

引用格式: WANG Kejian, ZHANG Dacheng, YANG Yunxiao, et al. Study on Detection Method of Topological Charge of Femtosecond Vortex Beams[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(10):1026001

王柯俭, 张大成, 杨云霄, 等. 飞秒涡旋光拓扑荷数的检测方法研究[J]. 光子学报, 2021, 50(10):1026001

飞秒涡旋光拓扑荷数的检测方法研究

王柯俭¹, 张大成¹, 杨云霄¹, 刘旭阳¹, 余璇², 雷建廷², 张少锋², 朱江峰¹

(1 西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 西安 710071)

(2 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

摘要: 基于夫琅禾费远场衍射理论和扇形屏衍射法, 分别对低阶飞秒激光进行了涡旋光场检测的理论分析与实验研究。研究表明, 飞秒激光包含的频率成分仅会对衍射结果的高频项结果产生相消作用, 且频率成分越丰富该效应越强; 但是, 频率成分并不会改变中央主极大部分。因此, 利用扇形屏衍射法可以对所产生超快涡旋光场进行检测。此外, 扇形屏衍射结果的光场能量分布均匀性会受到扇形屏角度的影响, 并随角度的增加而降低。本研究将该方法的适用范围扩展至飞秒脉冲激光领域, 为扇形屏最佳测量角度的选择提供了依据, 并为后续开展飞秒放大器的涡旋光场调制与检测提供了理论与实验基础。

关键词: 衍射; 涡旋光束; 光场调控; 飞秒; 扇形屏

中图分类号: O436

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20215010.1026001

Study on Detection Method of Topological Charge of Femtosecond Vortex Beams

WANG Kejian¹, ZHANG Dacheng¹, YANG Yunxiao¹, LIU Xuyang¹, YU Xuan²,
LEI Jianting², ZHANG Shaofeng², ZHU Jiangfeng¹

(1 School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(2 Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The Fraunhofer far-field diffraction theory and a sectorial screen were used to study the low-order femtosecond vortex beams, theoretically and experimentally. The experimental results show that the frequency component within femtosecond laser can produce destructive interference in the high-frequency area. And the more frequency component is, the stronger the effect becomes. However, it can't change the principal maximum part. So, the sectorial screen can also be used to detect the femtosecond vortex beams. The results also show that the uniformity of the energy distribution can be affected by angles of the sectorial screen. It decreases with the increase of angle. The sectorial screen method was extended to detect the femtosecond vortex beams in this work. It provides a basis for the selection of the best measurement angle. Moreover, the method could be the theoretical and experimental basis for the study on vortex beams from femtosecond amplifiers.

Key words: Diffraction; Vortex beam; Light field regulation; Femtosecond; Sectorial screen

OCIS Codes: 260.1960; 050.1940; 050.1960; 050.4865

基金项目: 国家自然科学基金(No. U2032136), 陕西省自然科学基金基础研究计划(No. 2019JCY-03), 兰州重离子加速器国家实验室用户项目

第一作者: 王柯俭(1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为激光技术。Email: wlkxjl2008@126.com

导师: 朱江峰(1980—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为超快激光技术。Email: jfzhu@xidian.edu.cn

通讯作者: 张大成(1981—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为激光光谱与激光技术。Email: dch.zhang@xidian.edu.cn

收稿日期: 2021-07-15; **录用日期:** 2021-09-06

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

涡旋光因具有相位因子,从而具有螺旋状相位波前及携带轨道角动量(Orbital Angular Momentum, OAM)等特性,为光场调制及光与物质相互作用提供了更多自由度。自1992年,ALLEN L证明涡旋光中每个光子均携带OAM后^[1],涡旋光逐渐受到人们的关注,并在激光微纳加工^[2-3]、显微成像^[4-5]、光通信^[6-7]及微粒操控^[8-9]等领域展现出独特的优势。在光与物质相互作用时,强激光场会影响电离电子的分布情况。采用经典理论,当激光场强大于原子内部库仑力时,可以近似解释为电子在光场的调制下做变加速运动^[10],所以,利用涡旋光的轨道角动量特性可以实现对原子电子更高维度的量子操控^[11-12]。在利用涡旋光场开展原子分子动力学研究时,需要详细分析涡旋光场与电子的角动量分布间的关系,为此,需要对二者进行测量。

涡旋光的检测,可根据其物理本质分为模式转换法、干涉法和衍射法三类。模式转换法是利用诸如叉形光栅^[13]、柱透镜^[14]、象散透镜^[15]等模式转换器,将涡旋光转换为其它类型的光束,从而实现对OAM的检测。该方法的原理较为直观,但检测器件制作难度较大且成本较高。干涉法是利用涡旋光与平面波、球面波^[16]、共轭光束^[17]干涉或使用杨氏双缝干涉仪^[18]等,通过分析干涉条纹实现OAM的检测。该方法成本低、结果明确,但需调节多路光束。衍射法因检测光路简单、衍射器件成本较低,在涡旋光检测方面得到了越来越多的应用。2010年,HICKMANN等提出三角孔^[19]、矩形孔^[20]衍射法,衍射图像边线上的亮点分布反映了OAM值。2017年,CHEN R等提出扇形屏衍射法^[21],衍射图像为一具有亮点的圆环,亮点的数目及朝向代表了OAM的大小与正负。2018年,李润泉等利用正六边形多孔阵^[22],通过观察衍射图像的周期性列变化实现OAM的检测。近年来,随着新材料及计算机算法等的发展,研究成果不断涌现。2018年,OU K等利用具有特殊纳米结构的超表面材料,实现了涡旋光产生及检测光路的集成化,厚度仅为亚波长^[23]量级。2019年,HE Y等利用模糊神经网络算法(Fuzzy Neural Network, FNN),对叉型光栅提取出的涡旋光束特征进行建模学习,实现了1.2 s内对10 000个拓扑荷数 $l \in [-25, 25]$ 的涡旋光光斑图像的特征识别,正确率可达99.55%^[24]。LU X等及DING X等分别与2019、2020年,将干涉法与相位重构算法相结合,在干涉条纹的基础上实现对其空间相位分布的重建,使结果更精确^[25-26]。

