透镜主瓣强度的 2.25 倍, 而主瓣的半径则是单一个透镜的 0.49 倍; 轴线方向上, 主瓣与第 1 旁瓣的强度之比与单一个透镜的基本相同, 但是双胶合透镜的焦深则比单一个透镜的小 0.25 倍。说明双胶合透镜在横向和轴向同时具有较强的超分辨能力。通过与加圆环光瞳或加相位光瞳的方法比较发现, 双胶合透镜具有较好的三维成像能力, 可以作为共焦 3D 成像和近场光学记录的理想光学器件。

**关键词:** 双胶合透镜; 分辨率; 焦距; 共焦三维成像

中图分类号: O436.1/TH703 文献标识码: A

## Study of 3-D image with a doublet

ZHANG Yao ju<sup>1</sup>, XIAO Hua ceng<sup>2</sup>

(1. Department of Physics, Wenzhou Normal College, Wenzhou 325027, China;

2. Department of Biologics, Wenzhou Normal College, Wenzhou 325027, China)

**Abstract:** The three dimensional super resolution properties of a doublet are analyzed by the scalar theory of diffraction. The numerical results from the designed doublet show that the intensity of the main disk is 57.14 times as much as that of the secondary disk, and 2.25 times as much as that of the main disk produced by only using a single lens. And the radius of the main disk is 0.49 times as much as that of a single lens. Though the intensity rate of the main disk and the secondary disk along the optical axis is basically the same as that of a single lens, the depth of focus of the doublet is smaller than that of a single lens. These results indicate that the super resolution in both transeverse and axial directions can be obtained meanwhile by the use of doublet. It is found by comparison that the 3-D imaging power of the doublet is better than those of either annular or phase pupils. Therefore, the doublet can become a perfect element in the 3-D imaging of confocal microscopes and in near-field optical recording.

**Key words:** doublet; resolution; focal length; confocal 3-D imaging

## 1 引言

光学显微术是一种观测微观世界而被研究了一个多世纪的古老课题。光学显微术的无破坏性对各种领域都很重要, 例如对生物和材料科学的

研究。普通光学显微镜的主要缺点是分辨率受到衍射极限的限制, 它的分辨率与照明波长是一个数量级; 另一个限制是它的有限焦深。这些限制使利用普通光学显微术对具有一定厚度的物体成像很困难, 因此对厚样品不可能三维(3D)成像<sup>[1]</sup>。

为了提高普通透镜的分辨率, 以利于共焦 3D 成像和高密度光存储, 人们提出了许多种在光学系统的透镜上加光瞳滤波器来实现超分辨的技术。如带中心遮挡的圆环<sup>[2,3]</sup>、漏光型环形光瞳<sup>[4,6]</sup>、相位型光瞳<sup>[7,9]</sup>和光栅<sup>[10]</sup>等。这些光瞳提高了 2D 成像的分辨率, 但由于轴向方向的焦深得到了延长, 对共焦 3D 成像是适宜的。除此之外, 由于采用在透镜上加光瞳的方法, 所以光斑的强度均有所降低, 有的甚至降低 90% 以上<sup>[8]</sup>, 这就使光学系统的信噪比大大降低。

用两个透镜形成的组合透镜是一种取得短焦距、大放率率和较好成像质量的有效方法。这种方法已在天文望远镜和照相机中广泛使用<sup>[11]</sup>。1990 年, Mansfield 等<sup>[12]</sup>将两个分离的透镜(他们称为固体浸没透镜)应用于近场光存储中, 证明了在透镜的成像面上放一个半球型固体浸没透镜可以将显微镜的横向分辨率提高  $n$  ( $n$  为固体浸没透镜的折射率) 倍。最近, 有许多文献对固体浸没透镜的横向分辨率和偏振特性作了进一步的研究<sup>[13-15]</sup>, 也有文献利用两个分离的透镜取得高数值孔径透镜来提高光学系统的分辨率<sup>[16]</sup>。用标量衍射理论分析两个紧密胶合在一起的双胶合薄透镜的衍射成像特性, 发现它不仅有良好的横向分辨率, 而且有较高的轴向分辨率, 能够作为共焦 3D 成像的一种理想光学元件。

## 2 透镜标量衍射理论

根据标量衍射理论可以求出单位振幅平行光垂直入射半径为  $a$  的圆形透镜后, 透镜的焦平面附近的 3D 衍射场分布为<sup>[1,17]</sup>

$$U_3(v, u) = 2\pi i N \exp(-ikf) \exp\left(-\frac{iv^2}{4\pi N}\right) \int_0^1 \exp\left(\frac{iuv\rho^2}{2}\right) J_0(v\rho) \rho d\rho, \quad (1)$$

