

基于偏振光相位调制的超衍射极限空间结构光研究

袁强 赵文轩 马睿 张琛 赵伟 王爽 冯晓强 王凯歌 白晋涛

Sub-diffraction-limit spatially structured light pattern based on polarized beam phase modulation

Yuan Qiang Zhao Wen-Xuan Ma Rui Zhang Chen Zhao Wei Wang Shuang Feng Xiao-Qiang  
Wang Kai-Ge Bai Jin-Tao

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), **66**, 110201 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.110201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.110201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I11>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同粒径 Janus 微球的自驱动: 实验及驱动机制对比

Two different self-propulsion types of Janus microspheres: from the comparative experiments and driving mechanisms

物理学报.2016, 65(22): 220201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.220201>

广义平面应变锂离子电池柱形梯度材料颗粒电极中扩散诱导应力分析

Stress analysis of a cylindrical composition-gradient electrode of lithium-ion battery in generalized plane strain condition

物理学报.2016, 65(10): 100201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.100201>

硅薄膜太阳能电池表面纳米线阵列光学设计

Optical design of nanowire array on silicon thin film solar cell

物理学报.2016, 65(7): 070201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.070201>

广义非线性薛定谔方程描述的波坍缩及其演变

Collapse and evolution of wave field based on a generalized nonlinear Schrödinger equation

物理学报.2016, 65(4): 040201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.040201>

点堆中子动力学方程组曲率权重法的解

Curvature weight method of solving the point reactor neutron kinetic equations

物理学报.2015, 64(22): 220201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.220201>

# 基于偏振光相位调制的超衍射极限 空间结构光研究\*

袁强<sup>1) #</sup> 赵文轩<sup>1) #</sup> 马睿<sup>2)</sup> 张琛<sup>1) †</sup> 赵伟<sup>1)</sup> 王爽<sup>1)</sup> 冯晓强<sup>1)</sup>  
王凯歌<sup>1) †</sup> 白晋涛<sup>1)</sup>

1) (西北大学光子学与光子技术研究所, 国家光电技术与功能材料重点实验室培育基地, 陕西光电技术实验室, 国家光电技术与纳米功能材料和应用国际研究中心, 西安 710069)

2) (西安工业大学光电学院, 西安 710021)

(2017年2月17日收到; 2017年4月10日收到修改稿)

具有超衍射极限尺寸的空间结构光在远场超分辨成像、光镊、微纳米加工等领域都有着重要的应用. 本文基于偏振光的相位调制原理, 结合光学实验与光场数值模拟开展了在空间生成具有超衍射极限尺寸的空间结构光的研究. 首先设计了一种兼备圆形 $\pi$ 与涡旋形 $2\pi$ 相位板特点的新型相位板, 并且实验观察到了高数值孔径系统中新型相位板调制圆偏振高斯光的焦点处的空间结构光形貌. 随后通过结合矢量衍射积分理论的数值模拟, 得出了一种具有超衍射极限尺寸、且同时呈现中心对称与轴对称的空间结构光. 最后, 本文详细讨论分析了新型相位板调制圆偏振光、线偏振光、径向偏振光以及角向偏振光所获得的空间结构光分布特点. 结果显示, 圆、线、径向与角向偏振条件下得到的空间结构光横向最小暗斑的半高全宽分别为 $0.31\lambda$ ,  $0.32\lambda$ ,  $0.24\lambda$ 和 $0.36\lambda$ ; 在光轴上, 线、径向与角向偏振光情况下的中心暗斑的半高全宽分别为 $0.8\lambda$ ,  $0.78\lambda$ ,  $0.76\lambda$ , 而圆偏振光在轴向方向没有电矢量分布.

**关键词:** 相位调制, 超衍射极限, 结构光, 衍射积分理论

**PACS:** 02.60.Cb, 42.25.Fx, 42.25.Hz, 42.25.Ja

**DOI:** 10.7498/aps.66.110201

## 1 引言

纳米技术是本世纪科学技术发展的重要推动力量, 极大地促进了半导体制造、医学、生物以及材料等众多领域的研究与发展. 光波具有穿透性好、非接触、高灵敏以及操作灵活等特点, 一直以来是实现纳米观测、表征以及操作的重要手段.

近年来, 通过调制光束时间与空间特性实现的结构光在突破光学衍射极限、操作空间粒子以及纳米尺度加工方面取得了许多显著的成就<sup>[1-4]</sup>.

如: 受激发射损耗(stimulated emission depletion, STED)显微镜技术, 通过使用一个中心为零光强的环形结构光, 极大地压缩了荧光显微镜的点扩散函数, 从而突破了光学衍射极限, 使远场光学显微镜在横向的分辨率达到 $5.8\text{ nm}$ <sup>[5-9]</sup>. 具有中心暗斑的空间结构光同样也是光镊技术的核心, 用来在二维空间上稳定俘获低折射率或者不透明的微粒<sup>[10-12]</sup>. 在微纳加工领域, 通过调制出具有空间结构的抑制交联反应的光束, 可以提高远场加工精度, 加工出尺寸小于 $130\text{ nm}$ 的纳米线和直径为 $40\text{ nm}$ 的纳米点<sup>[13,14]</sup>, 或者直接通过结构光加工出

\* 国家自然科学基金青年科学基金(批准号: 11504294)、国家自然科学基金面上项目(批准号: 61378083)、国家自然科学基金重大研究计划培育项目(批准号: 91123030)、科技部中美合作项目(批准号: 2011DFA12220)、陕西省自然科学基金基础研究计划青年人才项目(批准号: 2016JQ1030)和陕西省自然科学基金(批准号: 14JS106, 2013SZS03-Z01)资助的课题.

# 共同第一作者

† 通信作者. E-mail: wangkg@nwu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: nwuzchen@nwu.edu.cn

纳米柱/孔复合结构及其阵列<sup>[15,16]</sup>.