然而,上述检验方法均应用于连续涡旋光场的检测,在飞秒涡旋光场的检测方面,相关报道非常有限。本文采用扇形屏衍射法对飞秒涡旋光的衍射特征进行了研究,证明了该方法在飞秒激光领域依旧适用。通过研究扇形屏角度对衍射结果的影响,讨论了不同条件下获得最佳检测效果的扇形屏角度,为飞秒涡旋光场检测提供参考。

1 理论模型

1.1 衍射公式的推导

拉盖尔-高斯光是一种常见的涡旋光,以此为例进行分析与实验。拉盖尔-高斯光束的振幅公式以拉盖尔多项式的形式表示^[1],即

$$u_{(p,l)}^{\text{LG}}(r, \varphi, z) = \sqrt{\frac{2p!}{\pi(|l|+p)!}} \frac{1}{w(z)} \left(\sqrt{2} \frac{r}{w(z)} \right)^l L_p^l \left(2 \frac{r^2}{w(z)^2} \right) \times \exp(i l \varphi) \times \exp \left(- \frac{r^2}{w(z)^2} - i k \frac{r^2}{2R(z)} \right) \times \exp [i (2p + |l| + 1) \Phi(z)] \quad (1)$$

式中, L_p^l 为广义拉盖尔多项式, l 为涡旋光的拓扑荷数, p 为角向指数(在本文中为0), k 为波数, $w(z)$ 为 z 位置处的光斑半径, $R(z)$ 为该位置的曲率半径, $\Phi(z)$ 为该位置的古依相移。当 $l=0$ 时,涡旋光退化为基模高斯光束。

扇形衍射屏的透过函数为 $T(\varphi) = \begin{cases} 0 & \varphi_1 < \varphi < \varphi_2 \\ 1 & \text{others} \end{cases}$,经此衍射屏后的涡旋光场分布变为 $U_1(r, \varphi) = u(r, \varphi) \times t(\varphi)$ 。当涡旋光通过该衍射屏后,夫琅禾费衍射结果可表示为

$$U(r', \varphi') = \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \exp \left(i \frac{k}{2z} r'^2 \right) \iint_{\Sigma} U_1(r, \varphi) \exp \left[-i \frac{2\pi}{\lambda z} r r' \cos(\varphi - \varphi') \right] r dr d\varphi \quad (2)$$

由于式(2)难以直接计算获得解析解,为简化计算将此过程分为两部分,即不同位置的小角度远场衍射过程和衍射结果的互相干涉过程。将通光部分分为 N 份,当满足 $\delta\varphi \ll (2\pi - \Delta\varphi)/l$ 、 $N = (2\pi - \Delta\varphi)/\delta\varphi$

时,可以认为每一部分内部各处相位相同,近似为平行光的远场三角缝衍射。LI J C^[27]通过研究飞秒与连续光的圆孔夫琅禾费衍射结果得出,飞秒光具有的频率成分会导致衍射结果产生变化。因此,表示频率成分及其强度的项不可省略,飞秒涡旋光的三角缝衍射公式为

$$u_1(r', \varphi) \propto \left\{ \frac{r_0}{y'} \exp \left[-i\pi(x' + y'\delta\varphi) \frac{r_0}{\lambda} \right] \operatorname{sinc} \left[\pi(x' + y'\delta\varphi) \frac{r_0}{\lambda} \right] - \frac{r_0}{y'} \exp \left(-i\pi x' \frac{r_0}{\lambda} \right) \operatorname{sinc} \left(\pi x' \frac{r_0}{\lambda} \right) \right\} \exp \left\{ - \left[\Delta\tau \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} \right) \right]^2 \right\} \quad (3)$$

式中, $\Delta\tau$ 为光的脉冲宽度, λ 为光的波长, λ_0 为光的中心波长。

在远场,各处衍射相互干涉叠加,其结果可表示为

$$U(r', \varphi) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \sum_{n=0}^{N-1} u_1(r', \varphi' + n\delta\varphi) \cdot \exp(-in\delta\varphi) d\lambda \quad (4)$$

式中, λ_1, λ_2 分别为飞秒光所具有频率成分的最短波长和最长波长。将式(3)代入式(4),即可得到飞秒涡旋光经过扇形屏后的衍射结果。

1.2 频率成分对飞秒涡旋光衍射的影响

根据原子分子动力学实验测量需要,对钛宝石激光器的光场调制进行重点研究。为验证扇形屏衍射法对飞秒涡旋光场检测的可行性,首先开展了连续波涡旋激光场与脉冲涡旋激光场经过扇形衍射屏的衍射效果模拟。利用MATLAB模拟了在拓扑荷数 $l=1$ 以及通光孔径 $r=5\text{ mm}$ 的调制条件下,中心波长为 $\lambda_0=800\text{ nm}$ 的连续光以及脉宽分别为 30 fs 、 100 fs 的脉冲涡旋激光场经过 $\varphi = \frac{\pi}{4}$ 的扇形屏的衍射过程,衍射结果如图1。其中,图1(a)~(c)分别表示连续光、脉冲宽度 $\tau=100\text{ fs}$ 以及脉冲宽度 $\tau=30\text{ fs}$ 的涡旋光衍射模拟