其中,  $f$  和  $N$  分别是透镜的焦距和菲涅耳数,  $k$  为波矢,  $J_0$  为第一类零阶 Bessel 函数。  $v$  和  $u$  分别为光学系统的横向和轴向光学坐标。

$$N = \frac{a^2}{\lambda f}, \quad \rho = r/a$$

$$v = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{a}{z} r_3 \approx \frac{2\pi}{\lambda} r_3 \sin \alpha \approx \frac{2\pi}{\lambda} r_3 NA$$

$$u = \frac{2\pi}{\lambda} a^2 \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{z}\right) \approx \frac{2\pi}{\lambda} \Delta z \sin^2 \alpha = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta z NA^2, \quad (2)$$

这里的 NA 为透镜的数值孔径。当  $u = 0$  时, 由式(2)可得焦平面上的衍射光强度分布为,

$$I(v) = |U_3(v, u = 0)|^2 = (\pi N)^2 \left[ \frac{2J_1(v)}{v} \right]^2, \quad (3)$$

当  $v = 0$  时, 沿轴向的强度分布为,

$$I(u) = |U_3(v = 0, u)|^2 = (\pi N)^2 \left[ \frac{\sin(u/4)}{u/4} \right]^2. \quad (4)$$

评价一个共焦 3D 成像系统的超分辨能力主要有以下四个指标: 一是横向分辨率, 用焦斑的半径或横向半高半宽表达。焦斑半径愈小, 横向分辨率愈高。二是纵向分辨率, 用焦深或纵向半高半宽表达。焦深愈小, 纵向分辨率愈高。三是主光斑的强度。主光斑的强度愈大, 信噪比愈大。四是主瓣强度与第一个旁瓣强度之比。比值愈大, 对比度愈大, 分辨率愈高。

从(3)式可得横向光强一级极小在 Bessel 函数的第一个零点处, 即  $v_1 = 3.83171$ , 则焦斑的半径为

$$r_d = v_1 f N / 2\pi a = 0.61 \frac{f\lambda}{a}, \quad (5)$$

从(4)式可得纵向光强第一级极小在  $u_1 = 4\pi$  处, 焦深为

$$\Delta f = u_1 \frac{N^2}{2\pi a^2} = \frac{2N^2}{a^2}, \quad (6)$$

焦面上光斑的最大光强为

$$I_m = (\pi N)^2 = \frac{\pi^2 a^4}{\lambda^2 f^2}. \quad (7)$$

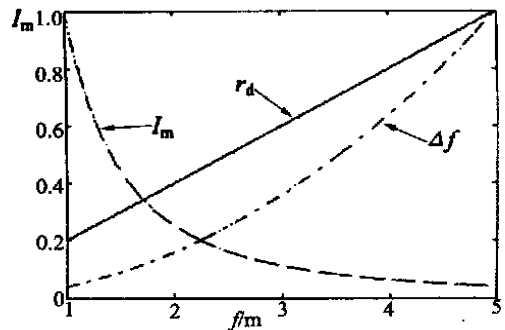


图 1 归一化的焦斑半径  $r_c$ 、离焦量  $\Delta f$  和焦斑的最大光强  $I_m$  随焦距  $f$  的变化

Fig. 1 Normalized radius  $r_d$  of the disk, off-focus length  $\Delta f$  and maximum intensity  $I_m$  of the disk vs the focus length  $f$

由式(5)-(7)可见,在透镜的光瞳半径  $a$  一定时,  $f$  越小, 焦斑半径  $r_d$  和焦深  $\Delta f$  均减小, 而光斑强度  $I_m$  却增加, 如图 1 所示。这就是说, 只要采取一定的办法减小焦距, 就可以使横向和纵向的分辨率同时得到提高, 而且还可以增加中心光斑的强度, 提高信噪比。

### 3 3-D 共焦成像双胶合透镜的设计与数值模拟

只要能使透镜系统的焦距减小, 就可以使分辨率得到提高。为此, 将两个透镜胶合在一起组成双胶合透镜, 如图 2 所示。  $n_2$  和  $n_3$  分别为左右两透镜的折射率,  $D_1$  和  $D_2$  分别为这两个透镜的厚度,  $R_1$ 、  $-R_2$ 、  $-R_3$  分别为三个球形曲面的半径。应用矩阵方法, 可以求出这个双胶合透镜总的光焦度为

$$\Phi_{\text{sys}} = \frac{n_2 - n_1}{R_1} + \frac{n_3 - n_2}{R_2} + \frac{n_4 - n_3}{R_3}, \quad (8)$$

