

直接输出的超短脉冲轨道角动量涡旋光产生技术研究进展（特邀）

汪莎 张志成 邓国亮 周寿桓

Research progress on direct generation of ultrashort pulse OAM vortex beams (*Invited*)

Wang Sha, Zhang Zhicheng, Deng Guoliang, Zhou Shouhuan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20201061>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

双SESAM被动锁模超短脉冲光纤激光器

Double SESAM passively mode-locked ultrashort pulse fiber laser

红外与激光工程. 2018, 47(5): 505002–0505002(6) <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0505002>

基于涡旋光与球面波干涉的微位移测量研究

Measurement of micro-displacement based on the interference of vortex beams and spherical wave

红外与激光工程. 2020, 49(4): 0413005–0413005–6 <https://doi.org/10.3788/IRLA202049.0413005>

轨道角动量叠加态的产生及其检验

Generation of Orbital Angular Momentum superpositions and its test

红外与激光工程. 2018, 47(4): 417007–0417007(6) <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0417007>

涡旋光束的自适应光学波前校正技术

Adaptive optics wavefront correction techniques of vortex beams

红外与激光工程. 2017, 46(2): 201001–0201001(6) <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0201001>

超短脉冲偏振分割放大技术研究进展(特邀)

Advances in ultrashort divided-pulse amplification systems(*Invited*)

红外与激光工程. 2018, 47(1): 103004–0103004(9) <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0103004>

多通螺旋相位板的涡旋光拓扑荷数4重加倍

Quadrupling topological charges of vortex using multi-passed spiral phase plate

红外与激光工程. 2018, 47(9): 918008–0918008(6) <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0918008>

直接输出的超短脉冲轨道角动量涡旋光 产生技术研究进展 (特邀)

汪 莎¹, 张志成¹, 邓国亮^{1*}, 周寿桓^{1,2}

(1. 四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610065;
2. 华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 轨道角动量 (OAM) 涡旋光是一种具有相位孤立奇点的光场, 其相位波前呈螺旋分布, 光场复振幅包含螺旋相位项 $\exp(i\ell\theta)$ 。近年来, OAM 涡旋光被广泛地应用在光学操控、成像、通信、传感等方面。超短脉冲 OAM 涡旋光同时具有涡旋光和超短脉冲的优点, 可应用于手性材料加工、远距离传输、强场物理研究, 非线性频率转换研究等方面。通过激光器直接产生 OAM 涡旋光具有系统整体简便性高和光束质量好等优势, 对国内外基于有源方法产生超短 OAM 涡旋光的方法进行了总结。目前, 通过有源方式产生的超短 OAM 涡旋光的脉冲宽度还局限于几百飞秒, 如何通过直接输出的方法获得百飞秒以内甚至是少周期脉冲涡旋光输出将是未来研究的一个重要方向。

关键词: 涡旋光; 超短脉冲; 直接输出

中图分类号: O439 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20201061

Research progress on direct generation of ultrashort pulse OAM vortex beams (*Invited*)

Wang Sha¹, Zhang Zhicheng¹, Deng Guoliang^{1*}, Zhou Shouhuan^{1,2}

(1. College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China;
2. North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: Orbital angular momentum (OAM) vortex beam has a phase singularity with a twisted wave-front, whose complex amplitude comprises the helical term $\exp(i\ell\theta)$. OAM vortex beam has been widely used in optical manipulation, imaging, optical communication, sensing and so on. Ultra-short pulse OAM vortex beams have the advantages of both vortex beams and ultra-short pulses, and can be applied to chiral material processing, long distance transmission, strong field physics and nonlinear frequency conversion. Direct generation of ultra-short OAM vortex beams has the advantages of compact and simple system and good beam quality. The research progress on direct generation of ultra-short OAM vortex beams was summarized. At present, the pulse width of the ultra-short OAM vortex beam generated by the active method is still limited to a few hundred femtoseconds. How to obtain the pulsed vortex beam output within 100 femtoseconds or even with a few cycles through the direct output method will be an important future development direction.

Key words: vortex beam; ultrashort pulse; direct generation

收稿日期: 2020-10-08; 修订日期: 2020-11-10

基金项目: 国家自然科学基金 (61975137)

作者简介: 汪莎 (1982-), 女, 研究员, 博士, 研究方向为激光技术及光场调控。Email: shawang@scu.edu.cn

通讯作者: 邓国亮 (1985-), 男, 副教授, 博士, 研究方向为超快激光及其应用。Email: gdeng@scu.edu.cn

0 引言

涡旋光是一种具有孤立奇点的光场,其光场为暗中空分布。根据奇点类型可分为具有偏振奇点的矢量涡旋光束及具有相位奇点的轨道角动量 OAM 涡旋光束(也称为相位涡旋光束)。OAM 涡旋光束的相位波前呈螺旋分布,其光场复振幅表达式中包含螺旋相位项 $\exp(il\theta)$,每个光子携带 lh 的轨道角动量,其中 l 为拓扑荷数, h 为约化普朗克常量。不同 l 的 OAM 涡旋光场间都具有正交特性。Allen 等人在 1992 年通过使用柱透镜对将厄米高斯光束转换成拉盖尔高斯光束,实现了矢量涡旋光的产生^[1],随后由于其独特的特性,科学家们在各个领域开展了 OAM 涡旋光束的应用研究,主要包含以下几个方面。OAM 涡旋光束用于光学操控中:例如采用涡旋光做光镊,可以捕获不同尺寸、不同折射率的微小粒子^[2],并可以在捕获粒子的同时作为光学扳手,使微小粒子旋转^[3],从而对其进行三维操控^[4-5];此外采用涡旋光做光镊还可以减小粒子由于吸收引起的光散射和损伤阈值^[6]。OAM 涡旋光束在成像中,一是利用其螺旋相位作为空间滤波器,提高成像质量^[7-8];二是利用其光场暗中空分布的环形结构可提高物体的成像分辨率,实现超分辨显微成像^[9]。将 OAM 涡旋光束用在通信中,可利用不同轨道角动量的正交特性,采用轨道角动量的复用技术提高信道的通信容量^[10-12]。利用 OAM 涡旋光的波前螺旋分布特性还可将其用于旋转物体的测量^[10]。

超短脉冲一般指脉冲宽度在皮秒或亚皮秒量级的激光光束。如果将超短激光与 OAM 涡旋光束相结合,这样的光束同时具有涡旋激光及超短激光的特点,扩展了新的应用领域。例如带手性的材料结构精细加工^[11-13]、远距离大气传输^[14-15]、基于涡旋光的强场物理特性研究^[16]、非线性频率转换^[17]等。目前产生超短涡旋光的方法可划分为无源和有源两种。其中无源方法是指通过特定光学元件在腔外通过模式转换的方式产生涡旋光。为了产生超短特别是飞秒脉冲涡旋光,一般需要通过加入校正元件来补偿由于宽光谱所引起的拓扑电荷色散,包括使用 2f-2f 结构^[18]、棱镜对^[19]、4f 结构^[20]以及空变波片^[21-22]等方法。为了简化系统结构,近年来科学家们提出了宽谱模式转换器。例如 2010 年,澳大利亚国立大学课题组提出将飞秒激光聚焦通过单轴晶体的光轴产生相