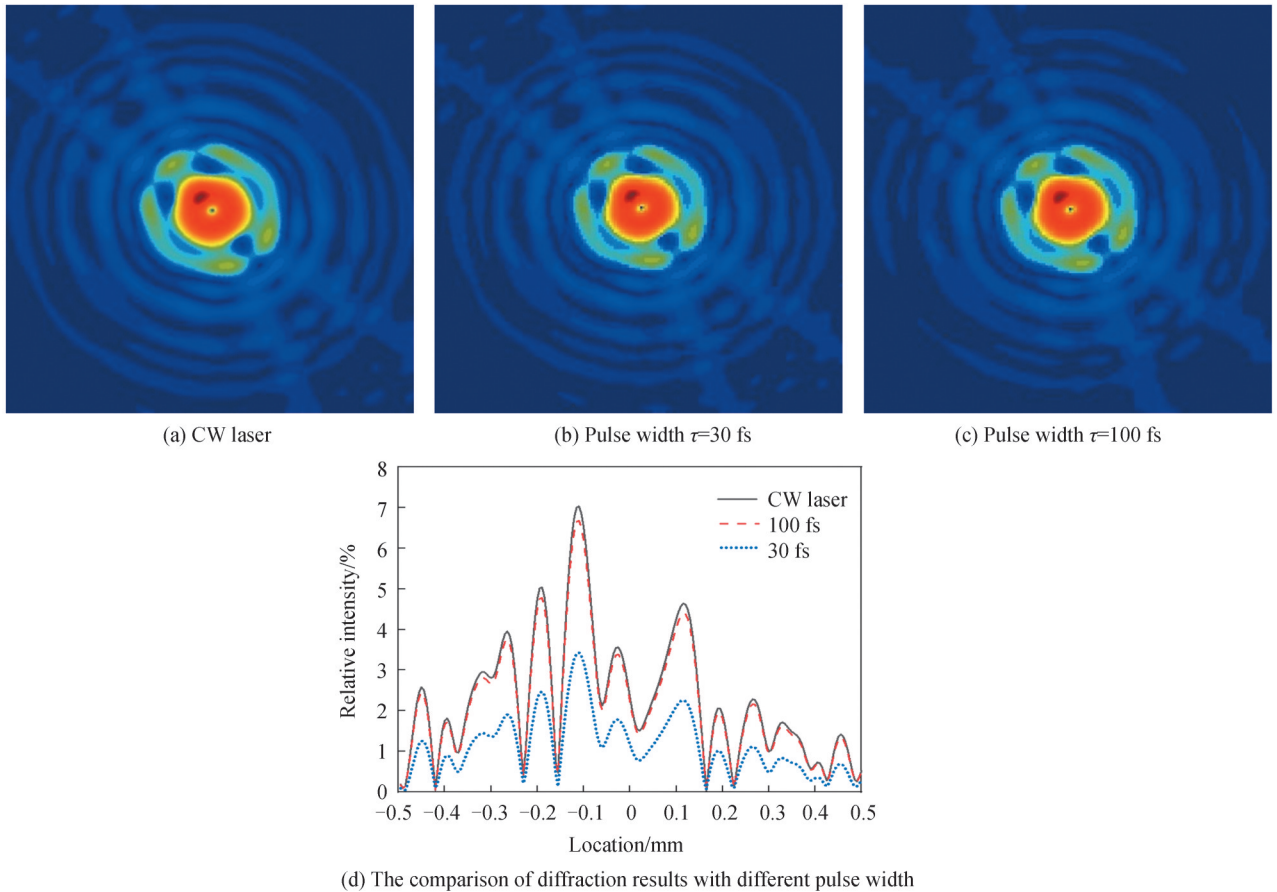


图1 不同脉宽激光经过扇形衍射屏衍射的模拟结果
Fig. 1 The simulation results of the diffraction of vortex beams with different pulse widths

结果,图1(d)表示高频项处不同脉宽的衍射结果在同一截面上的强度对比。可以看出,三者具有相同的中央主极大部分,仅在高频项部分,由于飞秒激光包含的频率成分增多而产生严重的干涉相消现象。该模拟结果表明,利用扇形屏衍射法在理论上可以实现对飞秒激光涡旋光场的OAM检测。

1.3 扇形屏角度对飞秒涡旋光衍射的影响

在通光孔径 $r = 5 \text{ mm}$ 及拓扑荷数 $l = 1$ 的条件下,中心波长 $\lambda_0 = 800 \text{ nm}$ 、脉冲宽度 $\tau = 100 \text{ fs}$ 的涡旋光场分别通过角度为 $\frac{\pi}{24}$ 、 $\frac{\pi}{12}$ 、 $\frac{\pi}{6}$ 及 $\frac{\pi}{4}$ 的扇形屏后,其衍射图样的模拟结果如图2。可以看出,随着遮光角度的增加,能量愈发向亮点处集中,圆环能量分布的均匀性降低。

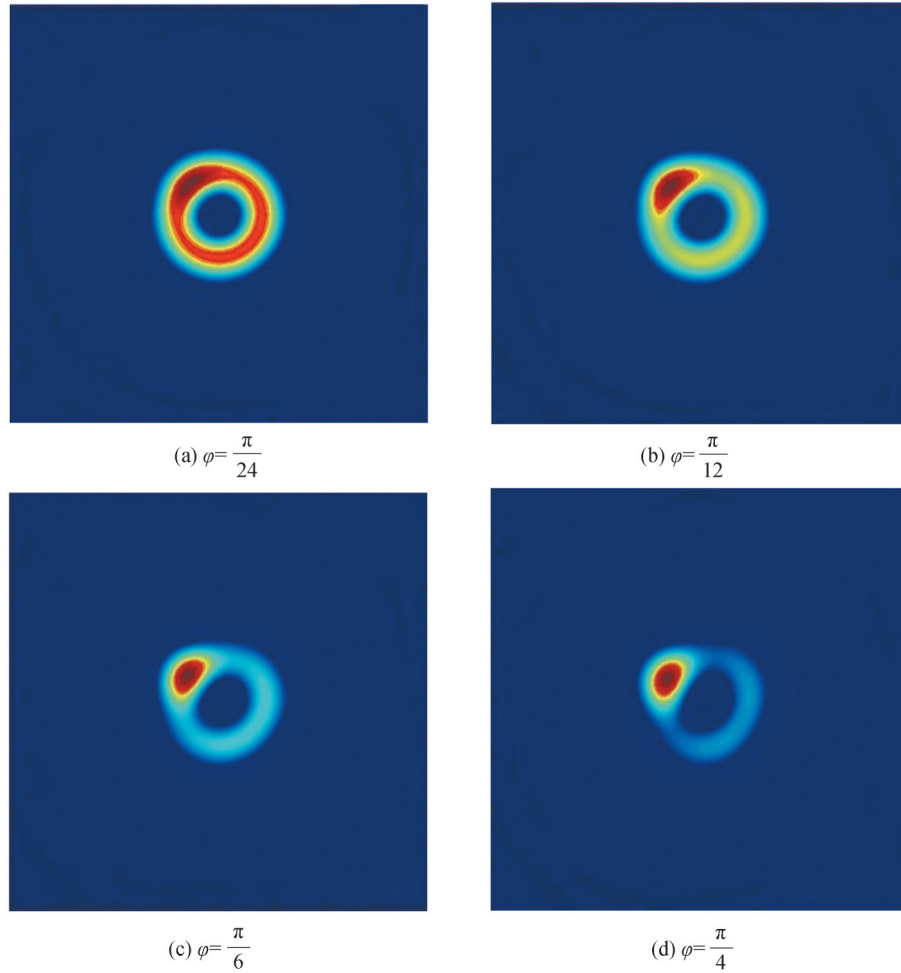


图2 不同扇形屏角度下的模拟衍射结果

Fig. 2 The diffraction results of vortex beams with different sectorial screen angles