当  $n_1 = n_4 = 1$  时, 薄透镜系统的焦距为,

$$f = \frac{f_0}{1 + (n_3 - 1) \frac{R_3 - R_2}{R_3 R_2} f_0}, \quad (9)$$

其中  $f_0$  为左边单个透镜的焦距,

$$f_0 = \frac{R_2 R_1}{(R_2 - R_1)(n_2 - 1)}. \quad (10)$$

显然, 只要式(9)中的  $R_3 - R_2 > 0$ , 就可使  $f < f_0$ , 这时系统具有超分辨率。

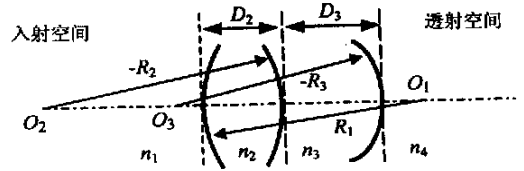


图 2 双胶合透镜结构

Fig. 2 Scheme of a doublet

如果图 2 中右面的透镜的表面向左凹, 双胶合透镜的焦距仍由(9)式表达, 只是此时  $R_3 > 0$ 。要使  $f < f_0$ , 必须使  $R_3 - R_2 < 0$ 。这是不可能的(因为此时  $R_3 > 0$ ,  $R_2 < 0$ )。

表 1 几个不同的透镜系统的一些典型参数

Tab. 1 Some typical parameters for several different systems of lens

	$f / \text{m}$	$NA$	$\Delta f / \text{nm}$	$r_d / \text{nm}$	$I_0 / \text{a. u.}$	$I_1 / \text{a. u.}$	$I_0 / I_1$	$I_1' / \text{a. u.}$	$I_0 / I_1'$
裸透镜	1.0	0.6	955.9	556	0.4445	0.0078	56.99	0.0210	21.17
环形光瞳 <sup>(a)</sup>	1.0	0.6	1636.6	417	0.1482	0.0194	7.639	0.0070	21.17
相位光瞳 <sup>(b)</sup>	1.0	0.6	1665.6	417	0.1951	0.0255	7.651	0.0121	21.21
双胶合透镜 <sup>(c)</sup>	0.5	0.9	241.4	277	1.0000	0.0175	57.14	0.0472	21.19

(a) 一使用参考[13]的方法; (b) 一使用参考[7]的方法; (c) 一本文结果

为了说明双胶合透镜的分辨效果, 下面给出了本方法与环形光瞳、相位光瞳两种方法的计算比较。计算中取  $n_2 = 1.5$ ,  $n_3 = 2$ ,  $n_1 = n_4 = 1$ ,  $R_1 = 1 \text{ m}$ ,  $R_2 = -1 \text{ m}$ ,  $R_3 = -0.5 \text{ m}$ ,  $a = 0.6 \text{ m}$ , 中心遮挡半径或圆环光束的内环半径  $\varepsilon = 0.65a$ 。计算结果显示在表 1 和图 3 中。表 1 中的  $I_0$  和  $r_d$  分别代表焦面上主瓣的强度和半径,  $\Delta f$  代表轴线上主瓣的焦深,  $I_1'$  代表轴线上第 1 旁瓣的强度,  $I_0 / I_1$  和  $I_0 / I_1'$  分别代表焦面和轴线上主瓣的对比度。由表 1 和图 3 可见, 本文方法得到的焦斑半径和焦深比其他两种方法所得的结果小, 而且小于裸透镜

(单一个透镜)时的值, 这说明双胶合透镜在横向和纵向两个方向上使单个透镜的分辨率都得到了提高。在束腰平面上主焦斑与第 1 旁瓣的最大光强之比( $I_0 / I_1$ ) 等于 57.14, 约是圆环光瞳或相位光瞳情况下的 7.5 倍, 这说明此时的成像光斑具有很高的对比度。在轴线方向, 焦点的光强与第 1 个次焦点的光强之比( $I_0 / I_1'$ ) 与另两种方法的结果基本相同。从图 3 和表 1 还可以计算出主焦斑的最大光强是相位光瞳 5.13 倍, 是圆环光瞳的 6.75 倍, 甚至比裸透镜的还要大 2.25 倍。这就是说, 双胶合透镜系统具有很大的 SNR(信噪比)。