位奇点获得涡旋光束^[23]。2012 年,北海道大学课题组提出的采用轴对称半波片联合消色差四分之一波片的方式将飞秒高斯光束转化为宽谱涡旋光^[22]。2013 年,德国马克思波恩研究所课题组通过采用螺旋形 MEMS 镜实现了拓扑荷数可控的飞秒涡旋激光输出^[24]。2017 年,上海交通大学课题组提出了首先通过离轴泵浦产生飞秒厄米高斯光,再在腔外采用柱透镜对引入 Gouy 相移,获得对应的高纯度飞秒拉盖尔高斯涡旋光^[25]。2017 年,印度海得拉巴大学课题组采用消色差 Sagnac 干涉仪实现了飞秒高斯光到飞秒涡旋光的转变^[26]。2017 年,山东师范大学课题组提出采用螺旋状分布的多小孔板将高斯分布的飞秒脉冲转变成涡旋光束^[27]。2018 年,中国科学院上海光学精密机械研究所课题组提出将钛宝石超快激光的输出通过普通相位板产生相对较窄光谱涡旋光后,再将该涡旋光经过中空光纤展宽并压缩后获得宽谱飞秒涡旋光输出^[28]。有源方法主要是通过激光器直接产生涡旋光输出。相比于无源方法,有源方法在系统整体简便性和光束质量方面更占优势。因此文中主要对基于固体激光器及光纤激光器直接输出超短 OAM 涡旋光产生技术研究进行了总结和归纳。注:文中所提的涡旋光均是指 OAM 涡旋光。

1 基于固体激光器的直接输出超短脉冲涡旋光的产生方法

固体激光器直接产生涡旋光的方法一般有以下几种:(1)将相位调制元件直接插入腔内,在激光振荡的同时实现相位调制,获得涡旋激光输出^[29];(2)通过调节激光腔内的光学元件的角度,使激光在非平面内传播时发生旋转,从而产生相位畸变,实现涡旋光的直接输出^[30];(3)在腔内引入柱透镜对或者通过控制泵浦光尺寸及振荡光反弹角度,配合激光晶体的热透镜效应,获得了涡旋光输出^[31-32];(4)采用环形光泵浦技术,以抑制基模振荡,实现涡旋光输出^[33-36];(5)在腔内使用损耗点实现涡旋光输出^[36-37];(6)使用离轴泵浦联合像散调控技术实现涡旋光输出^[38]。为了产生超短脉冲涡旋光,一般可以在激光腔中引入锁模方法,再联合涡旋光输出技术。下面将介绍几种主要的通过固体激光器直接产生超短脉冲涡旋光的方法。

1.1 基于自锁模原理的涡旋光产生方法

自锁模是利用晶体的三阶非线性效应,即克尔透

镜效应,实现谐振腔内锁模的自启动。克尔透镜锁模的机理主要是利用激光光束在激光晶体中由于克尔效应引起的自聚焦特性。泵浦激光在激光晶体中等效为一个软光阑,在软光阑和自聚焦效应的共同作用下可形成与强度相关的损耗,相当于在腔内引入了一个快可饱和吸收体实现自锁模^[39-40]。

2016年,山东大学张怀金团队首次报道了通过自锁模 Nd:LYSO 激光器获得了皮秒涡旋光输出^[41]。实验中采用了环形光泵浦的方式,增益晶体为 0.5% 掺杂的 Nd:LYSO 晶体,实验装置如图 1 所示。晶体中的热透镜畸变将在产生激光的过程中将导致相位畸变和衍射损耗。在泵浦中心的部分衍射损耗较小,随着振荡模式的增加衍射损耗迅速增大。但是克尔透镜效应将减小激光光斑大小,通过对腔形的设计,可

控制振荡激光模式的光斑大小,形成对衍射损耗的调制效应,形成自锁模脉冲输出。随着泵浦功率的增加,在克尔透镜及热透镜效应的作用下,振荡模式的光斑尺寸减小,因此泵浦光和振荡光之间的模式匹配是个动态平衡的过程:在较低泵浦功率运转时,对应 LG₀₀ 模式的损耗最小,激光输出为基模;随着泵浦功率的增大,对应高阶模的损耗更小,则获得高阶模输出。实验中,随着泵浦功率的增大,分别获得了 LG₀₀、LG₀₁、LG₀₂ 的模式输出,其脉冲宽度分别为 37 ps, 35 ps 以及 28 ps,重频为 7.8 GHz。随后,Hasnaoui 等人对 LG_{0m} 模式的克尔透镜效应做了进一步的研究^[42],通过理论模型分析了环形 LG_{0m} 光束由于克尔透镜效应可以等效于一个环形透镜,同时具有聚焦透镜以及发散的轴棱锥的作用。

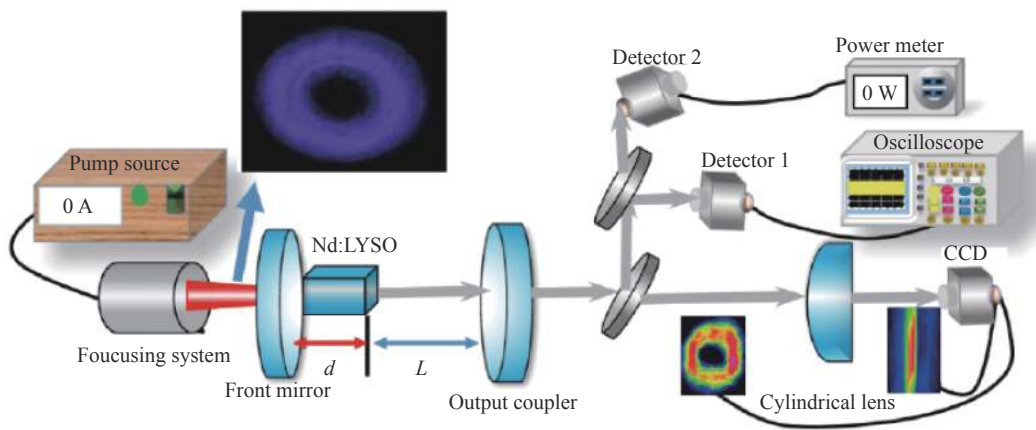


图 1 自锁模 Nd:LYSO 激光器产生皮秒 LG₀₁ 模式

Fig.1 LG₀₁ mode achieved from a self-mode locked Nd:LYSO laser

同年,台湾交通大学的陈永富教授团队在双偏振自锁模 Yb:KGW 单块激光器中,通过控制泵浦光在增益介质横截面上的位置,获得了 LG₁₁ 模式涡旋光输出。涡旋激光脉冲重频为 25.3 GHz,在 10 W 泵浦下的输出功率高达 1.45 W,输出脉冲宽度为 0.98 ps^[43],实验装置如图 2 所示。在高功率泵浦条件下,由于热透镜效应以及不同偏振态间的增益竞争效应将形成多种横模模式。实验中发现,通过控制泵浦光斑位置,联合偏振选择可获得正交偏正的 LG₀₀ 模式以及带有手性的 LG₁₁ 模式输出。单块激光器具有机械稳定性高、结构紧凑以及免调节等优点,因此皮秒脉冲涡旋光输出的单块激光器在光光学领域具有巨大应用潜力。