2 实验装置

为验证上述模拟结果,利用中心波长为 $\lambda_0 = 800 \text{ nm}$ 、脉冲宽度分别为 $\tau = 100 \text{ fs}$ (MaiTai, spectraphysics, USA) 和 $\tau = 30 \text{ fs}$ (Griffin, KM Labs, USA) 的两台钛宝石振荡器为光源,对其进行涡旋光场调制,然后进行涡旋光场检测,所用实验装置如图3。光阑 AS1、AS2、AS3 用于调整入射光的方向,以保证光束通过所有器件的中心。扩束器用于扩大入射光的光束直径,这既有利于减少因偏心误差造成的涡旋光光束质量下降,也有利于使用 AS2 选取光束中光束质量较高的部分。HWP、PBS 与 QWP 共同作为偏振调控系统,可以消除入射光偏振态对结果的影响,并根据需要调节光束的偏振态。SPP 为螺旋相位板,用于将 TEM_{00} 模的高斯光束转换为涡旋光,该器件的参数为 $l = 1$ 。AS3 可组成扇形屏衍射器,对涡旋光进行检测,实现对其 OAM 的测量。凸透镜用于将远场衍射结果移动至其焦平面上,通过放置在该位置的 CCD 探头 (MER, Daheng Imaging, CHN) 实现对衍射图像的收集。

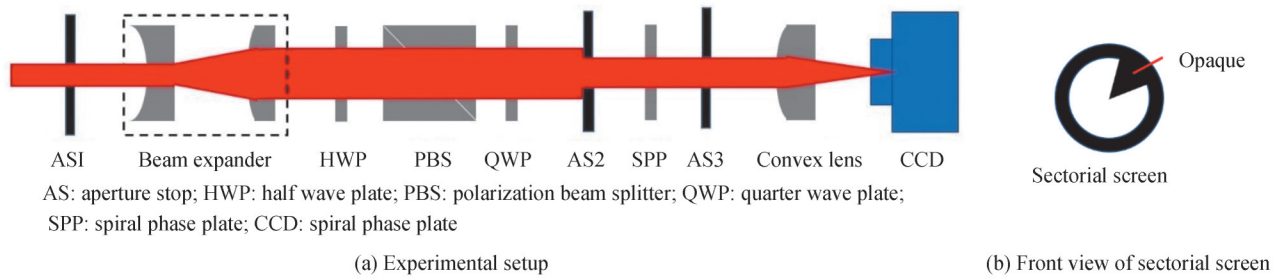


图3 涡旋光调制与检测实验装置示意图

Fig. 3 The experimental setup for vortex beams modulation and detection

3 实验结果与讨论

在扇形屏角度为 $\varphi = \frac{\pi}{4}$ 的条件下,对中心波长为 $\lambda_0 = 800 \text{ nm}$ 的连续激光以及脉宽分别为 $\tau = 100 \text{ fs}$ 、 $\tau = 30 \text{ fs}$ 的飞秒激光进行调制,这两种脉宽的飞秒激光经调制得到的涡旋光衍射结果如图4,激光的光谱如图5。其中图4(a)~(c)分别为连续光、 $\tau = 100 \text{ fs}$ 以及 $\tau = 30 \text{ fs}$ 涡旋光的中央主极大衍射结果,图4(d)~(f)分别为连续光、 $\tau = 100 \text{ fs}$ 以及 $\tau = 30 \text{ fs}$ 涡旋光的高频项区域衍射结果。