获得空间结构光的方法包括: 相位板直接调制、数字微镜装置(digital micromirror device, DMD)以及空间光调制器(space light modulator, SLM)调制. Beijersbergen等<sup>[17]</sup>实验研究了利用螺旋相位板调制共焦显微镜系统激光波前所获得的结构光. Hotta等<sup>[18]</sup>开展了基于聚合物薄膜的相位板获得环形结构光的研究. Bingen等<sup>[19]</sup>通过区域分割的相位板获得了多路并行环形结构光阵列. Ren等<sup>[20]</sup>在DMD上加载一系列叉状光栅, 最终生成了不同拓扑指数的拉盖尔-高斯光束. Qian等<sup>[21]</sup>利用DMD在结构光照明显微镜中生成了周期分布的条纹光. Hermerschmidt等<sup>[22]</sup>使用SLM在空间获得了阱域分布; Leonardo等<sup>[23]</sup>利用SLM产生了多个阱域用于对多粒子进行操控. 其中, 相位板直接对光束调制的方式相比DMD与SLM调制方法更为简单、经济和有效. 考虑到高数值孔径光学系统中入射光的偏振态也会对光斑形貌有直接的影响, 因此, 通过偏振高斯光结合特殊设计的相位板来调制产生具备小于衍射极限尺寸结构的激光光斑, 将有可能为许多应用领域创造出丰富而且有用的激光光斑.

在本文中, 首先基于光波前调制原理结合光束偏振特性完成了一种新型相位板的设计. 通过自行

制备的圆形 $0-\pi$ 相位板与涡旋型 $0-2\pi$ 相位板的组合, 实现了新型相位板的功能, 并且实验观察了其调制圆偏振高斯激光所得到的空间结构光形貌. 然后, 在矢量衍射积分理论的基础上, 结合数值模拟分析得出光斑具有小于衍射极限尺寸且呈现一定对称性的空间结构光. 最后, 对使用新型相位板调制圆偏振、线偏振、径向偏振以及角向偏振光生成的具有超衍射极限尺寸的空间结构光的特性进行了讨论与分析.

## 2 实验方法

### 2.1 相位调制原理

中心圆形区域为 $\pi$ 相位变化的相位板(以下简称圆形PI相位板)与中心为奇点相位从 $0-2\pi$ 螺旋变化的相位板(简称涡旋 $2\pi$ 相位板)是最为广泛使用的相位板, 可以在高数值孔径系统中产生具有超衍射极限尺寸的环形结构光光斑. 前者在光轴向方向具有对称的明亮旁瓣分布, 而后者则在水平方向具有中心对称图样. 新型相位板的设计结合考虑了以上两种相位板的调制特点, 旨在形成在轴向以及横向都具有调制效果的超衍射极限尺寸结构光斑.

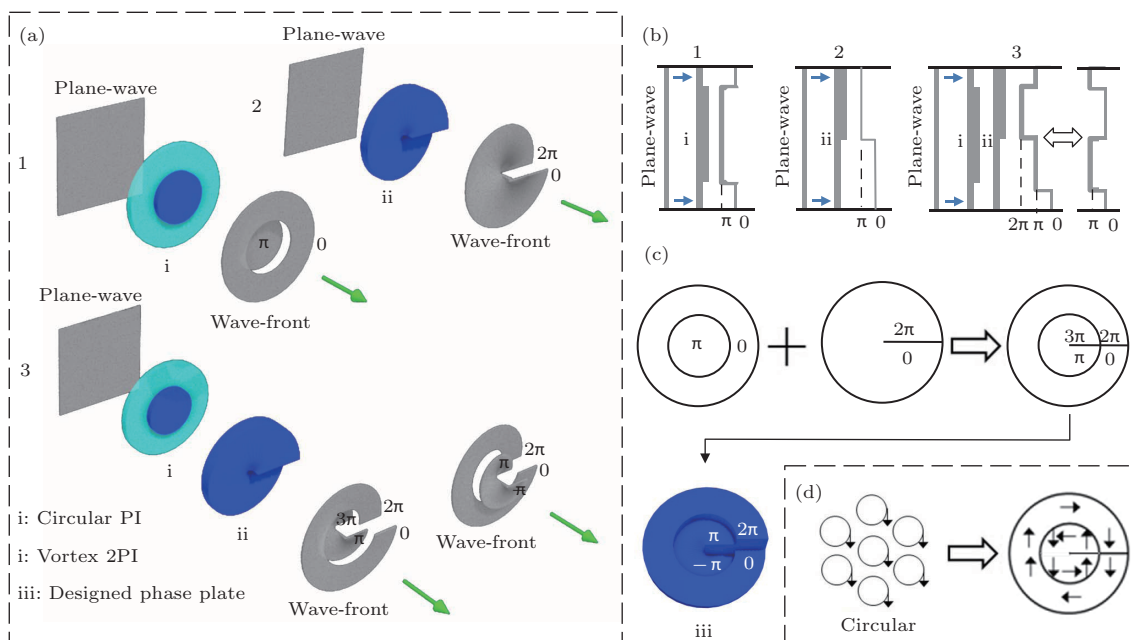


图1 (网刊彩色) 基于相位调制原理的新型相位板设计 (a) 相位板调制光波前示意图; (b) 调制后的光波前截面; (c) 新型相位板设计结果; (d) 新型相位板调制圆偏振光示意图

Fig. 1. (color online) Design of novel phase plate based on phase modulation principle: (a) Schematic diagram of wavefront modulated with phase plate; (b) wavefront cross profile after modulation; (c) design of the novel phase plate; (d) schematic drawing of modulating circularly polarized beam with the designed phase plate.

图 1 展示了基于相位调制原理的新型相位板设计. 图 1(a) 为使用相位板调制光波前的原理, 其中“i”与“ii”分别代表了圆形 PI 相位板以及涡旋 2PI 相位板. 过程“1”, “2”分别展示了“i”, “ii”相位板对平面入射波的调制: 当平面波经过“i”时, 由于中心区域材质的厚度与边缘区域不同, 中心区域的波面产生了  $\pi$  相位的延迟; 当平面波经过“ii”时, 相位板的厚度绕中心奇点沿顺时针方向递增, 使波前出现了递增的、相位由 0 到  $2\pi$  的变化. 过程“3”为平面波依次经过相位板“i”, “ii”后平面波的波前变化示意: 波前将变化分为涡旋变化的内、外两部分; 内部的涡旋区域其半径等于“i”中心圆形区域半径, 相位变化为顺时针  $\pi-3\pi$  (等同于由  $-\pi-\pi$ ); 外部涡旋部分相位变化依然为顺时针  $0-2\pi$ .

