

文章编号 1004-924X(2025)10-1524-10

均匀和非均匀偏振分布 Bessel 光束的单光束实现

殷 亮, 姚凯玲, 孙 逊, 张婧千, 朱乐文, 杨浩杰, 高秀敏*, 庄松林
(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: Bessel 光束因其独特的性质, 在众多领域中具有广泛的应用。当前, 研究者们正致力于开发能够动态控制偏振态的方法。然而, 从单一入射光束中提取并控制任意阶偏振态模式一直是一个挑战。本文提出了一种基于光学笔模式提取原理的新方法, 成功生成了均匀和非均匀偏振态的 Bessel 光束, 从而克服了这一难题。该方法无需改变入射矢量光束的偏振态, 而是直接从高阶矢量涡旋光束中提取出任意偏振模态的 Bessel 光束。利用光学笔技术, 能够灵活地排列矢量 Bessel 光束的数量、位置、振幅和相位。实验结果与理论预测高度一致。这项研究不仅对深入理解 Bessel 光束的偏振特性具有重要意义, 而且有望推动光学成像、光通信、粒子操纵等领域的技术进步。

关键词: 模式提取; Bessel 光; 光学笔; 均匀偏振; 非均匀偏振

中图分类号: TN929.11; O43 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20253310.1524 **CSTR:** 32169.14.OPE.20253310.1524

Single-beam implementation of uniform and non-uniformly polarized Bessel beams

YIN Liang, YAO Kailing, SUN Xun, ZHANG Jingqian, ZHU Lewen,
YANG Haojie, GAO Xiumin*, ZHUANG Songlin

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for
Science and Technology, Shanghai 200093, China)

* Corresponding author, E-mail: gxm@usst.edu.cn

Abstract: Due to its unique properties, the Bessel beam has a wide range of applications in numerous fields. Currently, researchers are devoting themselves to developing methods capable of dynamically controlling the polarization state. However, extracting and controlling the polarization state modes of arbitrary orders from a single incident beam has always been a challenge. This paper proposed a novel method based on the mode extraction principle of the optical pen, which successfully generated Bessel beams with uniform and non-uniform polarization states, thus overcoming this difficulty. This method did not require changing the polarization state of the incident vector beam. Instead, it directly extracted Bessel beams with arbitrary polarization modes from high-order vector vortex beams. By utilizing the optical pen technology, the number, position, amplitude, and phase of vector Bessel beams could be arranged flexibly. The experimental results were in high agreement with the theoretical predictions. This research not only holds great significance for the in-depth understanding of the polarization characteristics of Bessel beams but also

收稿日期: 2025-02-14; 修订日期: 2025-02-25.

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 62305222; No. 62022059; No. 62375183)

is expected to promotetechnological advancements in fields such as optical imaging, optical communication, and particle manipulation.

Key words: mode extraction principle; Bessel beam; optical pen; uniform polarization; non-uniform polarization

1 引 言

光束偏振特性作为光学精密调控的核心参量,其空间分布直接影响光场与物质相互作用的能量传递效率和空间选择性。作为光束的自然特性,偏振表现为电场的固有振荡,是光在横向平面上的矢量特性。不同偏振分布光束具有各自独特的性质^[1-5],而且具有不同偏振的光束在光学成像^[6]、光捕获^[7-8]、光通信^[9-11]和光学光刻等许多光学应用中发挥着至关重要的作用^[12-14]。无衍射光束由于在传输过程中具有保型性和自修复特性,且在特定条件下可以具有强纵向场分量,在激光加工、超分辨显微成像和光通信等领域具有巨大应用潜力。Bessel 光束是一种特殊的无衍射光束,满足亥姆霍兹波动方程^[15],比高斯光束^[16]具有更长的传输距离,这也使其在光学制造和飞行器操作等领域有着广泛的应用。不同偏振分布模式(均匀和非均匀)的 Bessel 光束由于可与物质特异性相互作用,对加工精度、测量稳定、成像分辨率等性能的提升具有重要意义。

均匀偏振态 Bessel 光束横截面上有均匀变化的偏振分布,与物质作用效果相对均匀;非均匀偏振态的 Bessel 光束有更加丰富偏振分布模式,在横向平面上,不同区域与物质相互作用效果更灵活。携带多样性偏振分布的 Bessel 光束应用广泛,如量子纠缠^[17]和量子计量^[18]等。近些年,研究人员提出并通过实验验证产生一些特殊偏振分布的 Bessel 光束,Rao AS^[19]等人用不同阶次的空心高斯光束照亮轴锥镜,在远离轴锥镜的不同位置生成了不同范围的贝塞尔光束,结合偏振选择器件可实现特定的 Bessel 偏振模式。A. Niv^[20]等人通过量子化(Pancharatnam-Berry, PB)相位光学元件产生矢量 Bessel 光束, PB 器件通过调整空间变化半波片的方向引入空间变化的相位分布,通过偏振选择器件^[21]可以产生任意偏振态。此外,采用干涉技术^[22]将两束正交偏振的高斯光束干涉合成矢量偏振 Bessel 光束,可以产生不同的偏振分布。Weng X^[23]等人采用多能量

振荡机制,从而允许创建一个具有超长无衍射距离在自由空间中的光束,基于此,开发了一种通用的光学笔技术,以在透镜聚焦平面灵活调控振荡能量的数量、幅度、位置和相位,从而可以实现多个能量振荡,且每个能量振荡的强度、相位以及偏振分布得以人为设计。而具有多个偏振模式的矢量贝塞尔光束的生成尚未被详细研究,这是由于在多模共存条件下,单光束的复杂偏振结构和相位结构相互纠缠,因此,很难从单个光束中提取任意均匀和非均匀偏振态。迫切需要一种打破这种固有偏振模式的方法,从矢量贝塞尔光束中提取多种偏振模式,从而促进光场调控领域的发展。