1.2 基于可饱和吸收体锁模的涡旋光产生方法

除了克尔透镜效应,在激光腔内直接使用可饱和吸收体进行被动锁模也是获得短脉冲输出的一个重要方式。

2018年,笔者团队报道了直接输出的手性可控飞秒 LG₀₁ 涡旋光输出,实验装置如图 3(a) 所示^[38]。实验采用传统的可饱和吸收体 SEASM 锁模 z 字形结构激光腔,通过离轴泵浦 Yb:Phosphate 玻璃(如图 3(b) 所示),联合基于腔内凹面镜的像散调控的方式获得了基模, HG₁₀ 以及手性可控的 LG₀₁ 模式输出。在腔内 SESAM 的作用下实现了锁模脉冲输出。LG₀₁ 模式的锁模脉冲重频为 9.9 MHz,谱宽为 3.45 nm,脉冲宽度为 360 fs。随后,进一步对这样的复合调控方式

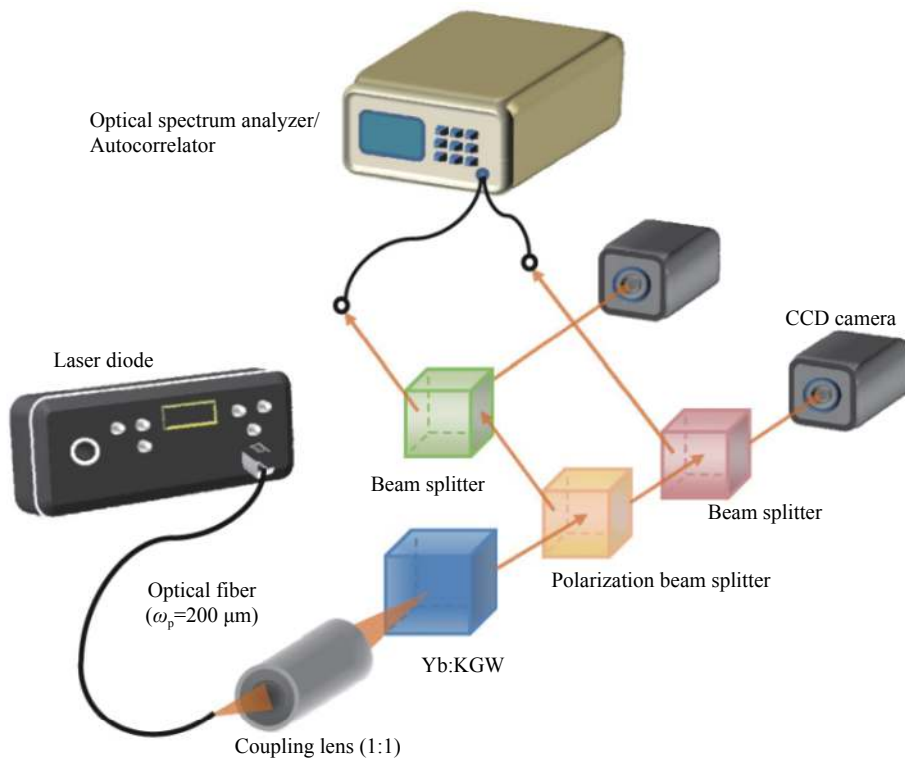


图 2 双偏振自锁模 Yb:KGW 单块激光器实验装置图

Fig.2 Experimental Setup of a dual-polarization self-mode-locked monolithic Yb:KGW laser

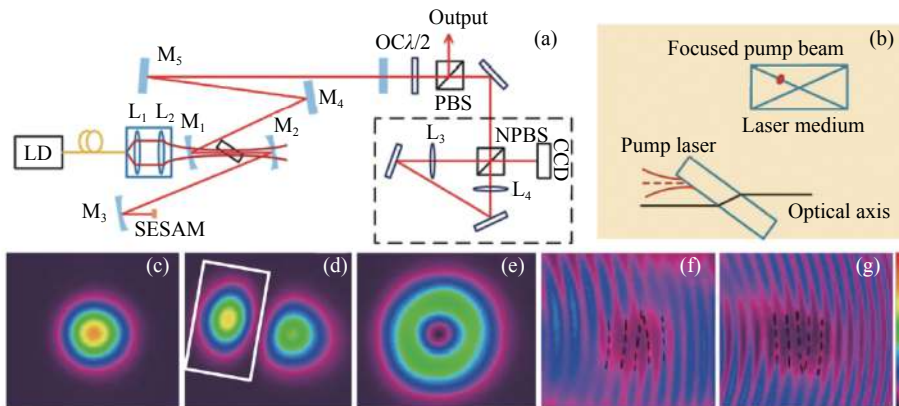


图 3 通过离轴泵浦联合像散调控的方式在 SESAM 被动锁模 Yb:QX 激光器中获得飞秒脉冲宽度的 TEM₀₀, HG₁₀, LG₁₀ 模式可调的激光输出

Fig.3 Femtosecond TEM₀₀, HG₁₀, LG₁₀ mode obtained from a SESAM mode locked Yb:QX laser using off-axis pumping technique combined with intracavity astigmatism manipulation

的机理进行了分析^[44]。通过理论建模分析,发现通过离轴泵浦的方式可以在激光器中获得高阶模式输出。进一步通过调控腔内凹面镜的倾斜角度,可以控制腔内的像散量,随着腔内凹面镜角度的增大,激光输出将从 HG₁₀ 模式转换成 LG₀₁ 涡旋光输出。涡旋光的手性可以通过改变泵浦光的光斑位置或者凹面镜的倾斜角度方向来控制。

为了进一步缩短锁模脉冲涡旋光的宽度,笔者团

队与日本东京大学的小林洋平教授合作,在 SESAM 被动锁模 Yb:KYW 晶体飞秒激光腔中引入了带有损耗点的耦合输出镜,获得了脉冲宽度为 298 fs、重复频率为 103.5 MHz 的飞秒涡旋光输出^[45]。进一步我们还通过掺 Yb 双包层光纤对该飞秒涡旋光进行了放大,最终获得了平均功率为 500 mW 的飞秒涡旋光输出,实验表明通过增高泵浦光功率,放大脉冲光功率可得到进一步提升。实验装置图如图 4 所示。