图 1(b) 为图 1(a) “1-3”过程调制后的光波前截面. 可知, 过程“1”中, 光束中心部分的波前具有  $\pi$  相位的延迟; 过程“2”中, 处于对角线上的波前始终保持  $\pi$  相位延迟. 这样的光束经透镜汇聚后将会在焦点处产生干涉相消, 从而生成空间结构光. 当平面波顺次经过“i”, “ii”后, 光束的波前则呈锯齿状分布, 且以中心奇点对称分布, 相对位置的波前相差  $\pi$  的相位.

图 1(c) 为新型相位板的设计结果, 可以看出新

型相位板的形状如图中“iii”, 中间部分可以对平面波产生沿顺时针方向  $-\pi-\pi$  的相位渐变; 外围部分则可以对平面波产生沿顺时针方向  $0$  向  $2\pi$  相位变化. 图 1(d) 展示了当入射光为圆偏振光入射时新型相位板的调制结果: 假设圆偏振光起始状态向下振动, 那么经过“iii”后处于对角位置上的光线振动方向恰好完全相反, 这种振动分布有利于在透镜焦点处产生干涉相消, 生成具有超衍射极限尺寸的结构光.

## 2.2 实验装置

### 2.2.1 中心圆形 PI 相位板的设计与加工

实验中使用了自行设计加工的圆形 PI 相位板. 图 2(a) 为圆形 PI 相位板的设计原理, 当一系列平面波所包含的两条光线在不同折射率介质中传播相同长度  $d$  后, 两条光线由于在不同介质中的传播速度不同最终产生光程差. 当二者相位相差满足  $d(n_1 - n_0)/\lambda = \pi$  时, 相交的两束光产生干涉现象. 其中,  $n_0 = 1$  为空气折射率,  $n_1 = 1.46$  为融石英折射率, 入射光波长  $\lambda$  为 532 nm, 计算可知, 相位板镀膜厚度  $d$  应为 578.3 nm. 相位板的加工采用电子束蒸镀, 膜料为融石英, 基底采用 K9 玻璃.

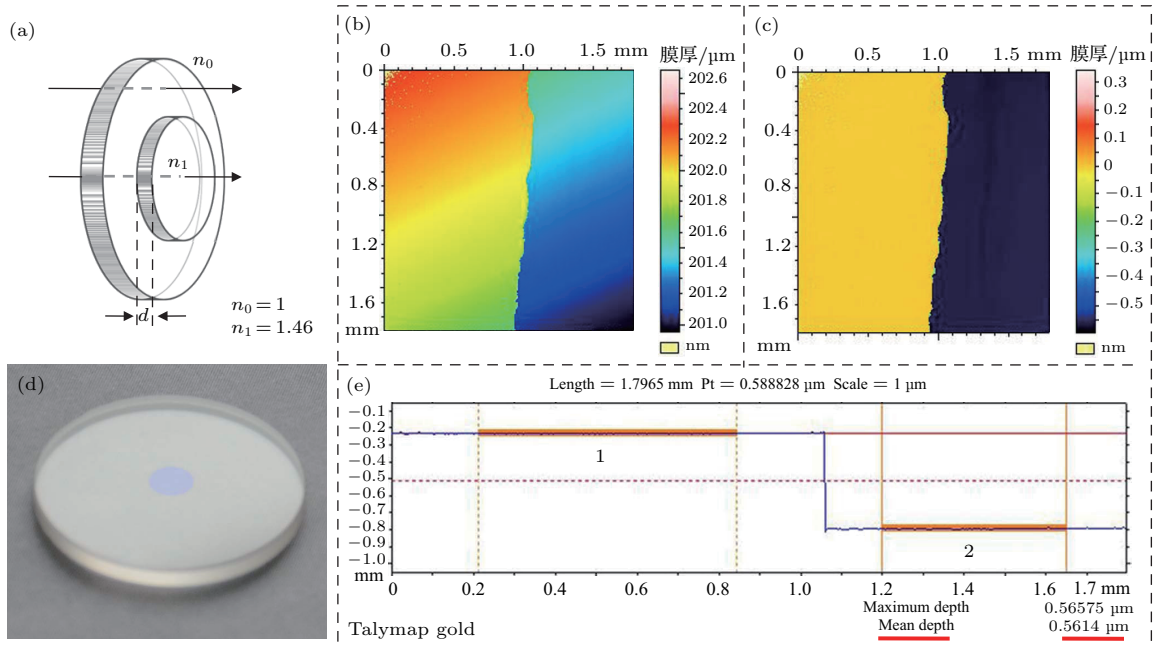


图 2 (网刊彩色) 圆形 PI 相位板设计及加工 (a) 圆形 PI 相位板设计原理; (b), (c), (e) 圆形 PI 相位板镀膜效果; (d) 圆形 PI 相位板加工成品

Fig. 2. (color online) Design and preparation of circular PI phase plate: (a) Schematic diagram of circular PI phase plate designing; (b), (c), (e) measurement of circular PI phase plate coating; (d) the prepared PI phase plate.