本文基于模式提取方法^[24],提出从单一入射光束提取产生任意偏振模态的 Bessel 光束,实验结果与仿真计算具有很好的吻合性。基于模式提取技术,在物镜聚焦区域任意提取 Bessel 多个偏振模,再结合光学笔技术^[24],可以随意控制矢量 Bessel 光束的数量、位置和相位,并通过设计实验装置验证了结合模式提取原理产生不同偏振态的 Bessel 光束的正确性。本文证明了从单光束中提取任意偏振模式 Bessel 光束的可能性,找到一种突破传统产生特殊偏振模式的矢量 Bessel 光束的方法,系统更简单和灵活。

2 理 论

Bessel 光束任意偏振模提取的聚焦系统如图 1 所示。其中图 1(a)为 Bessel 光束的相位图,通过调制相位图 1(a)提取图 1(b),从准直入射 $m=30$ 阶矢量涡旋光束(VVB)中提取镜面聚焦区域后, Bessel 光束的偏振模式沿光轴以适当相位传播。在这里,相位被放置在物镜(OL)的瞳孔过滤器。在之前的研究中,通过光学笔可以随意调整多个 VVBs 的数量、位置和振幅、相位,并根据模式提取原理控制其顺序^[24-25]。本文将从 $m=30$ 阶的矢量涡旋光束中提取不同偏振态的 Bessel 光束,包括均匀态和非均匀态。

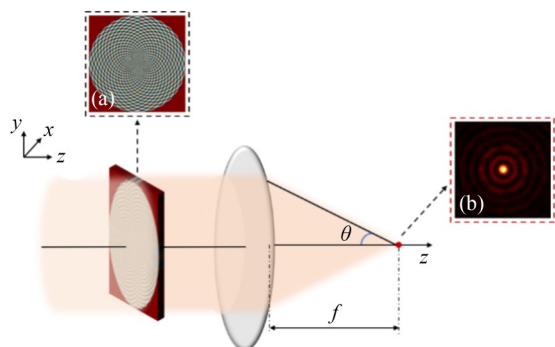


图1 模式提取 Bessel 光束均匀与非均匀偏振态聚焦系统原理图, (a) Bessel 光束的相位, (b) 通过调制相位提取的 Bessel 强度分布图

Fig. 1 Schematic diagram of the focusing system extracted from Bessel beam homogeneous and non-uniform polarization state modes, (a) phase of the Bessel beam, (b) Bessel intensity distribution plot extracted by modulating the phase

模式提取的原理代表了干涉技术的一个逆过程, 可以从单个光束中提取任意所需的偏振模式, 即本文中的均匀与非均匀偏振态 Bessel 光束。本文给出了利用模态提取原理创建任意 Bessel 光束偏振模的实例, 为 Bessel 光束的应用提供了新的机会。

根据矢量 Debye 衍射理论, 光学透镜焦区的电磁场可以表示如式(1)所示:

$$E = \frac{-iA}{\pi} \int_0^\alpha \int_0^{2\pi} \sqrt{\cos \theta} \sin \theta Tl_0(\theta) V_E \exp(-iks \cdot \rho) d\varphi d\theta, \quad (1)$$

其中: θ 和 φ 分别表示聚焦系统的会聚角和方位角; A 是归一化常数; $\alpha = \arcsin(NA/n)$, NA 为聚焦物镜的数值孔径, n 为聚焦空间的折射率, 自由空间中, 且 $n=1$; 波数 $k=2\pi/\lambda$, λ 表示入射光束的波长。 $\rho=(r\cos\varphi, r\sin\varphi, z)$ 为任意观测点在聚焦场中的位置矢量; $s=(-\sin\theta\cos\varphi, -\sin\theta\sin\varphi, \cos\theta)$ 表示极坐标系中沿收敛射线方向的单位矢量; $T=\exp(i\psi)$ 为光瞳滤光片的透射函数, ψ 为光瞳滤光片的相位分布。

$l_0(\theta)$ 为入射高斯光束的振幅函数, 可表示为:

$$l_0(\theta) = \exp\left[-\left(\beta_0 \frac{\sin\theta}{\sin\alpha}\right)^2\right], \quad (2)$$

其中, β_0 为光瞳半径与入射光束腰比值。

V_E 为聚焦平面中入射光电场偏振矢量。电场偏振矢量 V_E 表示为:

$$V_E = \cos(m\varphi)V_x + \sin(m\varphi)V_y, \quad (3)$$

其中: V_x 和 V_y 分别表示 $|x\rangle$ 和 $|y\rangle$ 的电场分量, $|x\rangle$ 和 $|y\rangle$ 分别为 x 和 y 偏振模式。

V_x 和 V_y 表示为:

$$V_x = \begin{bmatrix} \sin^2\varphi(1-\cos\theta) + \cos\theta \\ \cos\varphi\sin\varphi(\cos\theta-1) \\ \cos\varphi\sin\theta \end{bmatrix},$$

$$V_y = \begin{bmatrix} -(1-\cos\theta)\sin\varphi\cos\varphi \\ 1-(1-\cos\theta)\sin^2\varphi \\ \sin\varphi\sin\theta \end{bmatrix}. \quad (4)$$

T 为入射光束的波前调制相位函数, 矢量 Bessel 光束的产生依赖于调制项 T_j 。轴突相位为 $T_a = \exp(-i \cdot 2\pi r/d)$, 其中 d 为轴突周期, $r = \sin\theta/NA$ 。涡旋相位 $T_l = \exp(il\varphi)$, 其中 l 为拓扑数。通过加入偏振模相位 T_p 、涡旋相位 T_l 和轴突相位 T_a 对 m 阶矢量光束进行调制。其中, 偏振模相位 T_p 可表示为:

$$T_p = \text{phase}(\cos(q\varphi + \beta)), \quad (5)$$

其中: β 表示偏振方向, $q = m - n$, m 为涡旋波片的阶数, 且 $m=30$ 。

这样, 偏振的调制对称性被打破, 目标模式与其他模式分离, 然后通过滤波只保留所需的目标模式。最后, 得到的调制项 T_j 可以表示为:

$$T_j = \exp\left(-i \frac{2\pi r}{d}\right) \exp(il\varphi) T_p. \quad (6)$$

模式提取负责 Bessel 光束模式的控制, 而通道信息, 如幅度、相位、数量和位置, 则由光学笔进行调整。根据前人对光学笔的研究, 光学笔是基于光程差的补偿而发展起来的, 可表示为:

$$\psi_0 = \text{Phase}\left\{\sum_{j=1}^N PF(x_j, y_j, z_j, \delta_j)\right\}, \quad (7)$$