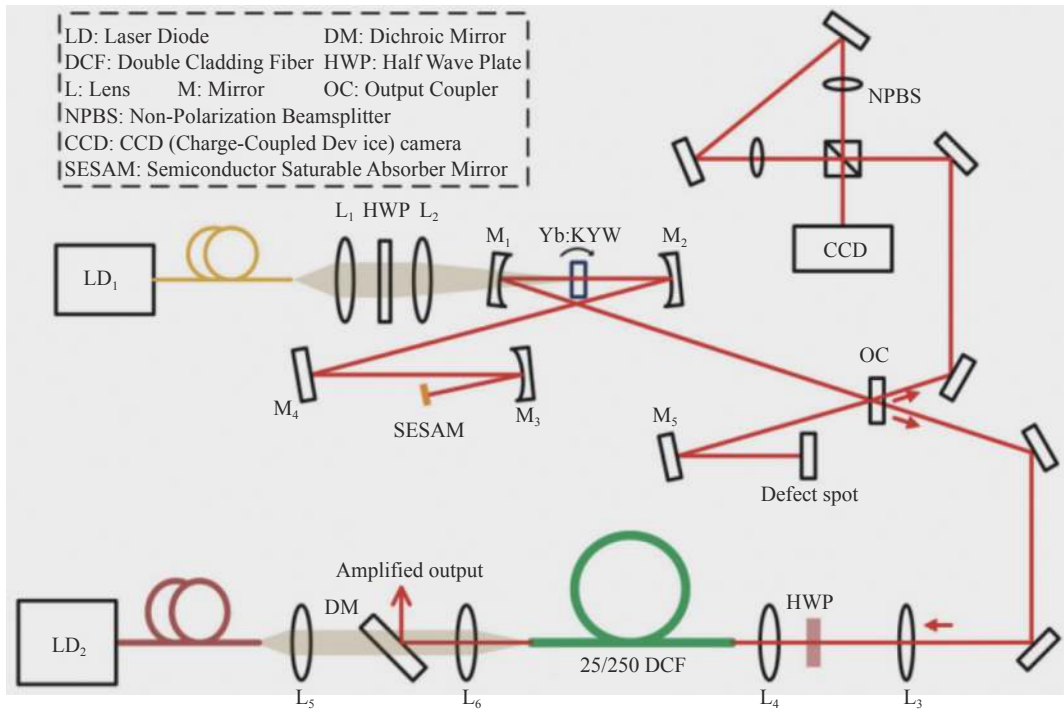


图 4 通过带损耗点腔镜的 Yb:KYW 锁模振荡器实现飞秒 OAM 涡旋光的直接输出的实验装置图

Fig.4 Experimental setup of direct generation of femtosecond vortex beam from a Yb:KYW oscillator featuring a defect-spot mirror

2020 年, 厦门大学徐斌教授团队将直接输出的超短脉冲涡旋光的波长推至了可见光波段^[46]。他们采用的实验装置图如图 5 所示, 实验采用了 444 nm 的半导体激光器双端泵 Pr:YLF 晶体的形式。通过化学气相沉积制作的双层石墨烯被转移到高反平面镜上。作为可饱和吸收体实现了激光的锁模输出。通

过旋转耦合输出镜 OC 在垂直的 x 和 y 方向的角度, 获得了脉冲 LG_{01} 涡旋光的输出, 并通过在垂直于光轴方向移动 Pr: YLF 晶体可改变输出涡旋光的手性。实验获得的脉冲涡旋光的重频为 140 MHz, 谱宽为 0.5 nm, 脉冲宽度为 73.4 ps。

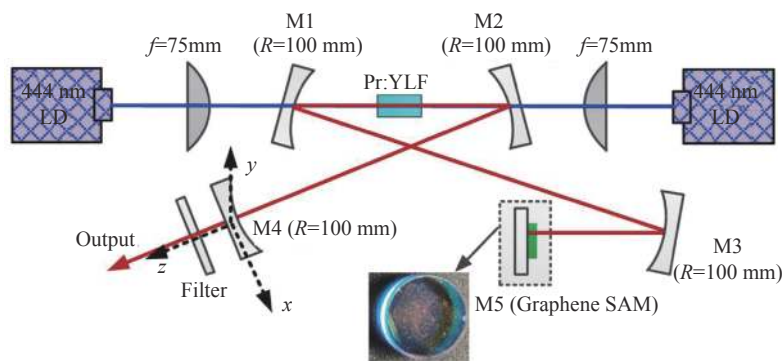


图 5 双端泵石墨烯锁模 Pr:YLF 晶体激光器实验装置图

Fig.5 Experimental setup of a dual-end-pumped Pr:YLF oscillator mode locked by CVD-graphene

2 基于光纤激光器的直接输出超短脉冲 OAM 涡旋光的产生方法

在光纤激光器中也可产生 OAM 涡旋光, 其形成

原理是基于光纤内简并模式的叠加, 通过控制支持 LP_{11} 模式的光纤激光器中的偏振态即可获得 OAM 光束的输出, 具体原理阐述如下。通过求解光纤中麦克斯韦方程组, 可以得到光纤中矢量模式, 也叫本征

模式,其具有复杂的电磁场分布。在常规的少模或多模光纤中,纤芯和包层的折射率差在 10^{-3} 量级,同一模式群内的不同矢量模式间的有效折射率差小于 10^{-4} ,这导致了矢量模式的简并,此时在光纤输出端得到的是不同矢量模式的组合,也就是标量模式。从本质上讲光纤中涡旋光束的形成可以分为两类:一种是由同阶同偏振标量模式的奇模和偶模附加 $\pm\pi/2$ 相位差产生线偏振 OAM 涡旋光束,其不携带自旋角动量;另一种是由同一矢量模式的奇模和偶模附加 $\pm\pi/2$ 相位差产生圆偏振 OAM 涡旋光束,其携带自旋角动量。

(1) 线偏振 OAM 模式

同阶同偏振标量模式的奇模和偶模附加 $\pm\pi/2$ 相位差产生线偏振涡旋光束,如公式 (1) 所示:

$$\begin{cases} \hat{x}L_{\pm l,m} \\ \hat{y}L_{\pm l,m} \end{cases} = \begin{cases} LP_{l,m}^{c,x} \pm iLP_{l,m}^{s,x} \\ LP_{l,m}^{c,y} \pm iLP_{l,m}^{s,y} \end{cases} = F_{l,m}(r) \begin{cases} \hat{x}\exp(\pm il\varphi) \\ \hat{y}\exp(\pm il\varphi) \end{cases}, \quad (l \geq 1) \quad (1)$$

式中: $L_{\pm l,m}$ 表示线偏振涡旋模式,下角标 $\pm l,m$ 表示相应的角向和径向模数,其中 \pm 表示相位旋转方向; \hat{x}, \hat{y} 表示相应的偏振方向; $LP_{l,m}^{c,s}$ 表示不同的线偏振模式;上角标 c, s 表示横向场分布遵循 cosine 函数和 sine 函数, x, y 表示标量场的偏振方向。

(2) 圆偏振 OAM 模式

同一矢量模式的奇模和偶模可通过附加 $\pm\pi/2$ 相位差产生圆偏振涡旋光束,如公式 (2) 所示:

$$\begin{cases} V_{\pm l,m}^+ \\ V_{\pm l,m}^- \end{cases} = \begin{cases} HE_{l+1,m}^e \pm iHE_{l+1,m}^o \\ EH_{l-1,m}^e \pm iEH_{l-1,m}^o \end{cases} = F_{l,m}(r) \begin{cases} \hat{\sigma}^{\pm} \exp(\pm il\varphi), (l \geq 1) \\ \hat{\sigma}^{\mp} \exp(\pm il\varphi), (l > 1) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $V_{\pm l,m}^{\pm}$ 表示圆偏振涡旋模式,其上角标 \pm 表示自旋角动量;上角标 e, o 分别表示偶模、奇模; $\hat{\sigma}^{\pm} = \hat{x} \pm i\hat{y}$ 表示左旋或者右旋圆偏振。

一般来说,通过光纤激光器产生 OAM 涡旋光都需要在激光器输出端连接额外的光纤器件和偏振控制元件,但是因为光纤激光器需要通过尾纤输出激光,所以将其归在光纤激光器直接输出 OAM 涡旋光中。光纤激光器中一般可以通过模式选择耦合 (Mode Selective Coupler, MSC)^[47], 错位熔接联合光纤布拉格光栅^[48], 长周期光纤光栅^[49](括声致光纤光栅^[50]及机械式挤压光纤光栅^[51]等形式的长周期光纤光栅), 光子晶体光纤^[52], 特殊结构掺杂光纤^[53]等方式产生 OAM 涡旋光的方法。为了实现短脉冲涡旋光输出,一般需要能支持宽光谱的模式转换器件。下面介绍两种主要通过光纤激光器输出超短脉冲 OAM 涡旋光的方法。