相位板膜厚采用白光干涉仪 (Talysurf CLI 2000, 2 New Star Road, Leicester, LE4 9JQ UK) 测量, 扫描区域尺寸为  $1.7965 \text{ mm}^2$ . 图 2(b) 为白光干涉仪扫描所得的光学图像, 浅色部分为镀膜区, 深色部分为基底区域. 图 2(c) 是将图 2(b) 通过 TalyMap Gold 软件转换后得到的膜厚的信息, 根据色度标尺可知膜厚介于  $500\text{--}600 \text{ nm}$  之间. 图 2(e) 为膜厚测量的高度效果, 线段 1, 2 分别对应图 2(c) 中镀膜区域与基底区域的表面高度, 可知样品上下表面的最大高度落差  $P_t = 0.58825 \text{ }\mu\text{m}$ , 膜层最大厚度为  $565.75 \text{ nm}$ , 平均厚度为  $561.4 \text{ nm}$  (红线标注部分). 相位板加工的平均误差约为  $16.9 \text{ nm}$ , 导致的两束光的干涉相消处光强  $I < 1\%$ , 对干涉消光效果影响非常小. 加工成品如图 2(d) 所示, 基底规格为直径  $\Phi = 25.4 \text{ mm}$ , 厚度为  $3 \text{ mm}$ ; 镀膜区域为圆形, 直径为  $4 \text{ mm}$ , 约等于入射光直径的  $0.707$ . 让自然光射入所加工相位板表面, 可以看到基底上表面中心有一块泛淡紫色的圆形区域, 即

为所镀的融石英薄膜.

### 2.2.2 实验光路

通过搭建相关的实验光路, 可以观察新型相位板在高数值孔径系统中对光束的调制效果. 图 3(a) 为实验光路原理图: 由  $532 \text{ nm}$  波长激光器 1 发出的线偏振光经过光束开关与整形系统 2 后, 依次经过一枚二分之一波片 3 与四分之一波片 4 后转换为圆偏振光; 光束随后依次通过一枚圆形 PI 相位板 5 与一枚涡旋 2PI 相位板 (VPP-1c, RPC Photonics) 6 进行光束波前调制; 最后通过高反镜 7 反射进入高数值孔径物镜 ( $100\times$ ,  $NA = 1.4$ , UplansApo, Olympus) 8. 物镜焦平面附近放置一枚表面平整度为  $\lambda/10$  的镀银反射镜 9, 其移动通过调节纳米平移台 10 实现. 由镀银反射镜 9 反射的光束经过高反镜 7 后的残余光束由 CCD 相机 11 收集成像. 图 3(b) 为相位板组合的实物图, 实验中采用圆形 PI 相位板与涡旋 2PI 相位板的组合来实现新型相位板的功能.

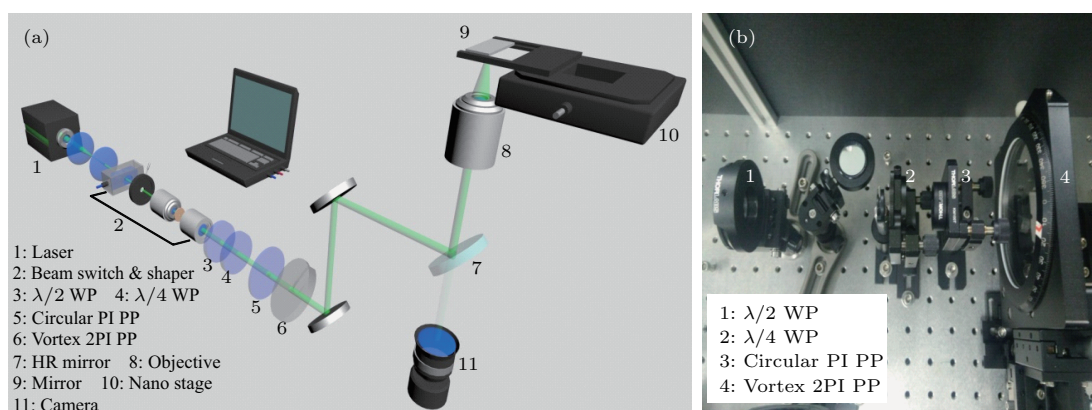


图 3 (网刊彩色) 实验装置 (a) 光路原理图; (b) 相位板组合

Fig. 3. (color online) Experimental setup: (a) Schematic diagram; (b) combination of phase plates.

## 3 结果与讨论

### 3.1 空间结构光图样

图 4 为使用 CCD 相机观察到的物镜焦平面附近镀银反射镜处于不同轴向位置的激光光斑图样. 实验中, 通过控制纳米平移台上下移动所观察到的光斑轮廓与形貌, 首先确定出光斑图案最清晰处为物镜的最佳焦平面, 即物镜焦点的中心位置所处的平面; 随后, 以最佳焦平面为中心位置, 分别控制纳米平台沿  $z$  轴正、负两个方向移动, 对光斑图样进行观察. 图 4(c) 激光图样的像最为清晰, 所处位置

应当为物镜的最佳焦平面. 以镜片靠近物镜方向为正方向、远离物镜方向为负方向, 图 4(a) 和图 4(b) 分别为距最佳焦平面  $-500 \text{ nm}$ ,  $-200 \text{ nm}$  处时观察到的激光图样; 图 4(d) 和图 4(e) 分别为距最佳焦平面  $200 \text{ nm}$ ,  $500 \text{ nm}$  处观察到的激光图样.

由图 4(c) 可以看出, 当处于最佳焦平面时激光图样最为清晰, 激光图样为中心具有暗斑的环形光束. 当纳米平移台离开最佳焦平面时, 由图 4(b) 可以看出激光环形图样的中心暗斑处的光强增加, 暗斑区域的图样开始模糊. 当纳米更加远离最佳焦平面时, 由图 4(a) 可以看出激光图样中心依然为一暗

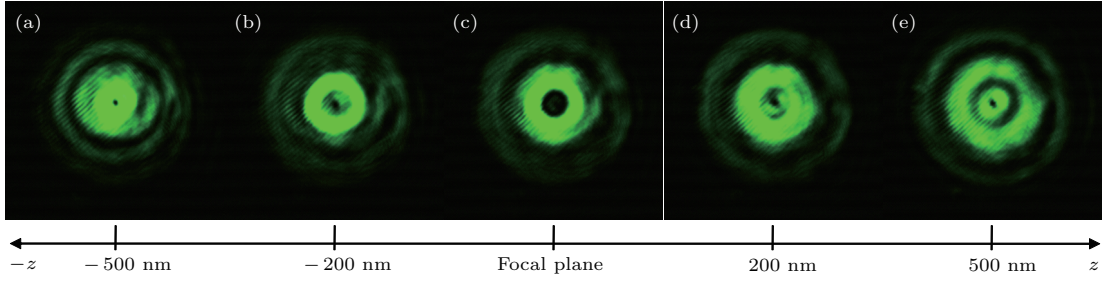


图4 (网刊彩色) 距最佳焦平面不同位置光斑图样 (a)  $-500$  nm; (b)  $-200$  nm; (c)  $0$ ; (d)  $200$  nm; (e)  $500$  nm  
 Fig. 4. (color online) Beam patterns on the planes that axially away from the best focal plane: (a) At  $-500$  nm; (b) at  $-200$  nm; (c) at  $0$  nm; (d) at  $200$  nm; (e) at  $500$  nm.