其中: $PF(x_j, y_j, z_j)$ 为光学笔函数, 由光路补偿得到; N 为焦点数, j 表示第 j 个焦点; x_j, y_j, z_j 为焦球上第 j 个焦点的位置坐标; δ_j 表示用于调整第 j 个焦点相位的权重因子, s_j 表示用于调整第 j 个焦点^[26]的振幅。

将其与 T_j 相结合, 即可将光学笔技术应用于 Bessel 涡旋光束的偏振模式的调节。因此, 式(1)

中光学瞳孔滤光片 T 的透过率函数可表示为:

$$T = T_j \exp(i\psi_0). \quad (8)$$

最终,基于上述公式推导,可以对 Bessel 涡旋光束的偏振特性进行分析和研究。

3 仿真结果及讨论

本文所采用的基本参数如下:入射光波长为 632.8 nm,在下面的模拟中, $NA=0.1$,根据理论模型,贝塞尔光束的产生受轴棱锥传输函数的周期 d 的影响。通过公式 $d = \lambda f / r_0$ 计算,其中 λ 为波长, f 为焦距, r_0 为聚焦系统中孔径的半径^[27]。贝塞尔光束在 $d=0.07$ 时具有最佳轮廓。故选取轴突周期为 $d=0.07$ 。所有图中的长度单位为

波长 λ , 光强归一化为单位值。

通过模式提取原理,提取 Bessel 光束 x 线偏振和 y 线偏振结果如图 2 所示,这一过程涉及对光束的电场矢量在两个正交方向上的分量进行分析。根据(A)和(B)中的相位,从焦点区域 $m=30$ 阶矢量 Bessel 光束中提取 x 线偏振和 y 线偏振,总场强度如图 (a_1) 和 (b_1) 所示, x 方向上强度分量如 (a_2) 和 (b_2) 所示, x 线偏振的电场矢量仅在 x 轴方向上有分量, (a_3) 和 (b_3) 表示 y 方向上的分量,而 y 轴方向上的分量为零, y 线偏振的电场矢量仅在 y 轴方向上有分量,而 x 轴方向上的分量为零, (a_4) 和 (b_4) 表示 x 线偏振和 y 线偏振的方向, x 线偏振方向沿着 x 轴, y 线偏振方向沿着 y 轴。

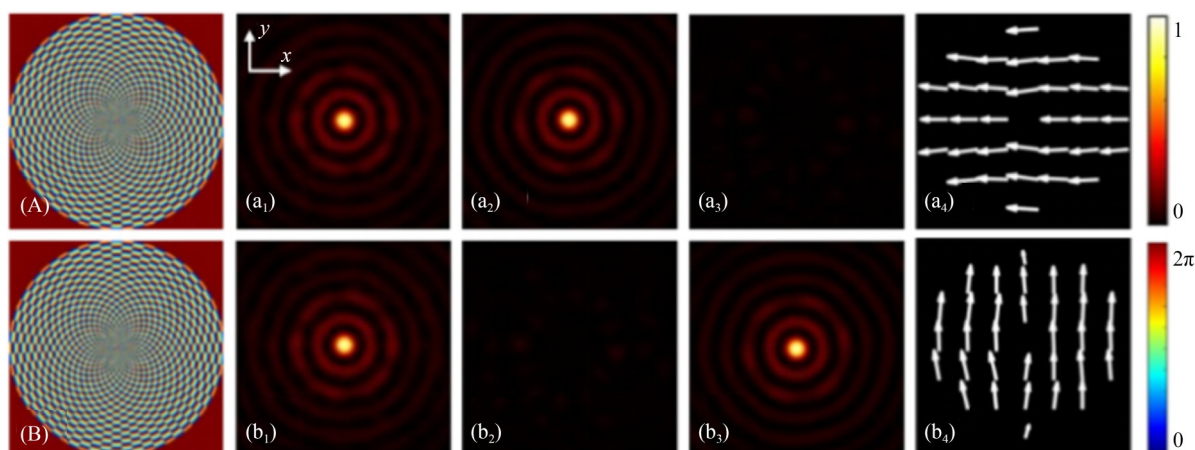


图 2 Bessel 光束 x 和 y 线偏振模式提取结果

Fig. 2 Bessel beam x -linear polarization and y -linear polarization patterns are extracted

图 3 所示是提取 Bessel 光束左旋圆偏振和右旋圆偏振的结果,根据(A)和(B)中的相位,从焦点区域 $m=30$ 阶矢量 Bessel 光束中提取左旋圆偏振和右旋圆偏振,图 3 (a_1) 和 (b_1) 表示总场,如图可看出左旋和右旋圆偏振光在 x 轴和 y 轴方向上的电场分量是相等的,即在任何给定的瞬间, x 轴和 y 轴方向上的电场强度是相同的,这是圆偏振光的一个关键特征。电场矢量在这两个正交方向上的相等振幅和相位差导致了电场矢量端点描绘出圆形轨迹,这是圆偏振光的典型表现。图 3 (a_4) 和 (b_4) 表示左旋圆偏振和右旋圆偏振的方向,图 3 (a_4) 中的左旋圆偏振光显示,电场矢量随着时间的推移,其端点在逆时针方向上旋转,即

从观察者的视角看,电场矢量是朝右上方旋转的。相反,图 3 (b_4) 中的右旋圆偏振光显示,电场矢量随着时间的推移,其端点在顺时针方向上旋转,即从观察者的视角看,电场矢量是朝右下方旋转的。