2.1 通过模式选择耦合器产生超短 OAM 涡旋光输出

一种是通过模式选择耦合器联合锁模激光器产生超短 OAM 涡旋光输出。模式选择耦合器是由单模光纤和少模光纤拉锥形成。该模式耦合器在将激光导出激光腔的同时,也将实现在宽谱范围内光纤中 LP_{01} 模式向高阶模式 (LP_{11} 或 LP_{21}) 的转换。模式耦合器的示意图一般如图 6 所示。

如果将模式耦合器用于锁模激光器中,就可得到相对应的超短脉冲 OAM 涡旋光输出。上海大学的曾祥龙教授团队通过将 MSC 引入到 NPR 锁模光纤激光器中,首次实现了 140 fs 的 $OAM_{\pm 1}$ 和 $OAM_{\pm 2}$ 涡旋光输出^[54], 实验装置如图 7 所示。实验中采用了 0.4 m LIEKKI ER80-8/125 光纤作为增益光纤,最高输出功率为 620 mW 的 980 nm 的半导体激光器为泵源,通过

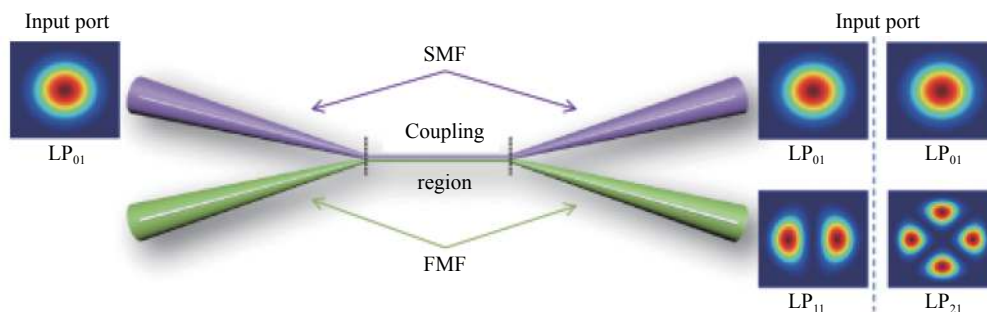


图 6 模式选择耦合器示意图^[57]

Fig.6 Sketch of a fiber mode selective coupler^[57]

色散补偿光纤将腔内色散控制为 0.015 ps^2 , 实现了耗散孤子锁模。实验中通过 MSC 将 LP_{01} 模式转换为 LP_{11} 模式, 再通过偏振控制器 PC3 实现了手性可控的一阶或二阶 OAM 涡旋光输出。实验测得激光输出中

心波长为 1545 nm , 3 dB 谱宽为 67.6 nm , 锁模脉冲重频为 36.10 MHz , 一阶涡旋光的脉宽为 273 fs , 二阶涡旋光的脉宽为 140 fs , 涡旋光输出的最高脉冲能量为 0.36 nJ 。

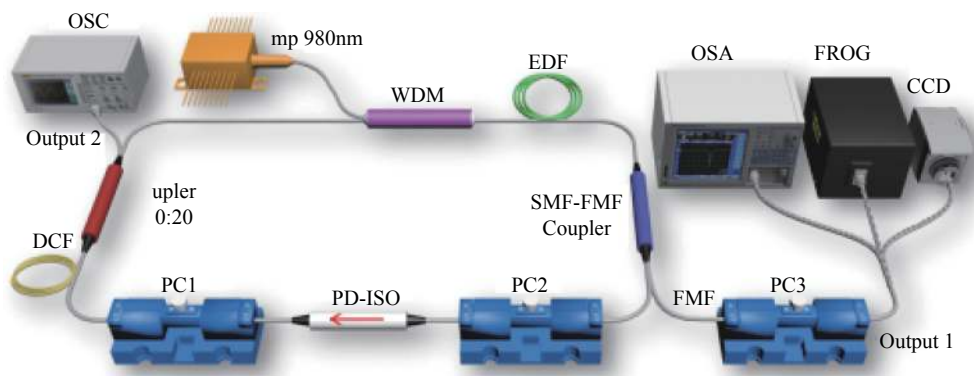


图 7 NPR 锁模激光器联合模式选择耦合器实现短脉冲 OAM 涡旋光输出的实验装置图

Fig.7 Experimental setup of an all-fiber NPR mode locked fiber laser using mode selective coupler

南开大学李乙钢教授团队在非线性环形镜锁模光纤激光器中采用模式耦合器作为输出镜实现了手性可调的超短脉冲 OAM 涡旋光束输出, 实验装置如图 8 所示^[55]。实验中采用 980 nm LD 作为泵源, 一段 0.65 m 长的掺 Er 光纤作为增益介质。一个 $2:8$ 的耦合器两端连接作为非线性环形镜, 该光纤环长度为 11 m 。一个 20% 的 SMF-FMF 耦合器作为光纤激

光器输出镜以及模式选择器件。锁模激光器输出 LP_{11} 模式, 该模式再通过偏振控制器控制 LP_{11} 奇偶两分量间的相位, 以实现 $OAM_{\pm 1}$ 涡旋光输出。实验获得的锁模脉冲重频为 10.5 MHz , 通过调节光纤激光器的偏振态可实现脉冲宽度为 1.098 ps 及 542 fs 的超短脉冲 OAM 光束输出。

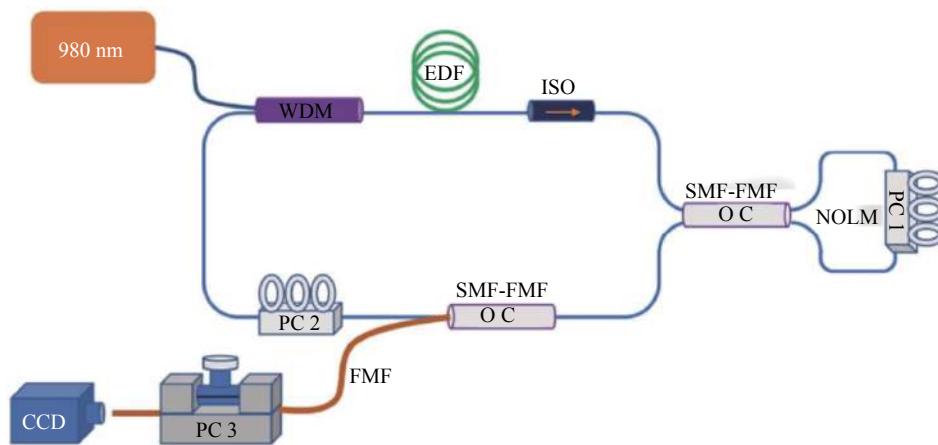


图 8 非线性环形镜锁模光纤激光器联合模式选择耦合器

Fig.8 Nonlinear-loop-mirror mode locked fiber laser using mode selective coupler

随后, 模式耦合器还被该团队用在非线性放大环镜 (NALM) 中用于实现超短脉冲 OAM 涡旋光的输出, 实验装置如图 9 所示^[56]。NALM 由一段高掺杂 Er 光纤, 一根 100 m 长的单模光纤以及一个偏振控制

器组成。该 NALM 的泵源为一个 980 nm 的半导体激光器 LD。5:5 的耦合器联合左边的环形腔起类似于可饱和吸收体的作用以实现锁模输出。通过 SMF-FMF 模式选择耦合器可实现 LP_{11} 模式输出。偏振控