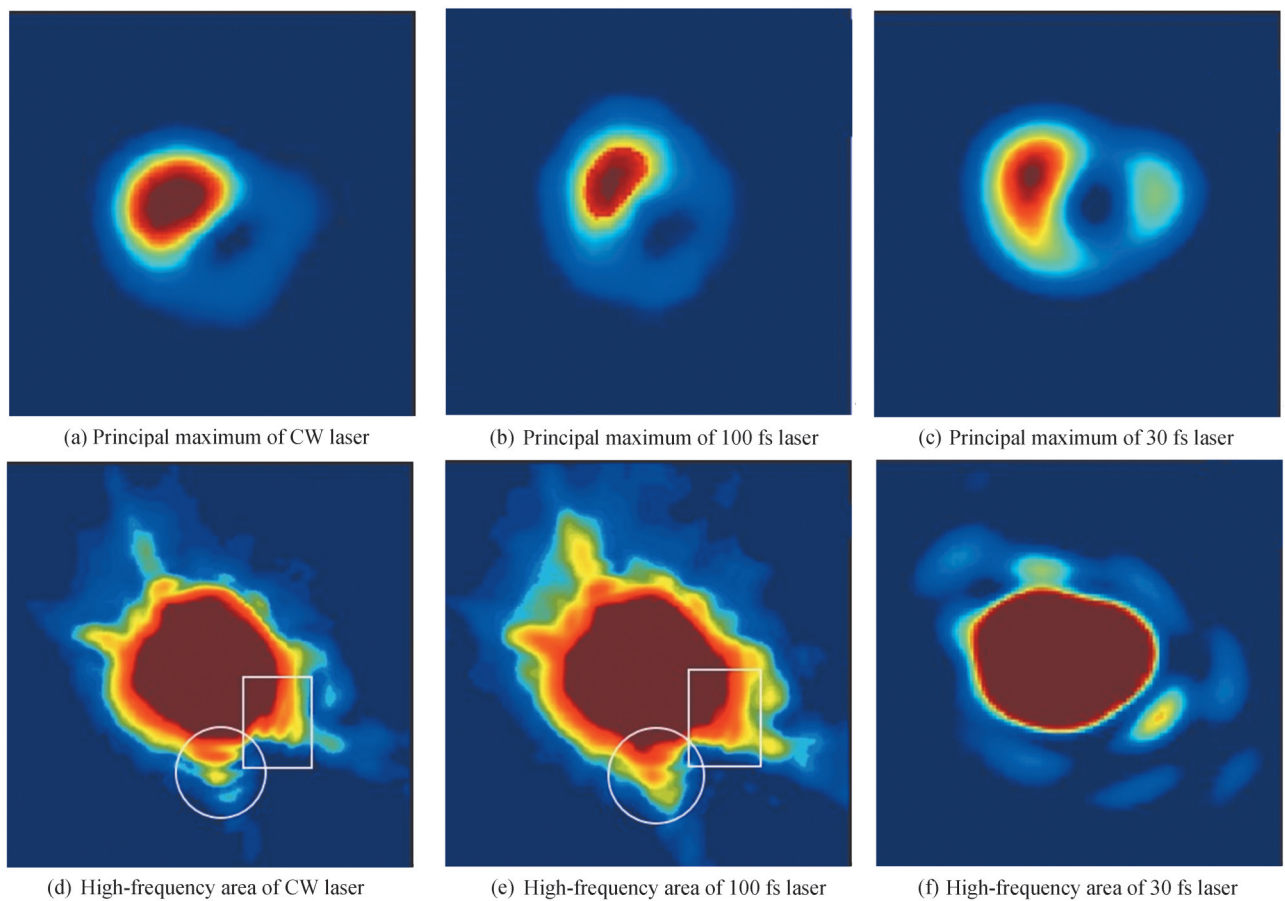


图4 不同脉宽下的衍射实验结果

由以上结果可知,飞秒与连续涡旋光的衍射结果在中央主极大处有极大的相似性,并与理论模拟结果符合得较好。如图1(d)的模拟结果所示,高频项具有的激光能量极低,不到中央主极大区域的10%。受限于CCD的动态范围,在焦点处进行图像的采集时不可避免地出现了光斑中央过曝以及高频项处部分条纹丢失的情况。但在光斑边缘处可以看出,相比于连续涡旋光,飞秒涡旋光的衍射结果出现了条纹相消、对比度

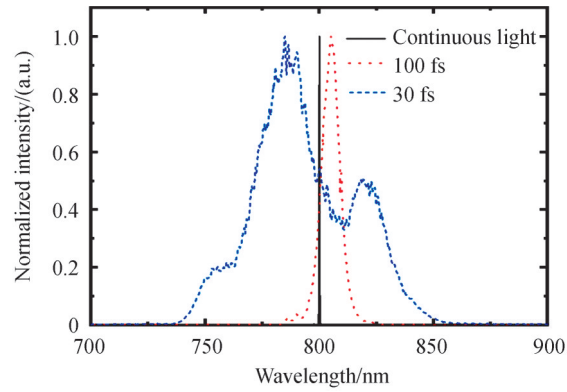


图5 不同脉宽激光的光谱形状

Fig. 5 The spectra of lasers with different pulse widths

降低的结果,并且当脉冲宽度降低时这一现象出现明显的增强。上述两种现象均与模拟结果一致。由于该方法是利用衍射图像主极大处的图像实现对OAM的检测,脉冲宽度的变化并不会对其结果造成影响,因此对于拓扑荷数 $l=1$ 的情况,该方法在飞秒光领域依旧具有适用性。当拓扑荷数大小改变时,中央主极大圆环上的亮点数量会变为相应的数值,模拟结果如图6。其中,图6(a)~(c)分别为 $l=2$ 、 $l=3$ 、 $l=4$ 时的连续涡旋光衍射结果,图6(d)~(f)分别为 $l=2$ 、 $l=3$ 、 $l=4$ 时的飞秒涡旋光衍射结果。可以看出,当拓扑荷数改变时,脉冲宽度依然仅影响结果的高频项区域。可见,当拓扑荷数改变时,该方法依旧在飞秒光领域具有可行性。