拓扑数为 $l=0$ 的 Bessel 光束不同偏振模式的提取结果如图 4 所示。根据(A)-(D)中的相位,分别从焦点区域 $m=30$ 阶矢量涡旋光束中提取不同阶数的偏振模式。对于矢量 Bessel 光束,选择 $n=1, 2, 3, 4$ 阶。 $(a_1) \sim (d_1)$ 表示总场强度,子图 $(a_2) \sim (d_2)$, $(a_3) \sim (d_3)$, $(a_4) \sim (d_4)$ 分别表示检偏器的方向为 $0^\circ, 90^\circ$ 和 45° 提取的强度图,蓝色箭头表示偏光镜的角度(彩图见期刊电子版)。

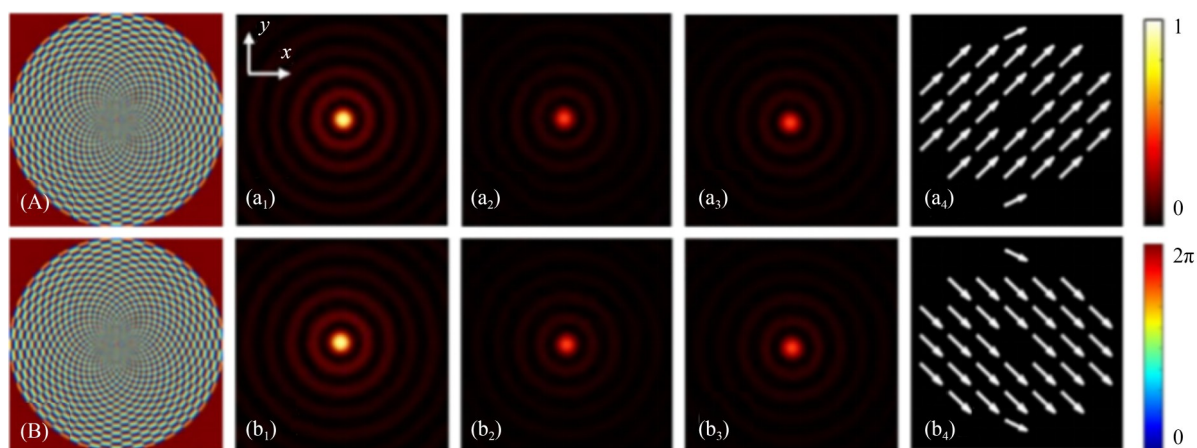
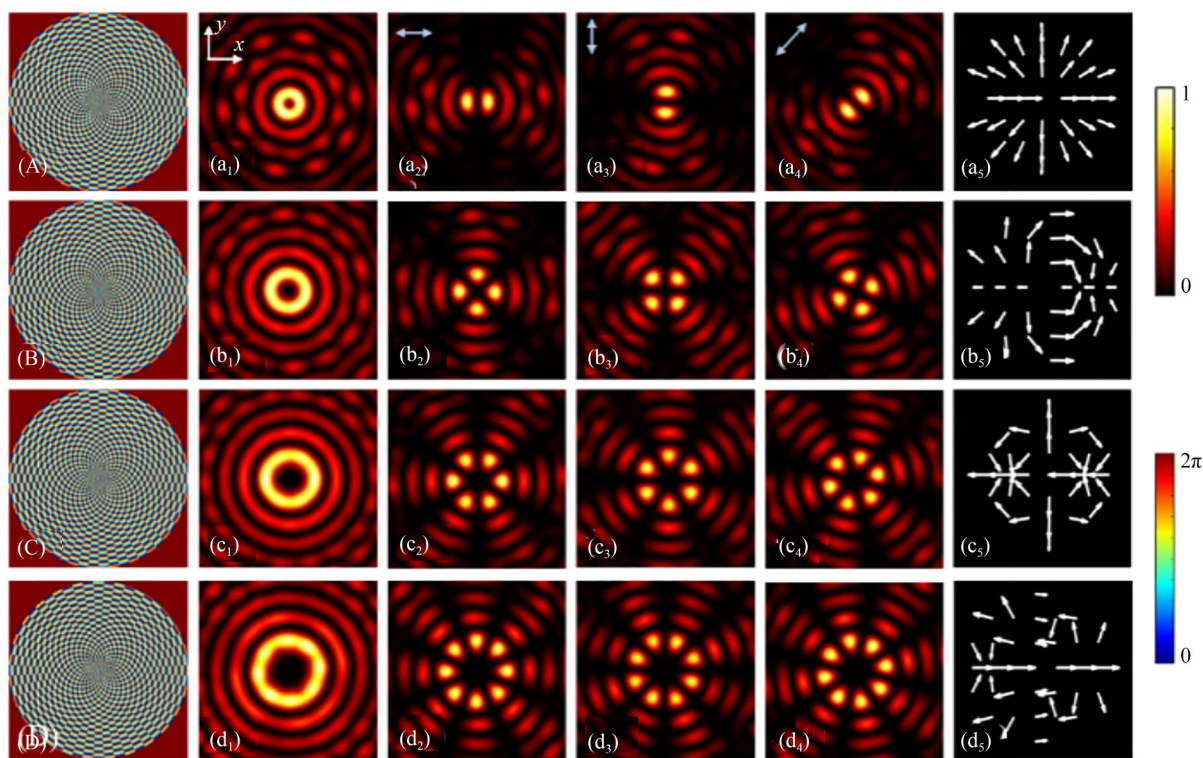


图3 Bessel光束左旋圆和右旋圆偏振模式提取结果

Fig. 3 Bessel beam left-handed circle and right-handed circle polarization modes are extracted