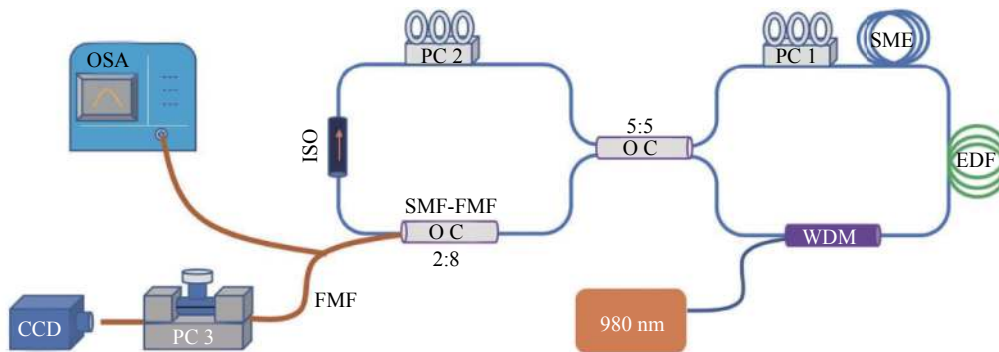


图 9 非线性放大环镜锁模光纤激光器联合模式选择耦合器

Fig.9 Nonlinear-amplifying-loop-mirror mode locked fiber laser using mode selective coupler

制器 PC1 和 PC2 用来补偿光纤双折射导致的偏振改变。PC3 用于控制奇偶 LP₁₁ 模式间的相位用于实现 OAM 模式输出。通过该装置,最后实现了脉冲重频为 1.78 MHz、脉冲宽度为 393 fs、中心波长为 1567 nm、拓扑荷数为±1 的 OAM 涡旋光输出。

2.2 通过长周期光纤光栅实现超短 OAM 涡旋光输出

基于少模光纤的长周期光纤光栅也可作为模式转换器实现锁模超短 OAM 涡旋光输出。为了通过长周期光纤光栅实现模式转换,需要满足相位匹配条件 $A=\lambda/(n_1-n_2)$, 其中 A 为光栅刻线周期, λ 为激光波长, n_1-n_2 为两个模式的有效折射率差。当简并的 HE_{11,x} 和 HE_{11,y} 模式通过长周期光纤光栅后,将分别转换为 TM₀₁+HE_{21,even} 混合模式以及 TE₀₁+HE_{21,odd} 混合模式。通过偏振控制器可在这两个混合模式间引入 $\pm\pi/2$ 的相位差,实现手性为正或负的涡旋光输出^[57]。

西北工业大学赵建林教授团队通过使用声致光纤光栅实现了飞秒 OAM 涡旋光输出,实验装置如图 10 所示^[58]。通过传播的弯曲声波可以在光纤中产生周期性的微小弯曲,等效于在光纤中形成了一个光栅。实验中先通过碳纳米管可饱和吸收体实现被动锁模 Er 光纤激光器,获得了脉冲频率为 12.5 MHz、脉冲宽度为 384 fs、中心波长为 1520 nm、谱宽为 60 nm 的锁模脉冲输出。该飞秒脉冲再通过弯曲声波调制的光纤光栅模式转换器,当加载的声波信号所形成的光栅满足相位匹配条件时,获得了手性可控的飞秒 OAM 涡旋光输出。

李乙钢教授团队通过使用机械挤压形成的长周期光纤光栅联合 NPR 锁模 Er 光纤激光器实现了锁模重复频率为 27 MHz、脉冲宽度为 398 fs、中心波长为 1564 nm、谱宽为 8 nm 的 OAM_{±1} 涡旋光输出,实验装置如图 11 所示^[59]。NPR 锁模激光器通过 1:9 耦合

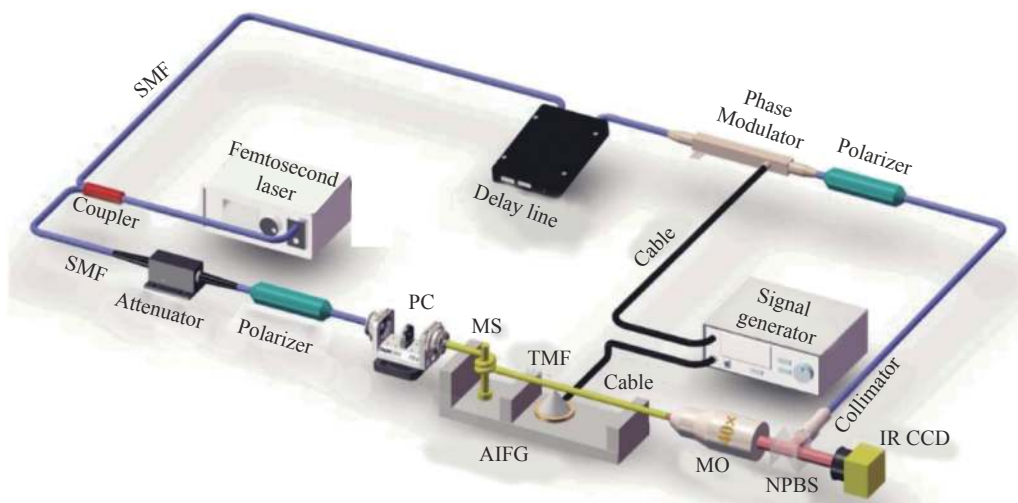


图 10 通过使用声致光纤光栅实现了飞秒 OAM 涡旋光输出的实验装置图

Fig.10 Experimental setup of femtosecond optical vortex pulse generation based on an acoustically induced fiber grating

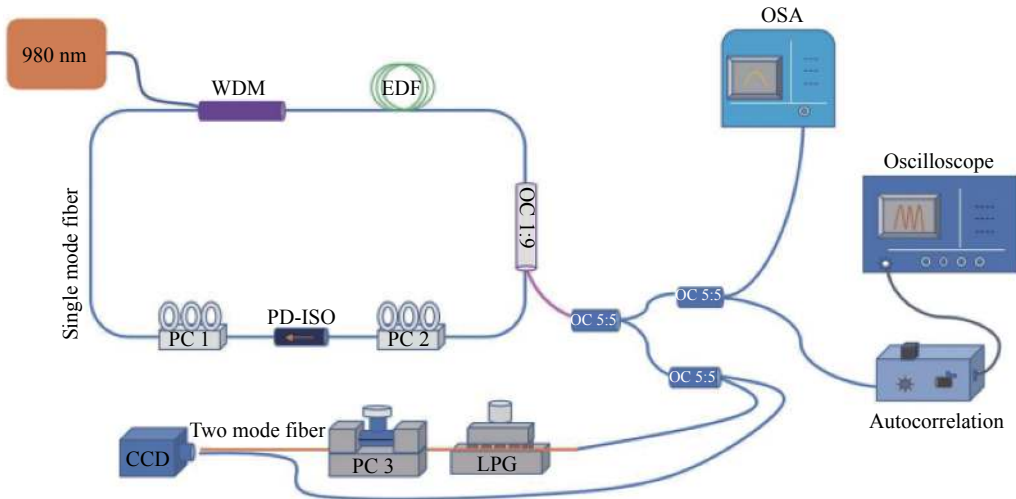


图 11 通过使用机械挤压形成的长周期光纤光栅联合 NPR 锁模 Er 光纤激光器

Fig.11 Experimental setup of femtosecond vortex laser based on NPR mode-locking and mechanical LPG