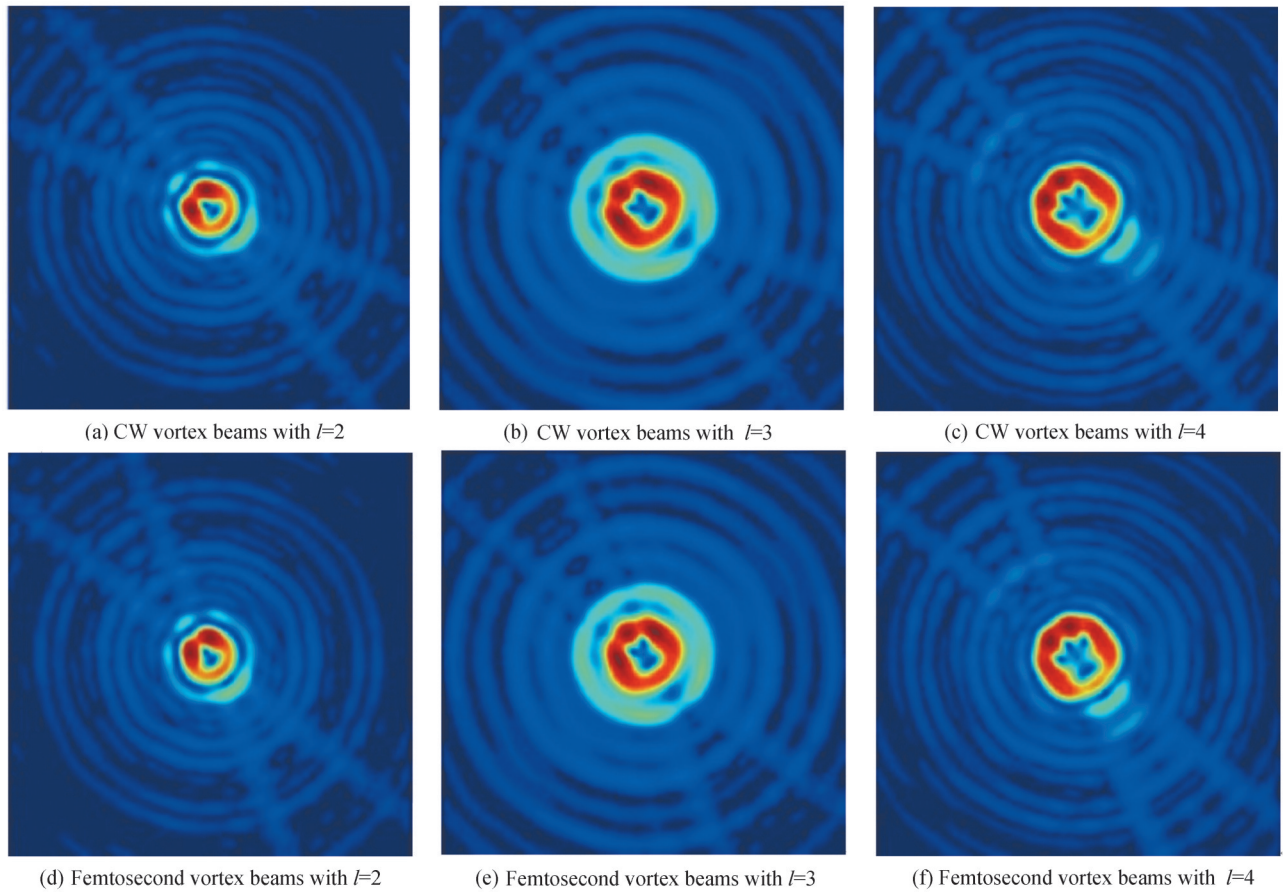


图6 不同拓扑荷数的连续、飞秒涡旋光的模拟衍射结果

Fig. 6 Diffraction results of continuous and femtosecond vortex beams with different topological charges

保持脉冲宽度 $\tau = 100$ fs、中心波长 $\lambda_0 = 800$ nm 不变,改变扇形屏的角度为 $\varphi_1 = \frac{\pi}{24}$ 、 $\varphi_2 = \frac{\pi}{12}$ 、 $\varphi_3 = \frac{\pi}{6}$ 、 $\varphi_4 = \frac{\pi}{4}$,得到的实验结果如图 7。其中,图 7(a)~(d)分别为扇形屏角度 $\varphi_1 = \frac{\pi}{24}$ 、 $\varphi_2 = \frac{\pi}{12}$ 、 $\varphi_3 = \frac{\pi}{6}$ 、 $\varphi_4 = \frac{\pi}{4}$ 时的涡旋光衍射结果。

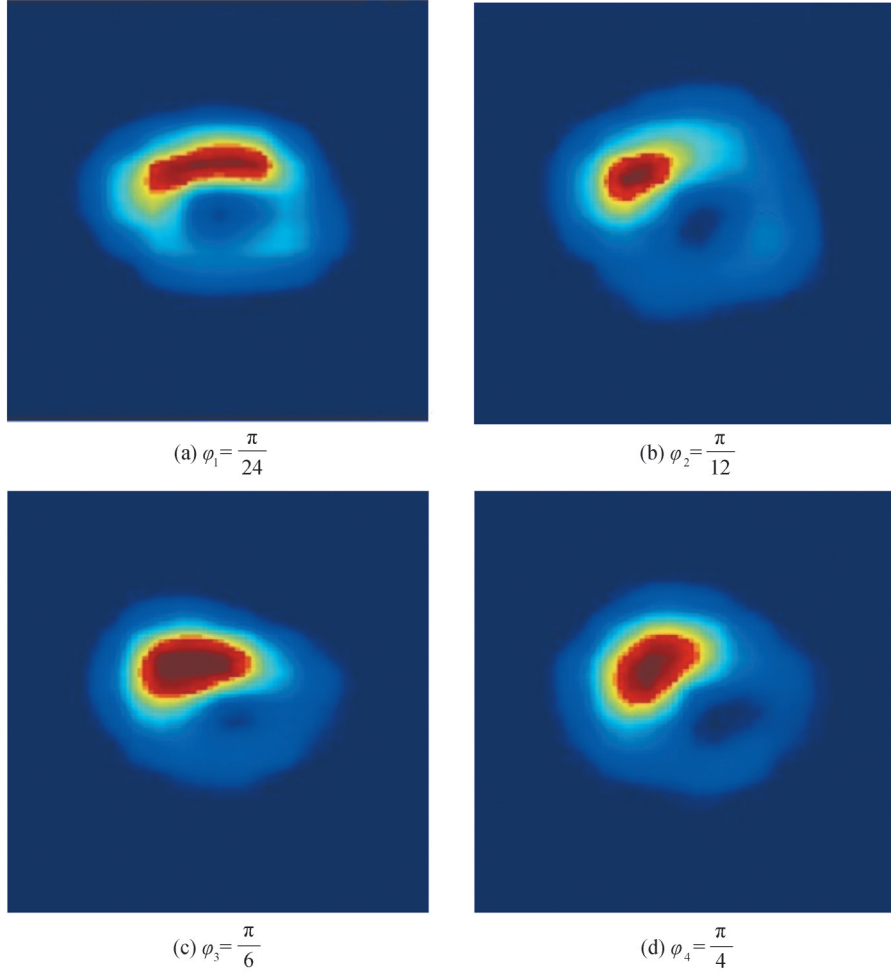


图 7 涡旋光在不同扇形屏角度下的衍射实验结果

Fig. 7 The experimental diffraction results of vortex beams with different sectorial screen angles