斑区域, 但是其尺寸小于最佳焦面处环形光中心暗斑的尺寸. 当纳米平移台从最佳焦平面开始, 逐步移动靠近物镜时, 由图4(d)可以看出激光图样的中心暗斑处光强增加、暗斑区域图样开始模糊化; 处于这一位置的激光图样与图4(b)有相似之处, 但是激光光斑的强度较图4(b)弱、图样轮廓也更为模糊. 由图4(e)可以看出, 当平台继续移动, 距离最佳焦平面为 $500$  nm时, 激光图样中心仍然为一暗斑, 暗斑的尺寸与图4(a)中的中心暗斑尺寸相近; 但激光图样的光强较图4(a)弱、图样更模糊且出现了暗环. 这主要是高数值孔径物镜的焦深小, 当反射镜不断靠近物镜时, 物镜收集的光减少以及杂光与所收集的边缘光束共同导致. 综合图4中激光光斑的特点以及变化趋势可知, 使用所设计的新型相位板在调制圆偏振光的实验中形成了一种具有环形分布特点且中心暗斑尺寸可变的空

### 3.2 数值模拟

为了进一步揭示空间结构光形貌, 掌握不同参数下空间结构光分布规律, 基于衍射积分理论, 详细开展了由新型相位板调制多种偏振光所得空间结构光的特性研究. 在高数值孔径物镜像方, 以物镜焦点为原点建立柱坐标系. 根据衍射积分理论, 处于焦平面附近处任意一点 $p(r_p, \varphi_p, z_p)$ 的电场矢量 $\mathbf{E}$ 可以由下式给出:

$$\begin{aligned} & \mathbf{E}(\gamma_p, \varphi_p, z_p) \\ &= \frac{if}{\lambda} \iint_{\Omega} \sqrt{\cos \theta} \sin \theta \cdot E_0 \cdot \mathbf{V}(\theta, \varphi) \times \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} \\ & \times \exp \left\{ ikn [i\Delta\varphi(\theta, \varphi) + z_p \cos \theta \right. \\ & \left. + r_p \sin \theta \cos(\varphi - \varphi_p)] \right\} d\theta d\varphi, \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $f$  代表物镜的焦距,  $\lambda$  为入射光波长,  $\theta$  为光束传播方向与光轴的夹角,  $\varphi$  为出射平面上方位角坐标. 像方折射率  $n = 1.52$ ,  $\theta_{\max} = 67^\circ$ .  $E_0$  为物镜入瞳处的光强, 其表达式如(2)式所示.  $\mathbf{V}(\theta, \varphi)$  为物方到像方偏振态的转化矩阵.  $[p_x, p_y, p_z]$  为入射圆偏振光的偏振矩阵.  $k$  为波数,  $k = 2\pi n/\lambda$ .  $\gamma$  为光束截面参数用于描述物理通光孔径内的光束,  $\gamma = a/\omega$  (其中,  $a$  为通光孔径的半径、 $\omega$  为光腰处光束的大小).  $z_p$  为 $p$ 点在光轴的位置, 当 $p$ 点处于焦平面处,  $z_p = 0$ .

$$E_0 = I_0 \exp \left( - \frac{\gamma^2 \sin^2 \theta}{\sin^2 \theta_{\max}} \right), \quad (2)$$

其中,  $I_0$  为入射光强, 在计算中通常取值为1.

#### 3.2.1 圆偏振光

图5为高数值孔径系统中新型相位板调制圆偏振光所得光强空间分布. 由 $xz$ 平面内的光强度分布, 即图5(c)可知, 系统焦点所产生的空间结构光斑形状为一中间区域较宽、两端较窄的图样, 且图样以 $z, x$ 轴为对称轴分别呈左右、上下对称. 计算可知图样两端最窄处距焦点距离为 $0.9\lambda$ , 因此取 $z_p = z_{p1} = 0.9\lambda$ 与 $z_p = z_{p2} = 0\lambda$ 计算光强分布. 图5(a)和图5(b)分别为空间结构光在其最窄处( $z_{p1} = 0.9\lambda$ 处)截面与焦平面( $z_{p2} = 0\lambda$ )的强度分布, 可知在两个平面上光强的分布均为中心为暗斑的圆环状图样; 图5(a)的圆环光斑内径与外径的尺寸均小于图5(b)的圆环光斑.