器输出的锁模脉冲为 LP_{01} 模式, 该 LP_{01} 模式通过挤压式长周期光纤光栅后转换为了 LP_{11} 模式。 LP_{11} 模式可等效为两个相互垂直的 $LP_{11,a}$ 和 $LP_{11,b}$ 模式的叠加。 随后, 通过挤压少模光纤改变其等效折射率, 可以在 $LP_{11,a}$ 和 $LP_{11,b}$ 间引入 $\pi/2$ 的相位差形成 OAM 涡旋光输出。

近期, 上海大学曾祥龙教授团队开展了在窄线宽锁模激光器中的涡旋光模式转换过程的实时监控研究^[60], 实验装置如图 12 所示。 实验采用线性腔结构, 增益光纤为掺 Er 光纤, 通过可饱和吸收体 SESAM 实现被动锁模。 采用声致光纤光栅实现模式转换, 通过加载不同的声波频率, 将改变等效光栅周

期, 实现 LP_{01} 模式到相互垂直的简并 $LP_{11,a}$ 及 $LP_{11,b}$ 模式的转变。 $LP_{11,a}$ 或 $LP_{11,b}$ 模式可通过调控偏振控制器 PC2 旋转 45° , 并由 PC2 引入的压力改变少模光纤的等效尺寸, 获得 $\pm\pi/2$ 的相位差, 实现锁模涡旋光输出。 实验中通过改变加载在光纤上的声波, 可实现 LP_{01} , OAM_{+1} , OAM_{-1} 模式可调锁模脉冲输出, 脉冲的重复频率为 4.835 MHz, 脉冲宽度均约为 400 ps。 实验中还观察了模式改变的动态过程中锁模脉冲建立的时域变化过程, 发现在不同模式转变过程中锁模脉冲建立过程不同。 该发现为研究锁模脉冲建立过程提供了新的维度。

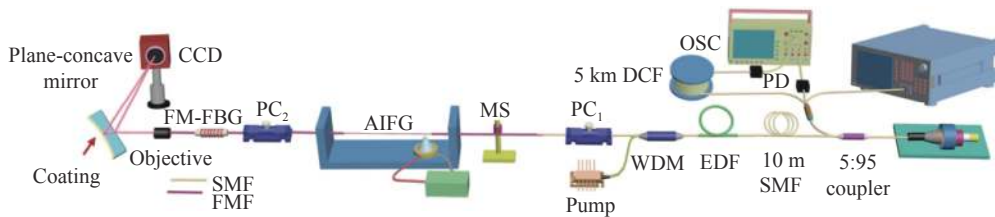


图 12 通过声致光纤光栅实现模式可调窄线宽锁模激光器的实验装置示意图

Fig.12 Experimental setup of spatial mode switching in a mode locked fiber laser based on acoustically induced fiber grating

3 结束语

超短脉冲涡旋光由于其在材料结构精细加工、大气传输、强场物理特性研究、非线性频率转换等方面的应用, 近些年来受到了越来越多的关注。 超短脉冲 OAM 涡旋光, 特别是飞秒 OAM 涡旋光具有较宽的光谱, 为了产生超短脉冲涡旋光在所有的光谱成分中都

需要嵌入相位奇点, 文中从直接输出 OAM 涡旋光的角度出发, 总结了近年来通过有源方式从固体激光器及光纤激光器中获得 OAM 涡旋光输出的方法。 目前直接获得超短 OAM 涡旋光输出的脉冲宽度一般还局限于几百飞秒, 如何通过直接输出的方法获得百飞秒以内甚至是少周期脉冲 OAM 涡旋光输出将是未来研

究的一个重要方向。

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]. *Phys Rev A*, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [2] Miles John Padgett, Richard William Bowman. Tweezers with a twist [J]. *Nature Photon*, 2011, 5(6): 343-348.
- [3] He H, Friese M E J, Heckenberg N R, et al. Direct observation of transfer of angular momentum to absorptive particles from a laser beam with a phase singularity [J]. *Physical Review Letters*, 1995, 75(5): 826-829.
- [4] Dholakia K, Čižmár T. Shaping the future of manipulation [J]. *Nature Photon*, 2011, 5: 335-342.
- [5] Paterson L, MacDonald M P, Arlt J, et al. Controlled rotation of optically trapped microscopic particles [J]. *Science*, 2001, 292(5518): 912-914.
- [6] Jeffries G D M, Edgar J S, Zhao Y, et al. Using polarization-shaped optical vortex traps for single-cell nanosurgery [J]. *Nano Letters*, 2007, 7(2): 415-420.
- [7] Guo C S, Han Y J, Xu J B, et al. Radial Hilbert transform with Laguerre-Gaussian spatial filters [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(10): 1394-1396.
- [8] Jesacher A, Fürhapter S, Bernet S, et al. Shadow effects in spiral phase contrast microscopy [J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(23): 233902.
- [9] Willig K I, Keller J, Bossi M, et al. STED microscopy resolves nanoparticle assemblies [J]. *New J Phys*, 2006, 8: 106.
- [10] Lavery M P J, Speirits F C, Barnett S M, et al. Detection of a spinning object using light's orbital angular momentum [J]. *Science*, 2013, 341(6145): 537-540.
- [11] Nivas J J J, He Shutong, Rubano A, et al. Direct femtosecond laser surface structuring with optical vortex beams generated by a q-plate [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5-17929.
- [12] Hnatovsky C, Shvedov V G, Krolikowski W, et al. Materials processing with a tightly focused femtosecond laser vortex pulse [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(20): 3417-3419.
- [13] Anoop K K, Rubano A, Fittipaldi R, et al. Femtosecond laser surface structuring of silicon using optical vortex beams generated by a q-plate [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(24)-e149.
- [14] Vinçotte A, Bergé L. Femtosecond optical vortices in air [J]. *Physical Review Letters*, 2005, 95: 193901.
- [15] Polynkin P, Ament C, Moloney J V. Self-focusing of ultraintense femtosecond optical vortices in air [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 111(2): 23901.
- [16] Zhang Xiaomei, Shen Baifei, Zhang Lingang, et al. Proton acceleration in underdense plasma by ultraintense Laguerre-Gaussian laser pulse [J]. *New J Phys*, 2014, 16: 123051.
- [17] Chaitanya A N, Aadhi A, Jabir M V, et al. Frequency-doubling characteristics of high-power, ultrafast vortex beams [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(11): 2614-2617.
- [18] Mariyenko I, Strohaber J, Uiterwaal C. Creation of optical vortices in femtosecond pulses [J]. *Optics Express*, 2005, 13(19): 7599-7608.
- [19] Schwarz A, Rudolph W. Dispersion-compensating beam shaper for femtosecond optical vortex beams [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(24): 2970-2972.
- [20] Bezuhanov K, Dreischuh A, Paulus G G, et al. Vortices in femtosecond laser fields [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(16): 1942-1944.
- [21] Tokizane Y, Oka K, Morita R. Supercontinuum optical vortex pulse generation without spatial or topological-charge dispersion [J]. *Optics Express*, 2009, 17: 14517-14525.
- [22] Yamane K, Toda Y, Morita R. Ultrashort optical-vortex pulse generation in few-cycle regime [J]. *Optics Express*, 2012, 20(17): 18986-18993.
- [23] Shvedov V G, Hnatovsky C, Krolikowski W, et al. Efficient beam converter for the generation of high-power femtosecond vortices [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(15): 2660-2662.
- [24] Bock M, Brunne J, Treffer A, et al. Sub-3-cycle vortex pulses of tunable topological charge [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(18): 3642-3645.
- [25] Qiao Z, Kong L, Xie G, et al. Ultraclean femtosecond vortices from a tunable high-order transverse-mode femtosecond laser [J]. *Optics Letters*, 2017, 42: 2547-2550.
- [26] Naik D N, Saad N A, Rao D N, et al. Ultrashort vortex from a Gaussian pulse-An achromatic-interferometric approach [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 1-10.
- [27] Ma L, Zhang P, Li Z, et al. Spatiotemporal evolutions of ultrashort vortex pulses generated by spiral multi-pinhole plate [J]. *Optics Express*, 2017, 25(24): 29864-29873.
- [28] Lei Lin, Peng Wang, Jun Liu. Intense broadband optical-vortex pulses generation using a hollow core fiber[C]// Proceedings of the SPIE. 2018, 10811: 108111B.
- [29] Ishaaya A, Davidson N, Friesema A. Very high-order pure Laguerre-Gaussian mode selection in a passive Q-switched Nd:YAG laser [J]. *Optics Express*, 2005, 13(13): 4952-4962.
- [30] Smith A V, Armstrong J. Generation of vortex beams by an image-rotating optical parametric oscillator [J]. *Opt Express*, 2003, 11(8): 868-873.
- [31] Okida M, Omatsu T, Itoh M, et al. Direct generation of high power Laguerre-Gaussian output from a diode-pumped Nd:YVO₄ 1.3- μm bounce laser [J]. *Optics Express*, 2007, 15: 7616-7622.
- [32] Chard S P, Shardlow C, Damzen M J. High-power non-astigmatic TEM₀₀ and vortex mode generation in a compact bounce laser design [J]. *Appl Phys B*, 2009, 97: 275-280.