由以上结果可知,遮光角度仅影响衍射结果的能量分布情况,随着遮光角度的增加,圆环的能量就越集中于亮点处,形变也越严重。适当的增加扇形屏的角度有利于提高亮点与圆环的对比度,从而便于观察衍射结果;但角度过大会使圆环部分能量过低,导致测量时信息捕捉不全,造成观测时的误判。两款激光器调制的涡旋光检测结果对比如图 8。其中图 8(a)~(c)分别为使用脉冲宽度 $\tau = 100$ fs 的激光器(MaiTai, spectra-physics, USA)的涡旋光调制结果以及通过角度为 $\varphi = \frac{\pi}{6}$ 、 $\varphi = \frac{\pi}{4}$ 的扇形屏时的检测结果;图 8(d)~(f)分别为使用脉冲宽度 $\tau = 30$ fs 的激光器(Griffin, KM Labs, USA)的涡旋光调制以及通过角度为 $\varphi' = \frac{\pi}{6}$ 、 $\varphi' = \frac{\pi}{4}$ 的扇形屏时的检测结果。可以看出,由于调制及测量时难以避免的误差,涡旋光光斑并非能量均匀分布的圆环。为了提高检测准确性,所用扇形屏必须产生足够多的形变量,从而可以忽略误差对光斑能量分布造成的影响。因此,当调制光源不同,与其对应的最佳扇形屏角度也要随之改变。如图 8(a)、(d)所示, MaiTai 激光器的输出激光在 X、Y 两轴较为均匀,调制出的涡旋光也呈较为均匀的圆环;而 Griffin 激光器的输出激光在 X、Y 两轴上差异较大,这使得调制出的涡旋光呈椭圆环形分布。当使用 MaiTai 激光器时,由于

光束质量较高,扇形屏角度增加至 $\varphi = \frac{\pi}{6}$ 时的结果已具有足够的差异性,可以忽略误差带来的影响,无需继续增加扇形屏的角度;而使用Griffin激光器时,由于光束质量较低,扇形屏角度为 $\varphi = \frac{\pi}{4}$ 时的结果才与检测前的图像有明显区别,因此需使用较大角度的扇形屏。综上所述,在光束质量较高时,扇形屏的最佳角度是 $\varphi = \frac{\pi}{6}$;在光束质量较差时,应适当的增加扇形屏角度可便于获得好的检测图样,最佳测量角度为 $\varphi = \frac{\pi}{4}$ 。该研究对后续开展飞秒放大器光场调制与检测具有参考意义。

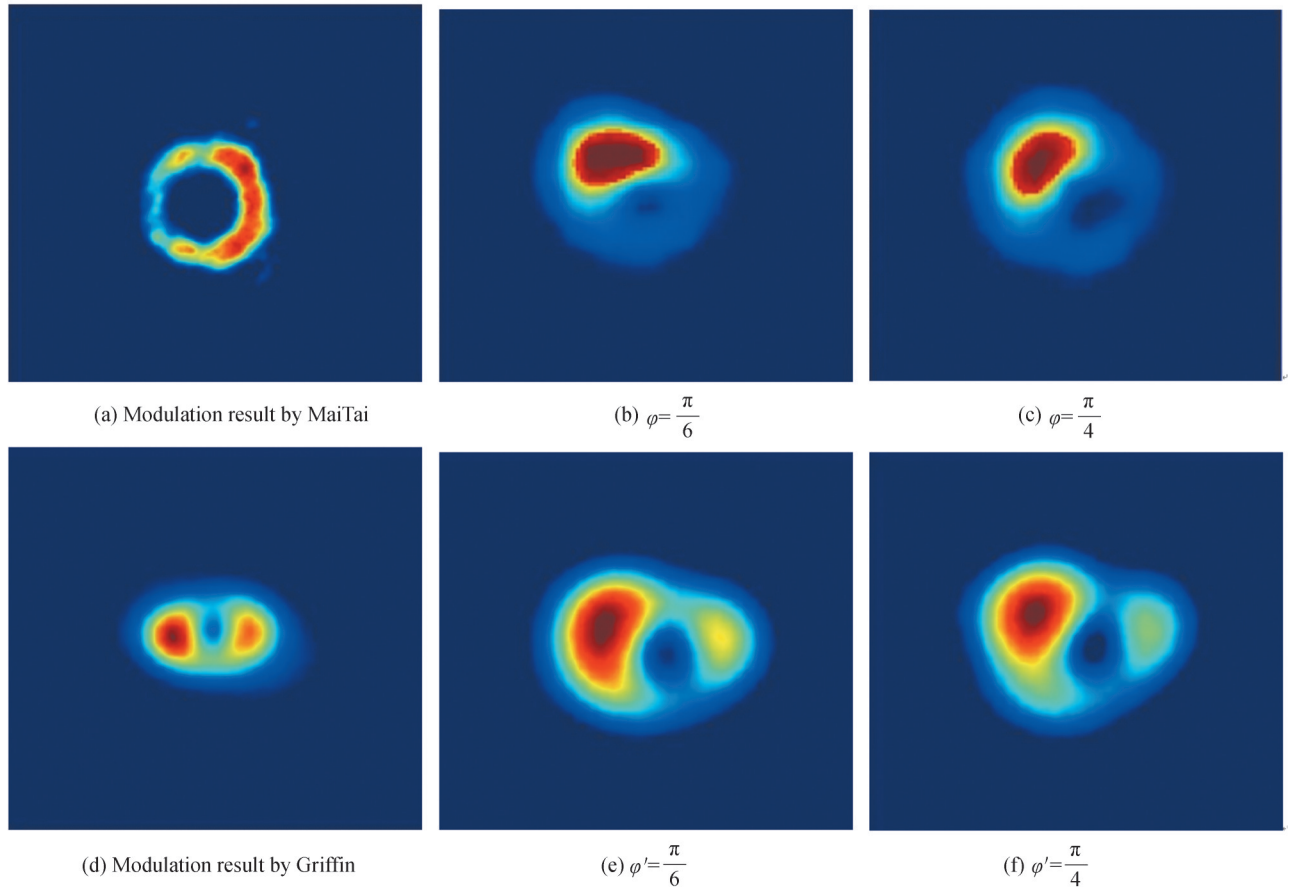


图8 不同激光器的涡旋光调制、检测实验结果

Fig. 8 The experimental modulation and detection results of vortex beams with different oscillators