对比图4中实验所观察到的空间结构光的特点, 可以明显地看到, 图5(a)和图5(b)的光斑形貌均为圆环且分别与图4(a)和图4(c)中相似; 同时, 图5(a)与焦平面的距离 $z_{p1} = 0.9\lambda = 478.8$  nm, 这接近图4(a)实验中的最佳焦平面距离( $500$  nm). 此外, 由图5可知, 空间结构光中心为暗斑, 当靠近最佳焦平面时暗斑尺寸逐步增大、离开最佳焦平面

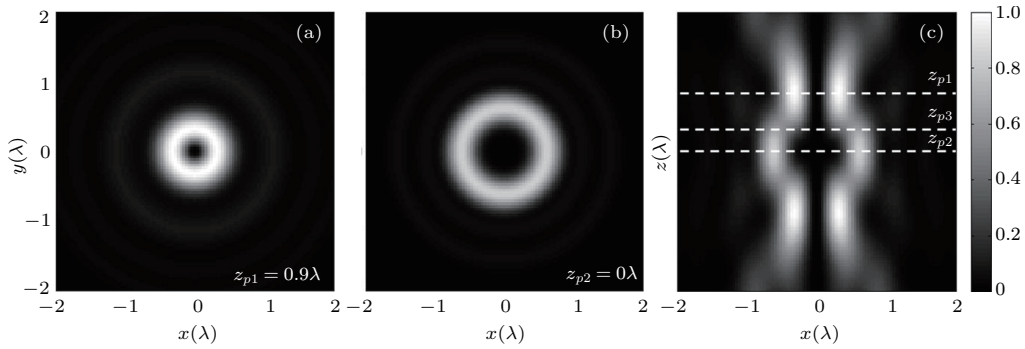


图5 新型相位板调制圆偏振光强度分布 (a) 距离焦平面  $0.9\lambda$  处; (b) 焦平面内; (c)  $xz$  平面内

Fig. 5. Intensity distribution of circular polarized beam modulation with the designed phase plate: (a) On the plane that  $0.9\lambda$  away from the focal plane; (b) on the focal plane; (c) on  $xz$  plane.

处时暗斑尺寸减小, 这与图4实验观察到的暗斑尺寸的变化趋势一致. 图4(b)、图4(d)中的光斑图样则应当对应图5(c)中  $z_{p3}$  位置附近截面上的强度图样.

### 3.2.2 线偏振、径向偏振与角向偏振

图6为新型相位板分别调制不同偏振光得到的空间结构光强度分布的数值模拟. 图6(a)—图6(c)分别为高数值孔径系统中新型相位板调制线偏振光、径向偏振光、角向偏振光得到的焦平面处的强度分布. 可以看出入射光为线偏振光时, 光斑形状为圆环且在平行偏振的方向强度较强; 径向

偏振光入射时光斑为两个同心亮环, 但边界较为模糊; 角向偏振光的情况下光斑也为两个同心圆环, 且边界清晰. 图6(d)—图6(f)分别为高数值孔径系统中, 新型相位板调制线偏振光、径向偏振光、角向偏振光得到的  $xz$  平面内的强度分布. 计算结果表明入射光为线偏振光时, 所得到的结构光形状在  $xz$  平面与圆偏振光情况相似, 但在平行偏振方向上光斑的强度较垂直偏振方向强; 入射光为径向偏振光时, 在焦平面上下位置对称得到了两个明亮的旁瓣; 角向偏振光入射时, 在焦平面上下的对称位置也会得到明亮的两个旁瓣, 但其尺寸会比径向偏振光情况时小.

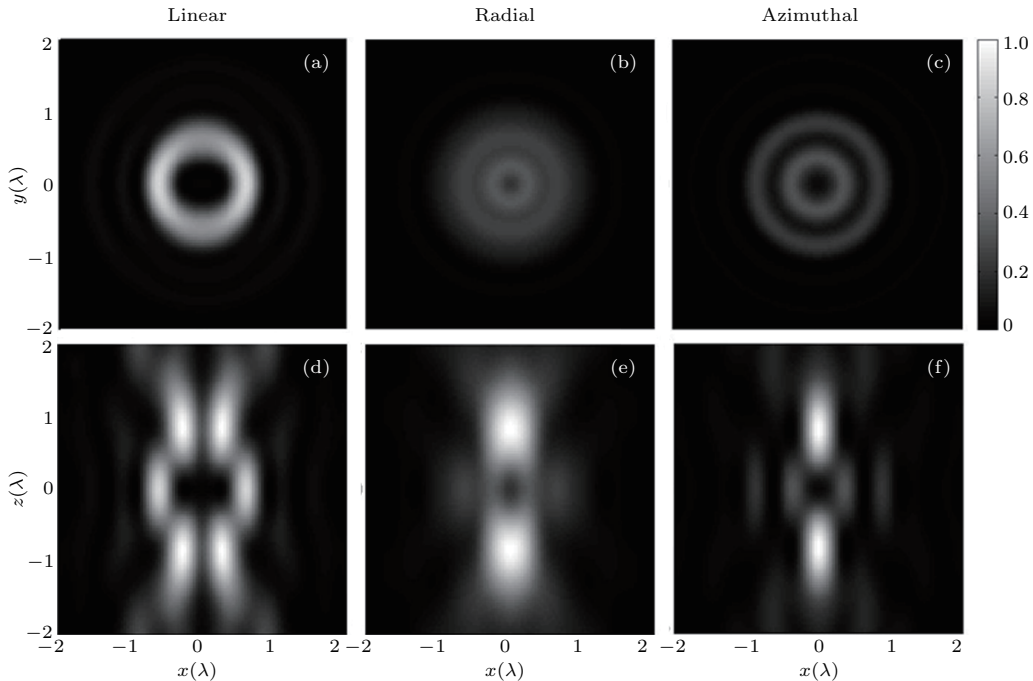


图6 不同偏振态入射情况下的空间结构光的强度分布在焦平面内 (a) 线偏振光, (b) 径向偏振光, (c) 角向偏振光; 在  $xz$  平面内 (d) 线偏振光, (e) 径向偏振光, (f) 角向偏振光

Fig. 6. Intensity distribution of spatial structured light with different polarized incident beams. In the focal plane: (a) Linearly polarized beam, (b) radial polarized beam, (c) a zimuthally polarized beam; in  $xz$  plane: (d) linearly polarized beam, (e) radial polarized beam, (c) azimuthally polarized beam.