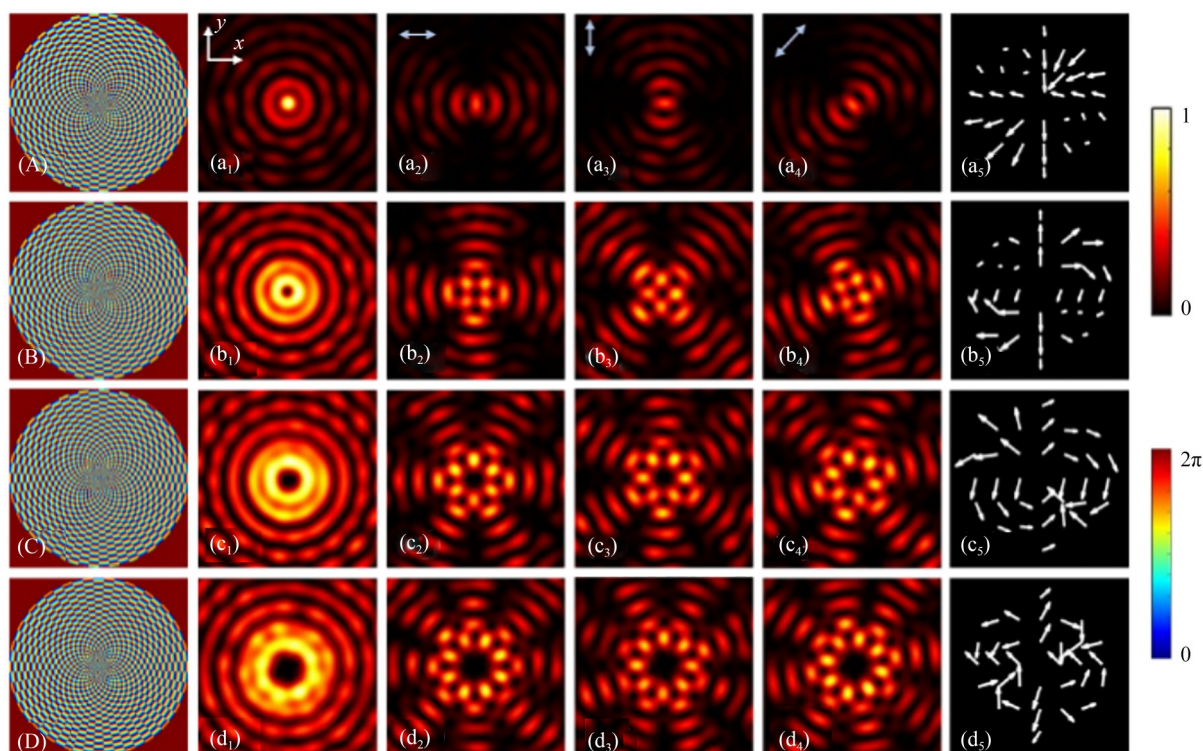
图4 拓扑数为 $l=0$ 的Bessel光束不同偏振模式的提取结果Fig. 4 Extraction results of different polarization modes of Bessel beams with topology number $l=0$

(a₅)~(d₅)表示偏振方向。光强归一化为单位值,相位尺度为 $0\sim 2\pi$ 。

由图4可见,随着Bessel光束阶数的增大,总场的中心光环不断变大。图4(a₂)~(d₂),(a₃)~(d₃),(a₄)~(d₄)分别表示检偏器的方向为 0° , 90° 和 45° 。矢量Bessel光束的另一个特性是偏振模式。偏振模式仅受入射 $m=30$ 阶VVB的相位控制。即无需改变入射 $m=30$ 阶VVB,只需调整

其相位即可动态切换阶数。偏振矢量随方位角的旋转而变化,花瓣数与光束的阶数 n 相关,花瓣数为 $2n$,即当光束阶数为1时花瓣数为2,阶数为2时花瓣数为4。图4(a₅)~(d₅)表示 $n=1\sim 4$ 阶时的偏振方向,随着阶数的增大,偏振的复杂程度也随之增加。

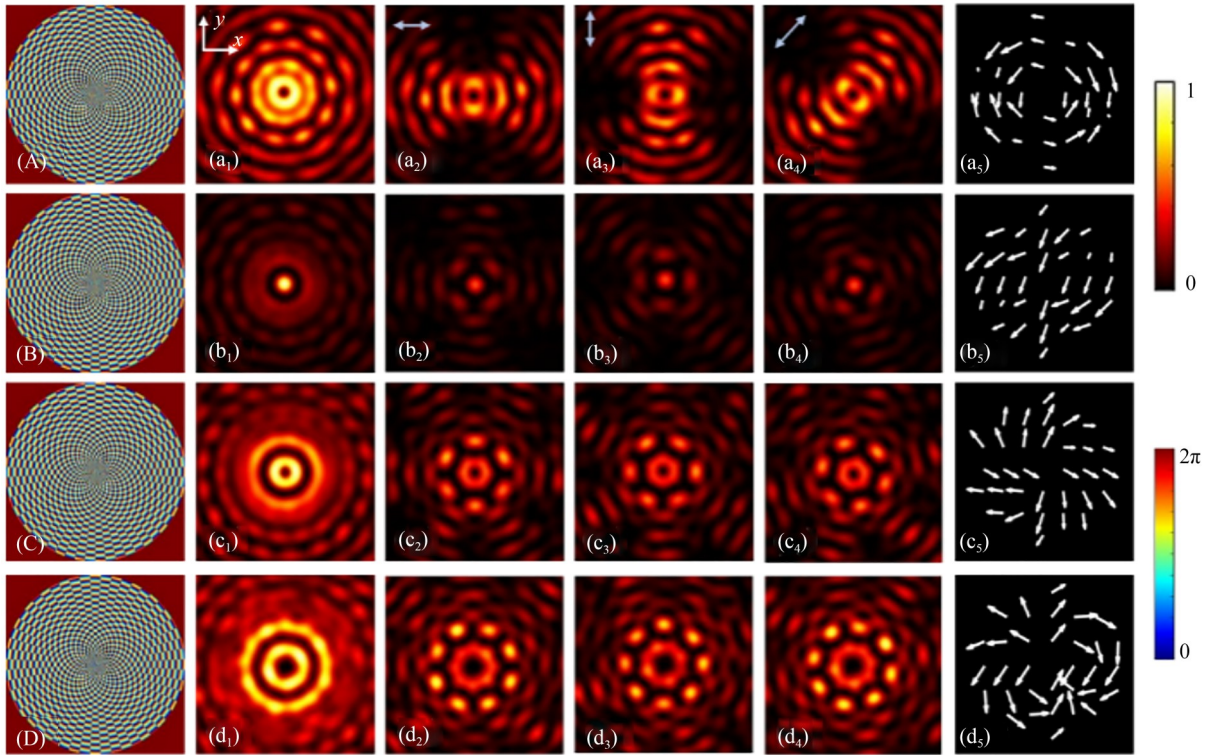
拓扑数为 $l=1$ 的Bessel光束不同偏振模式的提取结果如图5所示。根据(A)~(D)中的相