4 结论

设计搭建了一套飞秒激光涡旋光场产生与测量装置,研究了利用扇形屏衍射法进行飞秒激光涡旋光场检测的可行性。通过理论模拟与实验测量,详细研究了连续激光、不同脉宽飞秒激光以及不同扇形屏角度下的涡旋光衍射结果。研究表明,扇形屏衍射结果的高频项区域会随着飞秒光频率成分增加而出现越来越强的干涉相消现象,但中央主极大处的衍射结果不受频率成分的影响;并且,随扇形屏角度的增加,亮点与圆环的对比度提高,同时圆环的形变也愈发严重。因此,扇形屏衍射法对涡旋光场的检测能力不受飞秒光所具有频率成分的影响。研究还发现,通过观察衍射结果的相消情况可以判断光束具有频率成分;扇形屏角度影响衍射结果的能量分布与形变情况,在选择采用的扇形屏角度时,需要进行综合考虑上述两个因素以实现最佳的检测效果,当光束质量较高时最佳扇形屏角度为 $\varphi = \frac{\pi}{6}$,当光束质量较差时应适当增加遮光屏的角度,最佳扇形屏角度为 $\varphi = \frac{\pi}{4}$ 。然而,在实际原子分子动力学研究中,需要使用的是飞秒放大器输出的毫焦量级的高能量飞秒激光脉冲。因此,下一步将会以飞秒放大器为光源,结合放大器的特点,对飞秒

涡旋光的调制与检测做进一步研究。

参考文献

- [1] ALLEN L, BEIJERSBERGEN M W, SPREEUW R J C, et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. *Physical Review A*, 1992, 45(11): 8185.
- [2] ALLEGRE O J, LI Z, LI L. Tailored laser vector fields for high-precision micro-manufacturing[J]. *Cirp Annals*, 2019, 68(1): 193-196.
- [3] SYUBAEV S, ZHIZHENKO A, KUCHMIZHAK A, et al. Direct laser printing of chiral plasmonic nanojets by vortex beams[J]. *Optics Express*, 2017, 25(9): 10214-10223.
- [4] KOZAWA Y, MATSUNAGA D, SATO S. Superresolution imaging via superoscillation focusing of a radially polarized beam[J]. *Optica*, 2018, 5(2): 86-92.
- [5] WEI S, LEI T, DU L, et al. Sub-100nm resolution PSIM by utilizing modified optical vortices with fractional topological charges for precise phase shifting[J]. *Optics Express*, 2015, 23(23): 30143-30148.
- [6] LEI T, ZHANG M, LI Y, et al. Massive individual orbital angular momentum channels for multiplexing enabled by Dammann gratings[J]. *Light: Science & Applications*, 2015, 4(3): e257-e257.
- [7] REN Y, LI L, WANG Z, et al. Orbital angular momentum-based space division multiplexing for high-capacity underwater optical communications[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 1-10.
- [8] PADGETT M, BOWMAN R. Tweezers with a twist[J]. *Nature photonics*, 2011, 5(6): 343-348.
- [9] ZHANG Y, SHI W, SHEN Z, et al. A plasmonic spanner for metal particle manipulation[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 1-9.
- [10] PROTOPAPAS M, KEITEL C H, KNIGHT P L. Atomic physics with super-high intensity lasers[J]. *Reports on Progress in Physics*, 1997, 60(4): 389.
- [11] FANG Y, HAN M, GE P, et al. Photoelectronic mapping of the spin-orbit interaction of intense light fields[J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(2): 115-120.
- [12] MOLINA-TERRIZA G, TORRES J P, TORNER L. Twisted photons[J]. *Nature Physics*, 2007, 3(5): 305-310.
- [13] MAIR A, VAZIRI A, WEIHS G, et al. Entanglement of the orbital angular momentum states of photons[J]. *Nature*, 2001, 412(6844): 313-316.
- [14] BEIJERSBERGEN M W, ALLEN L, VEEN HVAN DER, et al. Astigmatic laser mode converters and transfer of orbital angular momentum[J]. *Optics Communications*, 1993, 96(1-3): 123-132.
- [15] BEKSHAEV A Y, SOSKIN M S, VASNETSOV M V. Transformation of higher-order optical vortices upon focusing by an astigmatic lens[J]. *Optics Communications*, 2004, 241(4-6): 237-247.
- [16] SHEN Y, WANG X, XIE Z, et al. Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8(1): 1-29.
- [17] LEACH J, PADGETT M J, BARNETT S M, et al. Measuring the orbital angular momentum of a single photon[J]. *Physical Review Letters*, 2002, 88(25): 257901.
- [18] SZTUL H I, ALFANO R R. Double-slit interference with Laguerre-Gaussian beams[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(7): 999-1001.
- [19] HICKMANN J M, FONSECA E J S, SOARES W C, et al. Unveiling a truncated optical lattice associated with a triangular aperture using light's orbital angular momentum[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105(5): 053904.
- [20] MESQUITA P H F, JESUS-SILVA A J, FONSECA E J S, et al. Engineering a square truncated lattice with light's orbital angular momentum[J]. *Optics Express*, 2011, 19(21): 20616-20621.
- [21] CHEN R, ZHANG X, ZHOU Y, et al. Detecting the topological charge of optical vortex beams using a sectorial screen[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(16): 4868-4872.
- [22] LI Runqian, WANG Zhi, CUI Can, et al. Diffraction of vortex beam by regular hexagonal multi g hole array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(10): 1005002.
李润泉,王智,崔燊,等.正六边形多孔阵列的涡旋光衍射[J].*光学学报*, 2018, 38(10): 1005002.
- [23] OU K, LI G, LI T, et al. High efficiency focusing vortex generation and detection with polarization-insensitive dielectric metasurfaces[J]. *Nanoscale*, 2018, 10(40): 19154-19161.
- [24] HE Y, LIU J, WANG P, et al. Detecting orbital angular momentum modes of vortex beams using feed-forward neural network[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(23): 5848-5855.
- [25] LU X, ZHAO C, SHAO Y, et al. Phase detection of coherence singularities and determination of the topological charge of a partially coherent vortex beam[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 114(20): 201106.
- [26] DING X, FENG G, ZHOU S. Detection of phase distribution of vortex beams based on low frequency heterodyne interferometry with a common commercial CCD camera[J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 116(3): 031106.
- [27] LI J C, ZHANG H F, ALEXANDER D R, et al. Diffraction characteristics of 10 fs laser pulses passing through an aperture[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2005, 22(7): 1304-1310.