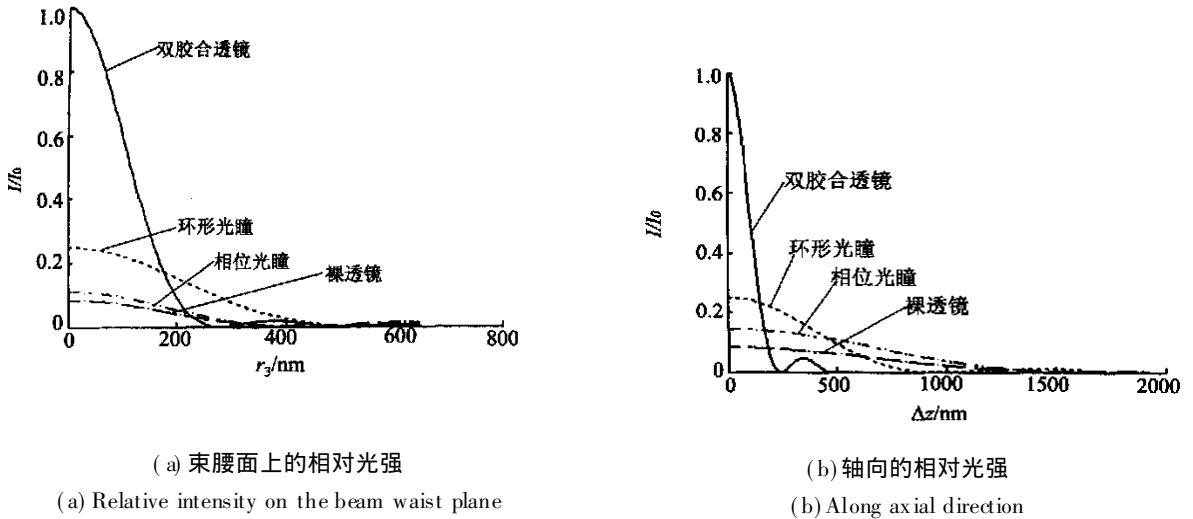


图 3 束腰上的相对光强和轴向上的相对光强

Fig. 3 Relative intensity on the beam waist plane (a) and along axial direction (b)

双胶合透镜的衍射光强比裸透镜时的要大。因为采用本文所设计的双胶合透镜, 使透过第一个透镜的光经第二个透镜进一步聚焦, 原来透过透镜发散的部分光通过第二个透镜时得到了会聚, 所以现在的焦斑光强比裸透镜时的大。

### 4 结 论

分析和计算了双胶合透镜的 3-D 分辨特性。结果表明: 它不仅具有较高的横向分辨率, 而且也有

较高的纵向分辨率, 通过改变双胶合透镜的参数, 如曲率半径和折射率等, 可任意改变成像分辨率。对于文中给定的结构参数, 在横向方向上它的主瓣强度约是第 1 级旁瓣强度 57 倍, 有很高的对比度; 在纵向方向上, 主瓣强度与第 1 级旁瓣强度之比与其他方法的结果基本相同; 双胶合透镜衍射光的能量不仅不减小, 反而大大增加。因此双胶合透镜将是一种比较理想的共焦 3-D 成像光学和近场光学记录元件。

### 参考文献:

[1] 顾 M. 共焦显微术的 3-D 成像原理[M]. 北京: 新时代出版社, 2000.  
 GU M. *Principles of three-dimensional imaging in confocal microscopes* [M]. New Period Press, 2000. (in Chinese)

[2] WOLFORD W T. Use of annular aperture to increase focal depth[J]. *J Opt Soc A m*, 1960, 50(8): 749-753.

[3] CORRAL M M, AUDRES P, CASTANEDA J O, *et al.* Tunable axial superresolution by annular binary filters, application to confocal microscopy[J]. *Opt Commun*. 1995, 119(5,6): 491-498.

[4] SIERACKI C K, HANSEN E W. A leaky annular pupil for improved lateral resolution confocal fluorescence microscopy [J]. *SPIE*, 1994, 2148: 120-126.

[5] SHEPPARD C J R. Leaky annular pupils for improved axial imaging[J]. *Optik*, 1995, 99(1): 32-34.

[6] 邓小强, 王桂英, 徐至展. 三维超分辨光瞳滤波器[J]. 中国激光, 2001, 28(5): 459-462.  
 DENG X Q, WANG G Y, XU ZH ZH. 3-D superresolution pupil filter[J]. *Chinese Journal Laser*, 2001, 28(5): 459-462. (in Chinese)

[7] ANDO H. Phase shifting apodizer of three or more portions[J]. *Jpn J Appl Phys*, 1992, 31(2B): 557-567.