图 5 拓扑数为 $l=1$ 的 Bessel 光束不同偏振模式的提取结果Fig. 5 Extraction results of different polarization modes of Bessel beams with topology number $l=1$

位,分别从焦点区域 $m=30$ 阶矢量涡旋光束中提取不同阶数的偏振模式 $(a)=1, (b)=2, (c)=3, (d)=4, (a_1) \sim (d_1)$ 表示总场强度,子图 $(a_2) \sim (d_2), (a_3) \sim (d_3), (a_4) \sim (d_4)$ 分别表示检偏器的方向为 $0^\circ, 90^\circ$ 和 45° 提取的强度图,蓝色箭头表示偏光镜的角度(彩图见期刊电子版)。 $(a_5) \sim (d_5)$ 表示偏振方向。光强归一化为单位值,相位尺度为 $0 \sim 2$ 。随着矢量 Bessel 光束 n 阶的增大,矢量 Bessel 光束的中心在图 5(a₁) 中呈现一个实心亮点,且其不同角度的偏振中心都为实心亮点。除图 5(a₁) 外,总场中心暗区的半径随着阶数 $n=2, 3, 4$ 的增大而逐渐增大,如图 5(b₁) $\sim$ (d₁) 所示,可以清楚地看到有两个亮环,且中心亮环比第二个亮环强度更高。子图 $(a_2) \sim (d_2), (a_3) \sim (d_3), (a_4) \sim (d_4)$ 分别表示检偏器的方向为 $0^\circ, 90^\circ$ 和 45° 提取的强度图,除了 $n=1$ 阶,其他阶数的两个圆环通过偏振片会得到双环花瓣,如图 5(b₂) $\sim$ (b₄), (c₂) $\sim$ (c₄), (d₂) $\sim$ (d₄) 所示,内环和外环花瓣存在角度差。图 5(a₅) $\sim$ (d₅) 表示 $n=1 \sim 4$ 阶时的偏振方向,同拓扑数为 $l=0$ 的情况,随着阶数 n 的增大偏振也随之变得复杂。

拓扑数为 $l=2$ 的 Bessel 光束不同偏振模式的

提取结果如图 6 所示。根据 (A) $\sim$ (D) 中的相位,分别从焦点区域 $m=30$ 阶矢量涡旋光束中提取不同阶数的偏振模式 $(a)n=1, (b)n=2, (c)n=3, (d)n=4, (a_1) \sim (d_1)$ 表示总场强度。子图 $(a_2) \sim (d_2), (a_3) \sim (d_3), (a_4) \sim (d_4)$ 分别表示检偏器的方向为 $0^\circ, 90^\circ$ 和 45° 提取的强度图,蓝色箭头表示偏光镜的角度(彩图见期刊电子版)。 $(a_5) \sim (d_5)$ 表示偏振方向。光强归一化为单位值,相位尺度为 $0 \sim 2\pi$ 。可以看出,除了图 6(b₁) $\sim$ (b₄) 外,随着阶数 n 的增加,矢量 Bessel 光束的中心暗区逐渐增大。有两个较强光强的内环,如图 6(a₁) $\sim$ (d₁) 所示。此外,矢量 Bessel 光束的总电场分布呈现中心亮点,当 $n=2$ 阶时,光强相对其他阶数的光强较弱,如图 5(b₁) $\sim$ (b₄) 所示。通过检偏器,和拓扑数为 1 时的区别为内环仍为圆环状,不分离花瓣,而第二环分离为 $2n$ 个瓣。值得注意的是,虽然内环没有将花瓣分开,但当阶数 $n=1$ 时,其光强分布并不均匀。当 $n=2$ 阶时,外环强度比内环强度微弱, $n=3$ 阶时,内外环强度相对均衡, $n=4$ 阶时,外环的强度比内环的强度更高,由此可见阶数越高,偏振会影响外环的强度使其变得更高。图 6(a₅) $\sim$ (d₅) 表示 $n=1 \sim 4$ 阶时的偏振方向。

图 6 拓扑数为 $l=2$ 的 Bessel 光束不同偏振模式的提取结果Fig. 6 Extraction results of different polarization modes of Bessel beams with topology number $l=2$

4 实验结果及讨论

为了验证模式提取原理产生不同偏振态的 Bessel 光束的正确性,设计了产生 Bessel 光束的实验装置,如图 7 所示,激光器波长为 632.8 nm, SLM 为加载相位的空间光调制器, L1-L4 是聚焦透镜,由 L3($f_3=100$ mm)和 L4($f_4=100$ mm)组成的 $4f$ 系统使 VP 和 SLM 形成共轭,将计算得到的相位图加载到空间光调制器上,并用 CCD 进行图像采集。入射光束为 632.8 nm 的激光,通

过起偏器后变成 x 线偏振光,扩束准直系统由透镜 L1($f_1=50$ mm)和 L2($f_2=150$ mm)组成。通过分束器进入纯相位空间光调制器(SLM),将我们的相位图加载到空间光调制器(HOLO-EYE, 型号: PLUTO-2-NIR-011, 像素: $1\ 920 \times 1\ 080$, 像元: $8.0\ \mu\text{m}$)中。L3($f_4=100$ mm)和 L4($f_4=100$ mm)形成一个 $4f$ 系统,使空间光调制器中的相位编码与 30 阶涡旋波片(VP)形成共轭,最后再用 CCD(大恒图像)记录偏振模式的光强。该系统可以提取不同阶数的 Bessel 光束偏振模式。

