

超短涡旋脉冲产生方法研究进展

龚宇霆^{1,2}, 刘兰琴^{1*}, 耿远超¹, 孙喜博¹

¹中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900;

²中国工程物理研究院研究生院, 北京 100088

摘要 涡旋光束具有携带轨道角动量的独特性质, 在光学操纵、光学通信、量子光学等领域具有广阔的应用前景。将时域调控技术与涡旋光束相结合产生超短涡旋脉冲, 对于极端强场条件下的物理实验研究以及超快非线性光谱、精密激光材料的加工等领域的研究具有重要意义。对近年来国内外超短涡旋脉冲产生方法的研究进展进行了调研, 综述了超短涡旋脉冲的主要产生方法, 并对各个方法的优势与不足进行了对比分析。

关键词 非线性光学; 涡旋光束; 超短脉冲; 角动量; 光束调控

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.050008

Research Progress on Ultrashort Vortex Pulse Generation Methods

Gong Yuting^{1,2}, Liu Lanqin^{1*}, Geng Yuanchao¹, Sun Xibo¹

¹Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China;

²Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China

Abstract Vortex beams carry orbital angular momentum (OAM), and have wide application prospects in optical manipulation, optical communication, and quantum optics. To produce ultrashort vortex pulses, we combine vortex beams with the time domain control technique. The method is very important in physical experiments performed under extreme strong field conditions and the researches about ultrafast nonlinear spectroscopy and precision laser material processing. In this paper, the research progress on ultrashort vortex pulse generation methods at home and abroad in recent years is summarized. The main methods for generating ultrashort vortex pulses are reviewed, and the advantages and disadvantages of each method are compared and analyzed.

Key words nonlinear optics; vortex beams; ultrashort pulse; angular momentum; beam control

OCIS codes 190.4360; 050.1940; 050.4865; 140.3300

1 引言

自涡旋光束被提出以来, 人们对它的研究已有近百年的历程。19 世纪 30 年代, Airy 首次报道了在透镜的后焦面上会形成一种奇异的光环, 这引起人们对该现象的研究^[1]。1974 年 Nye 等^[2]报道了实验发现的具有连续螺旋波前的光束, 光束中心为相位奇异点, 光强具有暗中空分布。1992 年, Allen 等^[3]通过理论推导与实验证明, 涡旋光束携带大小为 $l\hbar$ (l 为光束的螺旋拓扑荷数, \hbar 为普朗克常数) 的轨道角动量。正是由于涡旋光束所具有上述的独

特波前结构以及携带轨道角动量的性质, 它逐渐成为近些年热门的研究课题^[4-8], 且具有广泛的应用前景。涡旋光束的应用主要集中在以下领域:

1) 光学操纵^[9-11]。涡旋光束具有暗中空分布, 携带轨道角动量, 可以在无接触、无损伤的情况下, 对微粒实现三维平动、一维转动的四维操纵。

2) 光学通信^[12-15]。涡旋光束携带的轨道角动量为光通信领域的一个全新的维度, 携带不同螺旋拓扑荷数的涡旋模式之间是相互正交的, 因此通过轨道角动量的复用技术, 可以极大地提高信道的容量。

关于涡旋光束的产生方式, 先前研究主要集中在

收稿日期: 2019-06-20; 修回日期: 2019-07-31; 录用日期: 2019-08-16

基金项目: 四川省学术和技术带头人培养支持经费资助、激光聚变研究中心青年人才成长基金

* E-mail: lylymao2013@163.com

在(准)连续波领域^[16-21],这与光学涡旋转换器件的波长敏感特性是分不开的。近年来,随着超快光学领域的飞速发展,将涡旋光束与时域调控技术相结合产生超短的涡旋脉冲引起研究人员极大的兴趣。超短涡旋脉冲具有高能量密度,同时携带轨道角动量,能够在光与物质相互作用中带来新的自由度,为高强度场条件下的物理实验提供了有力的研究条件^[22-24]。同时,具有涡旋特性的超短脉冲相比于非涡旋的环形光束,在应用于激光消融领域时,拥有更清晰光滑的加工表面和更低的消融阈值通量,因此可应用于精密激光材料的加工^[25-29]。此外,超短涡旋脉冲的时空特性在超快非线性光谱领域也有着重要的应用价值^[30-32],从而为涡旋光束开拓了新的应用前景。然而飞秒脉冲具有较大的带宽,针对在单色(窄带)光中产生光学涡旋的技术具有局限性,确保所有光谱分量都完美加入螺旋相位是一个巨大的挑战,因此超短涡旋脉冲生成方式是该领域最基本的研究内容之一。