[8] 王海风, 干福熹, 陈仲裕, 等. 一种新型衍射超分辨光学器件[J]. 光学学报, 2001, 21(5): 593-596.  
 WANG H F, GAN F X, CHEN ZH Y. A new superresolution element[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(5): 593-596. (in Chinese)

[9] 陶少华, 田永红, 陈培锋, 等. 用衍射光学元件增加出射光束的焦深[J]. 光学精密工程, 1998, 6(3): 70-73.  
 TAOSH H, TIAN Y H, CHEN P F, *et al.* Methods of improving a laser beam's depth of focus with diffractive optical element

- ements[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1998, 6(3): 70-73. (in Chinese)
- [10] NAMIOKA T T, KOIKE M, MASUI S. Geometric Theory for the design of multi element optical systems[J]. *光学精密工程*. 2001, 9(5): 458-466.
- NAMIOKA T T, KOIKE M, MASUI S. Geometric theory for the design of multi element optical systems[J]. *Optics and Precision Engineering*. 2001, 9(5): 458-466. (in Chinese)
- [11] KLEIN N V, FURTA J T E. *Optics* [M]. John Wiley & Sons Inc, New York, 1986. 174-183.
- [12] MANSFIELD S M, KINO G S. Solid immersion microscope[J]. *Appl Phys Lett*, 1990, 57(24): 2615-2616.
- [13] TERRIS B D, MANM IN H J, RUGAR D, et al. Near field optical data storage using a solid immersion lens[J]. *Appl Phys Lett*, 1994, 65(4): 388-390.
- [14] GUO F, SCHLESINGER T E, STANCIL D D. Optical field study of near field optical recording with solid immersion lens[J]. *Appl Opt*, 2000, 39(2): 324-332.
- [15] 谢建平, 卢拥华, 王沛, 等. 用角谱方法分析固体浸没透镜的近场光场[J]. *光学学报*, 2002, 22(4): 413-416.
- XIE J P, LU Y H, WANG P, et al. Analysis of near field distribution of solid immersion lens by angular spectrum[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(4): 413-416. (in Chinese)
- [16] 郭培基, 余景池, 孙侠菲. 一种大数值孔径小非球面检测用补偿器设计[J]. *光学精密工程*, 2002, (5): 518-522.
- GUO P J, YU J CH, SUN X F. Null lens design for small a spherical surface with large NA[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, (5): 518-522. (in Chinese)
- [17] 苏显渝, 李继陶. *信息光学*[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- SU X Y, LI J T. *Information optics* [M]. Beijing: Science Press, 1999. (in Chinese)

作者简介: 张耀举(1960-), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 温州师范学院副教授, 主要从事衍射光学研究和教学工作, E-mail: zhangyj@wznc.zj.cn

## 《发光学报》(双月刊)

——物理学类; 无线电电子学、电信技术类核心期刊

《发光学报》是中国物理学会发光分科学会与中国科学院长春光学精密机械与物理研究所共同主办的中国物理学会发光分科学会学术会刊。该刊是以发光学、凝聚态物质中的激发过程为专业方向的综合性学术刊物。

《发光学报》于1980年创刊, 曾于1992年, 1996年和2000年连续三次被《中文核心期刊要目总览》评为“物理学类核心期刊”, 并于2000年同时被评为“无线电电子学、电信技术类核心期刊”。2000年获中国科学院优秀期刊二等奖。现已被《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》和“万方数据资源系统”等列为源期刊。英国《科学文摘》(SA)自1999年始; 美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》(PЖ)自2000年始已定期收录检索该刊论文。2001年在国家科技部组织的“中国期刊方阵”的评定中, 《发光学报》被评为“双效期刊”, 首批进入“中国期刊方阵”。2002年获中国科学院2001~2002年度科学出版基金“择重”资助。本刊内容丰富、信息量大, 主要反映本学科专业领域的科研和技术成就, 及时报道国内外的学术动态, 开展学术讨论和交流, 为提高我国该学科的学术水平服务。

《发光学报》为双月刊, 大16开本, 100页, 国内外公开发行。2003年国内定价: 12.00元, 全年72元, 全国各地邮局均可订阅。《发光学报》欢迎广大作者、读者广为利用, 踊跃投稿。

地 址: 长春市人民大街140号

《发光学报》编辑部

邮 编: 130022

电 话: (0431)5261594

E-mail: fgxb@ciomp.ac.cn

国内统一刊号: CN22-1116/O4

国际标准刊号: ISSN 1000-7032

国内邮发代号: 8-173

国外发行代号: 4863Q

http://www.ciomp.ac.cn