利用上面的实验装置,通过计算拓扑数 $l=0$ 时不同阶数 $n=1, 2, 3, 4$ 的相位全息图,并将其加载到空间光调制器上,用 CCD 捕获总场和偏振角度为 $0^\circ, 90^\circ$ 和 45° 的光强图,得到的实验结果如图 8 所示。图 8(A)~(D)分别表示 $l=0$ 时 $n=1 \sim 4$ 阶时的相位图,各总场强度如图 8(a₁)~(d₁)所示,随着阶数 n 的增大,中心暗区的半径随之增大。子图(a₂)~(d₂), (a₃)~(d₃), (a₄)~(d₄)分别表示检偏器的方向为 $0^\circ, 90^\circ$ 和 45° 提取的强度图, (a₅)~(d₅)表示偏振方向。对比图 4 拓扑数为

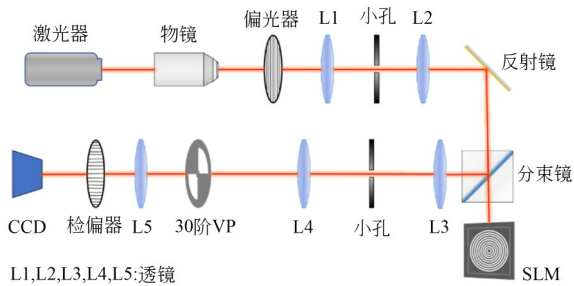


图 7 模式提取实验装置示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the mode extraction experimental setup

$l=0$ 的 Bessel 光束不同偏振模式的提取结果可得实验结果与仿真结果相吻合,花瓣数与光束的阶数 n 相关,花瓣数为 $2n$,即当光束阶数为 1 时花瓣数为 2,阶数为 2 时花瓣数为 4。通过调整偏光

镜的角度可以调节偏振的方向,从而使花瓣的角度发生变化。由于受到检测系统的分辨率限制,CCD 相机的空间采样率较低,实验效果受到一定的影响。

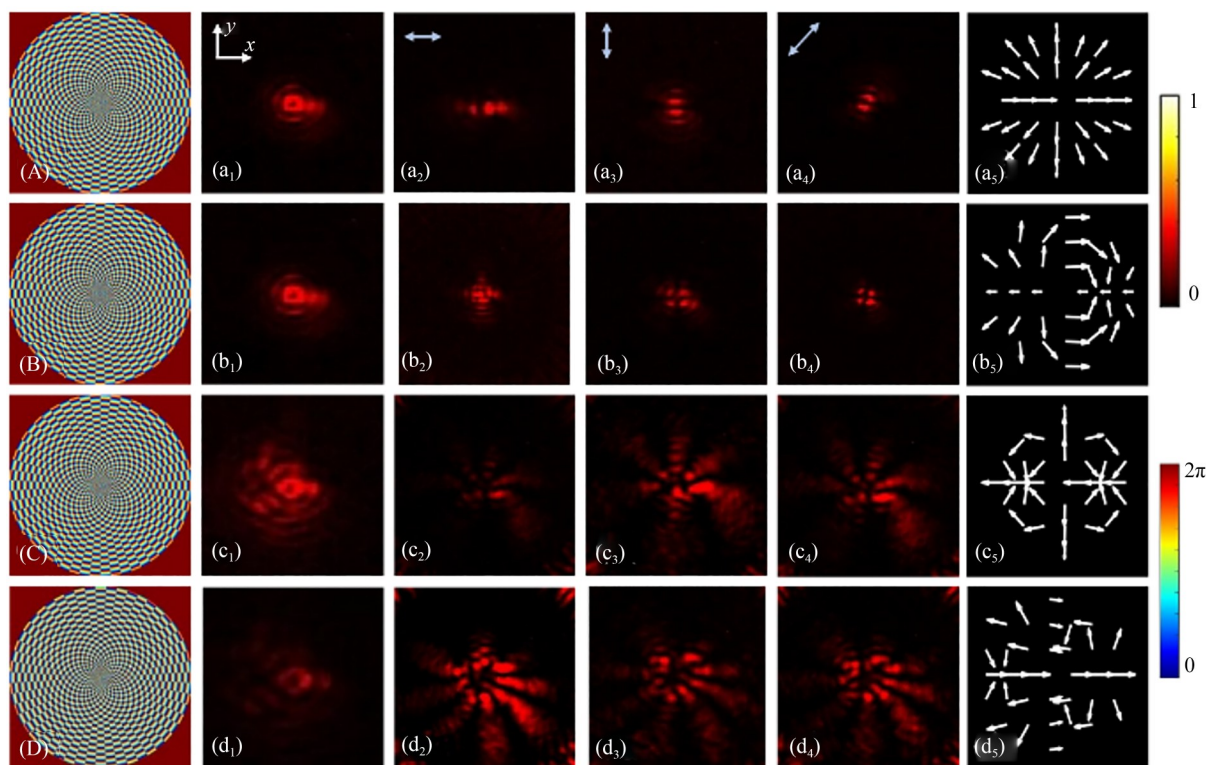


图 8 实验验证 $l=0$ 时 Bessel 光束不同偏振模式的结果

Fig. 8 Results of different polarization modes of Bessel beam at $l=0$

本实验的目的是验证本文模式提取原理在提取 Bessel 光束多种偏振态的可行性。设计并搭建了一个产生矢量 Bessel 光束的任意偏振模式,从而验证了该原理的可行性。后续我们将充分利用光学笔技术和模式提取原理,探索更多模式提取原理在矢量光场调控领域的应用和实验。

5 结 论

综上所述,本文从理论上和实验上验证了采用模式提取原理与光学笔技术相结合,从 Bessel 光束中提取均匀与非均匀偏振态模式。这一过程不需要改变入射矢量光束,可以灵活地从 $m=30$ 阶矢量 Bessel 光束中提取出偏振模式,这项工作在许多领域都具有非常重要的研究意义和应

用价值。本文生成的 Bessel 均匀与非均匀偏振态模式,采用光学笔可以进一步对矢量 Bessel 光束的数目、位置、振幅和相位进行自由排列,从而提供更多的可用状态,这将为光通信、粒子操纵和超分辨率显微成像等领域带来更多的可能性。

作者贡献声明:

殷亮:完成了全文框架搭建、核心章节撰写及跨学科理论整合工作;

姚凯玲:软件算法研究设计,构建数学模型与算法体系;

孙逊:负责文献综述与比较研究部分;