2 超短涡旋脉冲的产生方案

在单色光领域,涡旋光有多种生成方法,如螺旋相位板(SPP)、计算机生成的全息图(CGH)等,对这些方法进行改进^[33-40]以适用于超短涡旋脉冲的产生。与此同时,一些新的方案如轴对称偏振片^[41-43]、单轴双折射晶体^[44]、衍射螺旋光栅^[45-46]、螺旋多针孔板^[47]、Sagnac干涉仪^[48]等也被提出,用来匹配超短脉冲的宽带特性。下面主要介绍几种超短涡旋脉冲产生方法,并对其原理与优缺点进行简要分析。

2.1 基于螺旋相位板的产生方案

2004年,Sueda等^[33]利用多级螺旋相位板产生了高强度的超短涡旋脉冲,首次在实验中实现超短涡旋脉冲产生的相关操作。螺旋相位板是一种衍射

光学元件,其厚度随方位角的增大而增加,从而实现入射光束的波前调制。该课题组使用的多级螺旋相位板是利用多级气相沉积工艺在石英玻璃上制造完成的,如图1所示,它有着较高的损伤阈值,且该元件对于大口径的光束也有着很高的适用性。螺旋相位板固有的拓扑荷数 l 是针对特定波长来讲的,波长为 λ 的脉冲通过螺旋相位板后的螺旋拓扑荷为

$$l(\lambda) = l \frac{\lambda_0}{\lambda} \left[\frac{n_s(\lambda) - n_o(\lambda)}{n_s(\lambda_0) - n_o(\lambda_0)} \right], \quad (1)$$

式中: λ_0 表示脉冲中心波长; n_s 为基底的折射率; n_o 为周围介质的折射率。因此在脉冲带宽较宽时,螺旋拓扑电荷分散以及群延迟使得光束质量降低,通过引入校正元件可以对其进行补偿,但这样会使得光束整形变得复杂。

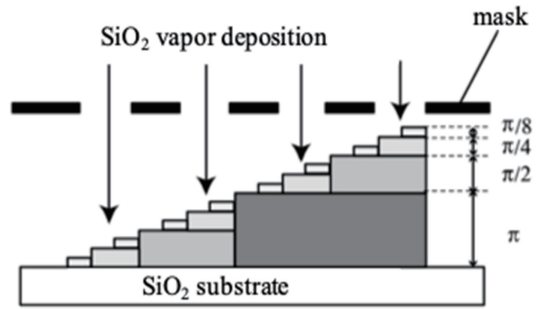


图1 16级螺旋相位板示意图^[33]

Fig. 1 Diagram of SPP with 16 steps^[33]

为了提高螺旋相位板对宽带脉冲的适用性,Swartzlander^[34]在2006年提出了消色差螺旋透镜结构,如图2所示,这种透镜由两个具有相同形状和不同折射率的元件组成,根据(1)式,当满足 $l(\lambda) = l$ 时,螺旋拓扑荷不再依赖于波长,消色差螺旋相位板的工作带宽提高到100 nm左右,但是该元件的材料与结构需要预先计算、设计,且需要寻找折射率相匹配的材料,加工过程较为复杂。

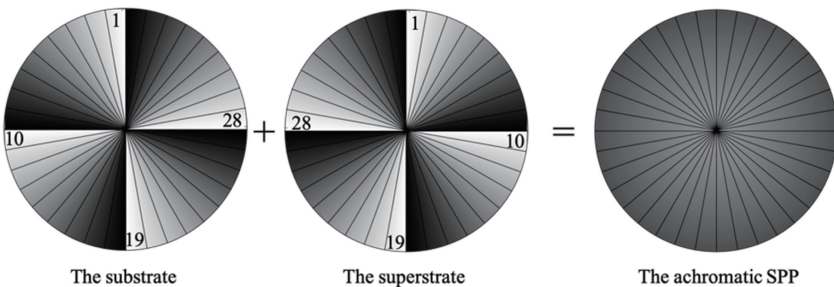


图2 由具有不同折射率的两种元件组成的36级消色差螺旋相位板^[35]

Fig. 2 36-level achromatic spiral phase plate composed of two elements with different refractive indexes^[35]

2.2 基于全息光栅的产生方案

全息光栅可以产生任意拓扑荷数的涡旋光。在

超短涡旋脉冲的产生过程中,由于角色散的存在,尽管宽带光中每个光谱分量均可以形成良好的光学涡

旋,但是这些光学涡旋的衍射角是与波长相关的,因此会产生空间啁啾,这限制了该方案的应用。针对这个问题,科研人员设计了各种结构进行色散补偿,如双光栅^[36-38]、棱镜对^[39]、消色差棱镜^[40]等。