- [33] Chen Y F, Lan Y P, Wang S C. Generation of Laguerre-Gaussian modes in fiber-coupled laser diode end-pumped lasers [J]. *Appl Phys B*, 2001, 72: 167-170.
- [34] Kim D J, Kim J W. Direct generation of an optical vortex beam in a single-frequency Nd:YVO₄ laser [J]. *Opt Lett*, 2015, 40: 399-402.
- [35] Senatsky Y, Bisson J F, Li Jianlang, et al. Laguerre-Gaussian modes selection in diode-pumped solid-state lasers [J]. *Opt Rev*, 2012, 19: 201-221.
- [36] Ito A, Kozawa Y, Sato S. Generation of hollow scalar and vector beams using a spot-defect mirror [J]. *J Opt Soc Am A*, 2010, 27(9): 2072-2077.
- [37] Kano K, Kozawa Y, Sato S. Generation of a purely single transverse mode vortex beam from a He-Ne laser cavity with a spot-defect mirror [J]. *International Journal of Optics*, 2011, 2012(1687-9384): 359141.
- [38] Wang S, Zhang S, Yang H, et al. Direct emission of chirality controllable femtosecond LG01 vortex beam [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(20): 201110.
- [39] Herrmann J. Theory of Kerr-lens mode locking: role of self-focusing and radially varying gain [J]. *J Opt Soc Am B*, 1994, 11(3): 498-512.
- [40] Xie G Q, Tang D Y, Zhao L M, et al. High-power self-mode-locked Yb:Y₂O₃ ceramic laser [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(18): 2741-2743.
- [41] Zhang Y, Yu H, Zhang H, et al. Self-mode-locked Laguerre-Gaussian beam with staged topological charge by thermal-optical field coupling [J]. *Optics Express*, 2016, 24(5): 5514-5522.
- [42] Hasnaoui A, Ait-Ameur K. Kerr lens effect induced by a vortex LG0m laser beam [J]. *Optik*, 2020, 207: 164452.
- [43] Chang M T, Liang H C, Su K W, et al. Exploring transverse pattern formation in a dual-polarization self-mode-locked monolithic Yb:KGW laser and generating a 25 GHz sub-picosecond vortex beam via gain competition [J]. *Optics Express*, 2016, 24(8): 8754-8762.
- [44] Zhang Shulin, Li Ping, Wang Sha, et al. Direct excitation of chirality controllable LG01 vortex beam in solid-state lasers by intracavity astigmatism manipulation [J]. *Laser Phys Lett*, 2019, 16: 35002.
- [45] Wang S, Zhao Z, Ito I, et al. Direct generation of femtosecond vortex beam from a Yb: KYW oscillator featuring a defect-spot mirror [J]. *OSA Continuum*, 2019, 2(3): 523-530.
- [46] Li Nan, Huang Junjie, Xu Bin, et al. Direct generation of an ultrafast vortex beam in a CVD-graphene-based passively mode-locked Pr:LiYF₄ visible laser [J]. *Photon Res*, 2019, 7(11): 1209-1213.
- [47] Zhang Hongwei, Liu Yange, Wang Zhi, et al. Generation of arbitrary polarized OAM mode based on a fiber mode selective coupler [J]. *J Opt*, 2019, 21: 85705.
- [48] Sun Biao, Wang Anting, Xu Lixin, et al. Low-threshold single-wavelength all-fiber laser generating cylindrical vector beams using a few-mode fiber Bragg grating [J]. *Opt Lett*, 2012, 37: 464-466.
- [49] Wu H, Gao S, Huang B, et al. All-fiber second-order optical vortex generation based on strong modulated long-period grating in a four-mode fiber [J]. *Optics Letters*, 2017, 42: 5210-5213.
- [50] Zhang W, Huang L, Wei K, et al. High-order optical vortex generation in a few-mode fiber via cascaded acoustically driven vector mode conversion [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(21): 5082-5085.
- [51] Li S, Mo Q, Hu X, et al. Controllable all-fiber orbital angular momentum mode converter [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(18): 4376-4379.
- [52] Wong G K L, Kang M S, Lee H W, et al. Excitation of orbital angular momentum resonances in helically twisted photonic crystal fiber [J]. *Science*, 2012, 337(6093): 446-449.
- [53] Tang Min, Li Haisu, Huang Lin, et al. Erbium-ring-doped fiber laser for transverse vector modes output [J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 115: 233-238.
- [54] Wang T, Wang F, Shi F, et al. Generation of femtosecond optical vortex beams in all-fiber mode-locked fiber laser using mode selective coupler [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(11): 2161-2166.
- [55] Zhang Zhiming, Wei Wei, Sun Guoqing, et al. All-fiber short-pulse vortex laser with adjustable pulse width [J]. *Laser Phys*, 2020, 30: 55102.
- [56] Zhang Zhiming, Wei Wei, Li Zhili, et al. All-fiber vortex laser based on a nonlinear amplifying loop mirror and a coupler [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31: 1049.
- [57] Mao Dong, Li Mingkun, He Zhiwen, et al. Optical vortex fiber laser based on modulation of transverse modes in two mode fiber [J]. *APL Photonics*, 2019, 4: 60801.
- [58] Zhang Wending, Wei Keyan, Mao Dong, et al. Generation of femtosecond optical vortex pulse in fiber based on an acoustically induced fiber grating [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(3): 454-457.
- [59] Zhang Zhiming, Wei Wei, Tang Liqin, et al. Generation of all-fiber femtosecond vortex laser based on NPR mode-locking and mechanical LPG [J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, 16(11): 110501.
- [60] Lu Jiafeng, Shi Fan, Meng Linghao, et al. Real-time observation of vortex mode switching in a narrow-linewidth mode-locked fiber laser [J]. *Photonics Research*, 2020, 8(7): 1203-1212.