图7为新型相位板调制圆偏振、线偏振、径向偏振以及角向偏振光所得的空间结构光光强的分布情况。图7(a)为空间结构光最小暗斑图样所在平面内光强在 $x$ 轴上的变化与分布情况。其中圆偏振与线偏振情况下最小暗斑所在平面均距离焦平面 $0.9\lambda$ ，径向偏振与角向偏振情况下最小暗斑所在平面为焦平面。圆偏振与线偏振入射情况下所产生的空间结构光形貌相似，空间结构光最小暗斑的半高全宽(FWHM)分别为 $0.31\lambda$ ， $0.32\lambda$ ；而径向偏振与角向偏振情况下形貌相似，其中心暗斑尺寸的FWHM分别 $0.24\lambda$ ， $0.36\lambda$ 。可知新型相位板调制不同偏振态入射光所得的空间结构光均产生了小于阿贝衍射极限尺寸的图样。图7(b)为空间结构光在 $xz$ 平面内 $z$ 轴上的光强分布与变化。可以看出圆偏振光入射情况下强度为零，线偏振、径向偏振与角向偏振情况下所产生的空间结构光中心暗斑在轴向的FWHM分别为 $0.80\lambda$ ， $0.78\lambda$ ， $0.76\lambda$ ，小于

瑞利判据轴向分辨率极限尺寸。此外，除圆偏振光入射情况下所得结构光暗斑的中心处光强为0，其他偏振态情况下所产生的空间结构光中心暗斑处均有光的残留。

## 4 结 论

为了获得形貌多样且具有超衍射极限尺寸的空间结构光，开展了实验与数值模拟研究。首先，基于对偏振光波前调制原理，开展了新型相位板的设计；通过将自行设计、加工的圆形PI相位板与商用涡旋2PI相位板组合，实现了新型相位板的功能，并用于调制圆偏振光的实验；随后实验观察、分析了所得到的空间结构光的形貌。然后，基于矢量衍射积分理论并结合实验结果，得到了一种具有超衍射极限尺寸且空间对称的空间结构光。最后，给出了线偏振、径向偏振以及角向偏振入射情况时的空间结构光形貌和分布特点。数值模拟结果及其讨论发现，新型相位板调制不同偏振态均得到了具有空间对称且中心暗斑小于衍射极限尺寸的空间结构光光斑。本文对远场超分辨成像、光镊、微纳米加工等领域在生成多样、特殊形貌及实用的超衍射极限尺寸空间结构光方面的研究具有重要的参考价值。

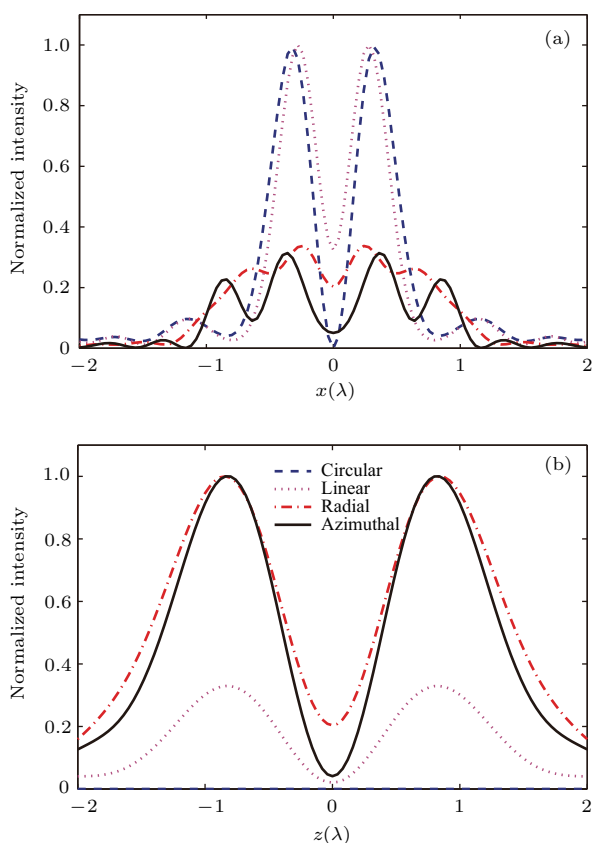


图7 (网刊彩色) 不同偏振光入射情况下空间结构光强度分布及其变化 (a) 最小暗斑图样平面 $x$ 轴光强分布; (b)  $xz$ 平面 $z$ 轴光强分布

Fig. 7. (color online) The intensity distribution and variation of spatial structured light with different polarized incident beam: (a) Intensity distribution on  $x$  axis within the smallest dark spot patterns plane; (b) intensity distribution on  $z$  axis of  $xz$  plane.

## 参考文献

- [1] Chattopadhyay S, Huang Y F, Jen Y, Ganguly A, Chen K H, Chen L C 2010 *Mat. Sci. Eng. R* **69** 1
- [2] Yang H F, He H D, Zhao E L, Han J, Hao J B, Qian J G, Tang W, Zhu H 2014 *Laser Phys.* **24** 065901
- [3] Zhou Z H, Zhu L Q 2016 *Chin. Phys. B* **25** 118
- [4] An S, Peng T, Zhou X, Han G X, Huang Z X, Yu X H, Cai Y N, Yao B L, Zhang P 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 010702 (in Chinese) [安莎, 彭彤, 周兴, 韩国霞, 黄张翔, 于湘华, 蔡亚楠, 姚保利, 张鹏 2017 物理学报 **66** 010702]
- [5] Westphal V, Kastrup L, Hell S W 2003 *Appl. Phys. B* **77** 377
- [6] Westphal V, Hell S W 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 143903
- [7] Rittwegere E, Han K Y, Irvine S E, Eggeling C, Hell S W 2009 *Nat. Photon.* **3** 144
- [8] Li S, Kuang C F, Ding Z H, Hao X, Gu Z T, Ge J H, Liu X 2013 *Acta Laser Biology Sinica* **22** 103
- [9] Wildanger D, Patton B R, Schil H, Marseglia L, Hadden J P 2012 *Adv. Mater.* **24** 309
- [10] Sakai K, Noda S 2007 *Electron. Lett.* **43** 107
- [11] Yao B L, Yan S H, Ye T, Zhao W 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 224
- [12] Sun Y L, Zhao Y Q, Zhan Q W, Li Y P 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1253 (in Chinese) [孙艳丽, 赵逸琼, 詹其文, 李永平 2006 物理学报 **55** 1253]