2004年,Bezuhanov等^[36]通过理论分析和实验研究了高功率超短涡旋脉冲的产生,该方案是对传统单色光领域全息光栅方法的改进。为了解决角色散的影响,该课题组利用了线形光栅与叉形光栅组成的光栅对,其中线形光栅没有顶部叉形,其余与叉形光栅完全相同。首先通过线形光栅对脉冲进行预啁啾,再通过叉形光栅得到补偿了空间啁啾的超短涡旋脉冲,但是该涡旋光对比度较低,中心暗斑强度仅低于环形圈强度20%左右,而理想的涡旋光中心强度为零;此外,该装置对光路对准十分敏感,实用性不高。

2005年,Mariyenko等^[37]为了研究轨道角动量对强场电离过程的影响,探索了高质量超短涡旋脉

冲的产生方案,得到了具有理想暗斑的涡旋光束。该方案基于上述双光栅补偿方案,实验装置如图3所示。实验中使用的光源为掺Ti的蓝宝石激光器,其脉宽为25 fs,带宽为40 nm,中心波长为800 nm。首先让光脉冲通过线型光栅,利用偏心的孔径光阑选取带有空间啁啾的+1衍射级,然后通过会聚透镜将其聚焦在叉型光栅上,当其透过叉型光栅后,在远场就可以观察消除了空间啁啾的宽带涡旋光。此方案装置中的每一个结构都是常见的光学元件,成本低廉,但是它仅能产生微弱的涡旋脉冲,转化效率比较低,只有10%左右。通过对实验装置进行改进,使用相位全息图来代替透射全息图,可以在一定程度上提高涡旋脉冲的吞吐量。该方案利用全息光栅对与 $4f$ (f 为焦距)系统的巧妙组合补偿了角色散,但是实际上,在利用透镜重新聚焦的过程中,不同光谱分量的时间延迟依然是不可忽略的。

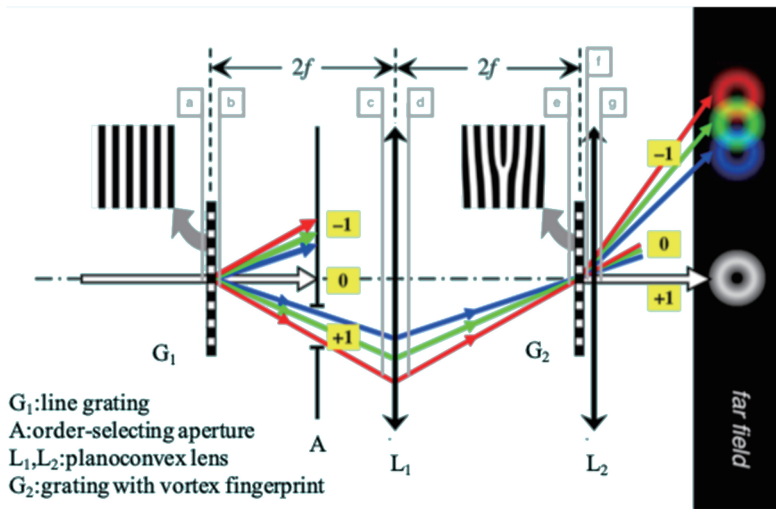


图3 $2f-2f$ 色散补偿装置原理图^[37]

Fig. 3 Schematic of $2f-2f$ dispersion compensation setup^[37]

2.3 基于轴对称偏振片和轴对称波片的产生方案

2009年,Tokizane等^[41]通过理论分析和实验研究了超宽带的超短涡旋脉冲产生,他们利用轴对称偏振片(ASP)产生了没有空间色散和螺旋拓扑电荷分散的超短涡旋光,光谱范围约为300 nm,螺旋拓扑电荷 $l = \pm 2$ 。在该方案中,偏振的转化是光束涡旋化的关键,实验原理如图4所示,使输入的高斯光束通过一系列偏振控制元件后,便会得到高质量的涡旋光束。表1为参与转化过程的每个元件的琼斯矩阵,清楚地展示了涡旋光束的产生过程。由于所采用的元件均对波长不敏感,因此该方案可以在超宽带范围内进行超短涡旋光束的转化,而通过对ASP

的设计,能产生任意拓扑电荷的涡旋光束。但是这个方案只有25%的转化效率,并且由于ASP器件的损伤阈值较低,输入光束被限制在 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ 量级。

2012年,Yamane等^[42-43]通过对上述方案进行优化,在同样的带宽条件下,产生了2.3周期、5.9 fs带宽、56 μJ 能量、 $l = \pm 1$ 的超短涡旋脉冲。输出脉冲的光谱干涉以及强度图表明,光束没有空间色散或者螺旋拓扑电荷的分散。该方案与轴对称偏振片方案类似,只是在装置中使用轴对称半波片(ASWP)替代了轴对称偏振片。如图5所示,轴对称半波片由12个分段构成,其快轴角度随方位角的一半呈线性变化。由于不需要额外的偏振器件,相