张婧千:主笔方法论设计与案例研究模块;

朱乐文:侧重学术规范与格式校验;

杨浩杰:负责数据溯源核查及专业术语标准

化校准;

高秀敏:课题负责人,指导课题研究及验证;

庄松林:从学术伦理、论证严密性、结论普适性三个维度进行指导。

参考文献:

- [1] DORN R, QUABIS S, LEUCHS G. Sharper focus for a radially polarized light beam[J]. *Physical Review Letters*, 2003, 91(23): 233901.
- [2] HAO X, KUANG C F, WANG T T, *et al.* Phase encoding for sharper focus of the azimuthally polarized beam[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(23): 3928-3930.
- [3] ZHAN Q W. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2009, 1(1): 1-57.
- [4] WANG H F, SHI L P, LUKYANCHUK B, *et al.* Creation of a needle of longitudinally polarized light in vacuum using binary optics[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2: 501-505.
- [5] YOUNG WORTH K, BROWN T. Focusing of high numerical aperture cylindrical-vector beams [J]. *Optics Express*, 2000, 7(2): 77-87.
- [6] SON T, LEE C H, SEO J, *et al.* Surface plasmon microscopy by spatial light switching for label-free imaging with enhanced resolution [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(4): 959-962.
- [7] RUI G H, ZHAN Q W. Trapping of resonant metallic nanoparticles with engineered vectorial optical field[J]. *Nanophotonics*, 2014, 3(6): 351-361.
- [8] NIEMINEN T A, HECKENBERG N R, RUBINSZTEIN-DUNLOP H. Forces in optical tweezers with radially and azimuthally polarized trapping beams[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(2): 122-124.
- [9] 于永江, 陈建农, 郝金光, 等. 变形高阶贝塞尔光束的传播和自成像效应[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(6): 835-840.
YU Y J, CHEN J N, HAO J G, *et al.* Propagation and self-imaging effect of deformed high-order Bessel beam[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(6): 835-840. (in Chinese)
- [10] NDAGANO B, NAPE I, COX M A, *et al.* Creation and detection of vector vortex modes for classical and quantum communication[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(2): 292-301.
- [11] CAO H, WANG G Y, ZHANG L C, *et al.* Reflective optical vortex generators with ultrabroadband self-phase compensation[J]. *Advanced Photonics Nexus*, 2023, 2: 026009.
- [12] FISCHER J, WEGENER M. Three-dimensional optical laser lithography beyond the diffraction limit [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2013, 7(1): 22-44.
- [13] 宋博文, 李家文. 中空双螺旋微机器人的飞秒激光动态全息高效加工[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(9): 2101-2107.
SONG B W, LI J W. Rapid fabrication of hollow double helix microrobot using femtosecond laser dynamic holographic method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(9): 2101-2107. (in Chinese)
- [14] WEI L D, LI Y Q, LIU K. Design of freeform illumination sources with arbitrary polarization for immersion lithography[J]. *International Society for Optics and Photonics*, 2014, 24(5): 927221.
- [15] DURNIN J, MICELI J, EBERLY J H. Diffraction-free beams [J]. *Phys Rev Lett*, 1987, 58(15): 1499-1501.
- [16] AL-AWFI S, ARABIA S. Theory of evanescent Bessel beams with a metallic sheet[J]. *Optica Applicata*, 2013, 43(3): 539-550.
- [17] COZZOLINO D, POLINO E, VALERI M, *et al.* Air-core fiber distribution of hybrid vector vortex-polarization entangled states [J]. *Advanced Photonics*, 2019, 1(4): 046005.
- [18] FICKLER R, LAPKIEWICZ R, PLICK W N, *et al.* Quantum entanglement of high angular momenta[J]. *Science*, 2012, 338(6107): 640-643.
- [19] SRINIVASA RAO A, SAMANTA G K. On-axis intensity modulation-free, segmented, zero-order Bessel beams with tunable ranges [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(13): 3029-3032.
- [20] NIV A, BIENER G, KLEINER V, *et al.* Propagation-invariant vectorial Bessel beams obtained by use of quantized Pancharatnam-Berry phase optical elements [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(3): 238-240.
- [21] YANG J Q, HAKALA T K, FRIBERG A T. Generation of arbitrary vector Bessel beams on higher-order Poincaré spheres with an all-dielectric metasurface [J]. *Physical Review A*, 2022, 106(2): 023520.

- [22] LI P, ZHANG Y, LIU S, *et al.* Quasi-Bessel beams with longitudinally varying polarization state generated by employing spectrum engineering [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(20): 4811-4814.
- [23] WENG X, MIAO Y, ZHANG Q, *et al.* Extraction of inherent polarization mode from one single light beam [J]. 2021. DOI: 10.48550/arXiv.2102.11620.
- [24] WENG X Y, SONG Q, LI X M, *et al.* Free-space creation of ultralong anti-diffracting beam with multiple energy oscillations adjusted using optical pen[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 5035.
- [25] WENG X Y, MIAO Y, ZHANG Q L, *et al.* Extraction of inherent polarization modes from an m-order vector vortex beam [J]. *Advanced Photonics Research*, 2022, 3(8): 2100194.
- [26] RICHARDS B, WOLF E. Electromagnetic diffraction in optical systems II. Structure of the image field in an aplanatic system [J]. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1959, 253: 358-379.
- [27] 高春清, 付时尧. 涡旋光束 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2019.
- GAO C Q, FU S Y. *Vortex Beams* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2019. (in Chinese)

作者简介:



殷 亮(1989—),男,江苏新沂人,硕士研究生,助理研究员,2016年毕业于上海理工大学光学工程专业,现就职于上海理工大学,专注于光学成像、光谱分析、激光测量以及光电传感器的设计与优化。E-mail: yinliang@usst.edu.cn

通讯作者:



高秀敏(1978—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,研究员,博士生导师。2003年3月硕士毕业于西北工业大学,2006年3月博士毕业于中国科学院上海光学精密机械研究所,主要从事光场调控、痕量物质检测 and 智能传感技术方向的研究。E-mail: gxm@usst.edu.cn