- [13] Cao Y, Gan Z, Jia B, Evans R A, Gu M 2011 *Opt. Express* **19** 19486
- [14] Dong X Z, Chen W Q, Zhao Z S, Duan X M 2008 *Chin. Sci. Bull.* **53** 2 (in Chinese) [董贤子, 陈卫强, 赵震声, 段宣明 2008 科学通报 **53** 2]
- [15] Dai N G, Xuan M D, Ding P, Jia H Q, Zhou J M, Chen H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 156104 (in Chinese) [戴隆贵, 禰铭冬, 丁芑, 贾海强, 周均铭, 陈宏 2013 物理学报 **62** 156104]
- [16] Zhang C, Wang K G, Bai J T, Wang S, Zhao W, Yang F, Gu C Z, Wang G R 2013 *Nanoscale Res. Lett.* **8** 1
- [17] Beijersbergen M W, Coerwinkel R P C, Kristensen M, Woerdman J P 1994 *Opt. Commun.* **112** 321
- [18] Hotta J, Uji-I H, Hofkens J 2006 *Opt. Express* **14** 6273
- [19] Bingen P, Reuss M, Engelhardt J, Hell S W 2011 *Opt. Express* **19** 23716
- [20] Ren Y X, Li M, Huang K, Wu J G, Gao H F, Wang Z Q, Li Y M 2010 *Appl. Opt.* **49** 1838
- [21] Qian J, Lei M, Dan D, Yao B L, Zhou X, Yang Y L, Yan S H, Min J W, Yu X H 2015 *Sci. Rep.* **5** 14513
- [22] Hermerschmidt A, Krüger S, Haist T, Zwick S, Warber M, Osten W 2008 *Proceedings of SPIE* San Jose, CA, January 19, 2008 p690508
- [23] Leonardo R D, Ianni F, Ruocco G 2007 *Opt. Express* **15** 1913

# Sub-diffraction-limit spatially structured light pattern based on polarized beam phase modulation\*

Yuan Qiang<sup>1)</sup># Zhao Wen-Xuan<sup>1)</sup># Ma Rui<sup>2)</sup> Zhang Chen<sup>1)</sup>‡ Zhao Wei<sup>1)</sup>  
Wang Shuang<sup>1)</sup> Feng Xiao-Qiang<sup>1)</sup> Wang Kai-Ge<sup>1)</sup>† Bai Jin-Tao<sup>1)</sup>

1) (National Center for International Research of Photoelectric Technology and Nano-Functional Materials and Application, State Key Laboratory of Cultivation Base for Photoelectric Technology and Functional Materials, Laboratory of Photoelectric Technology of Shaanxi Province, Institute of Photonics and Photon-Technology, Northwest University, Xi'an 710069, China)

2) (College of Optical and Electrical, Xi'an University of Technology, Xi'an 710021, China)

( Received 17 February 2017; revised manuscript received 10 April 2017 )

## Abstract

The sub-diffraction-limit spatially structured light patterns have attracted more and more attention for their important applications in many frontier scientific fields. The present paper aims at developing sub-diffraction-limit spatially structured beam patterns which might have great potential to improve the light performance in fields such as super resolution imagery, optical tweezer, micro/nano lithography, etc. Here, a variety of spatially structured beam patterns are obtained by the phase modulation of polarized beams and studied in detail experimentally and numerically. Firstly, a new kind of phase plate, which combines the merits of circular  $\pi$  and vortex  $2\pi$  phase plates, is proposed based on the wave front design; it is composed of two spiral-shaped phase plates with their phases changing from 0 to  $2\pi$  and  $-\pi$  to  $\pi$ , respectively. Later, the phase plate is applied to the circularly polarized Gaussian beam modulation in a high  $NA$  system. By combining a self-made circular  $\pi$  with a commercial vortex  $2\pi$  phase plate, the designed new phase plate is implemented in the experiment. The morphology of the spatially structured light pattern, which is generated on the focal plane, is observed by a CCD camera in the experiment. The beam pattern presents a donut shape on the focal plane, while the dimension of the donut-shaped pattern becomes smaller as the imaging plane axially deviates from the focal plane. It is found that the beam patterns captured in experiment highly consist with the numerical simulation results carried out by the vectorial diffraction integral theory. It can be deduced that the spatially structured beam is capillary-shaped. Meanwhile, at the two ends of the capillary-shaped beam, the inner diameter is smaller than the diffraction limitation. Furthermore, the structured beam pattern presents a spatial voxel distribution with center and axis symmetry. Finally, the characteristics of the spatially structured beam patterns, which are generated by modulating circular, linear, radial and azimuthal polarized beams with the new designed phase plate, are analyzed and discussed in detail. It is found that for circular, linear, radial and azimuthal polarization, the full widths at half maximum (FWHMs) of the minimum dark spots in the horizontal direction are  $0.31\lambda$ ,  $0.32\lambda$ ,  $0.24\lambda$  and  $0.36\lambda$ , respectively. On the optical axis, the FWHMs of the dark spots created by linearly, radially and azimuthally polarized light, are  $0.8\lambda$ ,  $0.78\lambda$  and  $0.76\lambda$ , respectively, and no axial intensity is found with circularly polarized beam incidence.

**Keywords:** phase modulation, sub-diffraction limit, structured light, diffraction integral theory

**PACS:** 02.60.Cb, 42.25.Fx, 42.25.Hz, 42.25.Ja

**DOI:** 10.7498/aps.66.110201

\* Project supported by Young Scientist Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11504294), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61378083), the Major Research Plan of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 91123030), the International Cooperation Foundation of the National Science and Technology Ministry of China (Grant No. 2011DFA12220), the Youth Talent Plan of the National Science Foundation of Shaanxi Province of China (Grant No. 2016JQ1030), and the Natural Science Foundation of Shaanxi Province of China (Grant Nos. 14JS106, 2013SZS03-Z01).

# Equal contribution for this paper.

† Corresponding author. E-mail: wangkg@nwu.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: nwuzchen@nwu.edu.cn