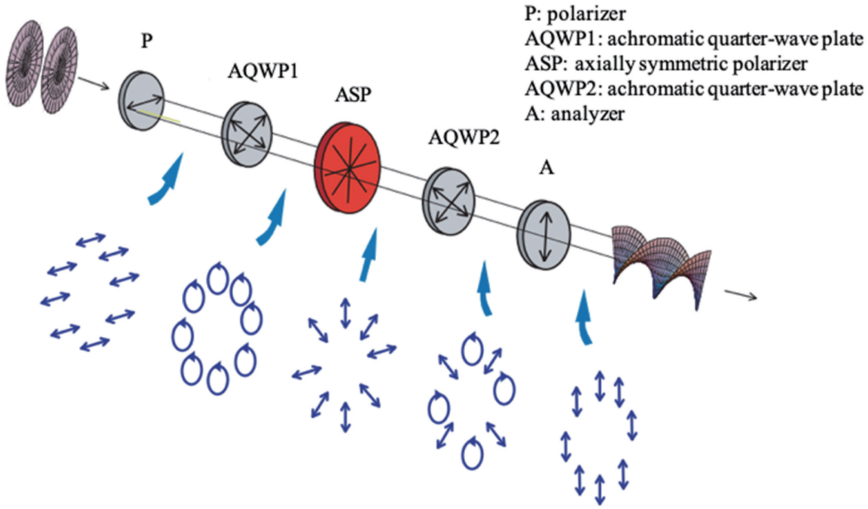


图 4 超宽带涡旋光产生装置原理图^[41]

Fig. 4 Schematic of ultrabroadband vortex beam generation system^[41]

表 1 每个器件的琼斯矩阵及通过器件后的光场矢量^[41]

Table 1 Jones matrix of each component and light field vectors after passing through device^[41]

Component	Polarizer	AQWP1	ASP	AQWP2	Analyzer
Jones matrix	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \cos^2 \varphi & \frac{1}{2} \sin 2\varphi \\ \frac{1}{2} \sin 2\varphi & \sin^2 \varphi \end{bmatrix}$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
Vector	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix}$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \exp(i\varphi) \begin{bmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{bmatrix}$	$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \exp(2i\varphi) \end{bmatrix}$	$-\frac{i}{2} \exp(2i\varphi) \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$

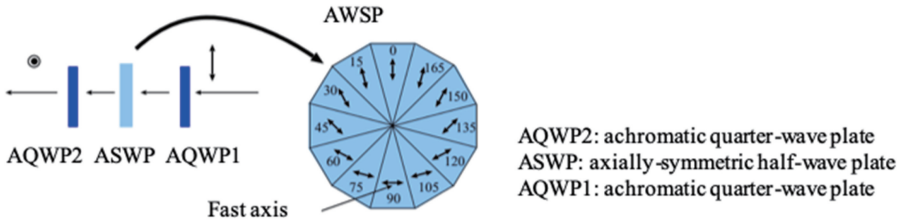


图 5 轴对称半波片示意图^[43]

Fig. 5 Diagram of axially-symmetric half-wave plate^[43]

比于 ASP 方案,使用 ASWP 可以在同样的超宽带条件下,达到 100% 的转化效率,而且具有更低材料色散。ASWP 是通过快轴角度的变化来提供与方位角相关的相移,其构造比较复杂,对于高阶涡旋光的产生具有一定的局限性。

2.4 基于单轴双折射晶体的产生方案

2010 年,Shvedov 等^[44]利用双折射晶体作为涡旋转换器,产生了单能量密度为 $5 \times 10^{-3} \text{ J/cm}^2$ 、脉宽为 150 fs 的超短涡旋脉冲,实现了对单拓扑电荷超短涡旋脉冲 75% 的转换效率和对双拓扑电荷超短涡旋脉冲 50% 的转换效率。这个方案利用了光束通过各向异性介质时会产生偏振奇点且这些奇点

在通过偏振滤波器后可以转化为相位奇点的特性,在一个宽光谱范围内产生了超短涡旋光。

该课题组设计的实验方案如图 6 所示。实验中为了避免高能飞秒脉冲击穿晶体内部,首先利用负透镜对光束进行发散,再使光束进入双折射晶体。通过双折射晶体后的光束为两种矢量状态的叠加,将该光束通过 1/4 波片和偏振分束器后便可以得到高质量的宽带涡旋光束。而在实验中,通过对输入光偏振旋向的控制可以得到完全相反的拓扑电荷的超短涡旋光。由于单轴晶体对入射光束的转换是与波长无关的,因此可以将其用于任意带宽的涡旋光产生。在该方案中,所采用的光学元件都有着较高

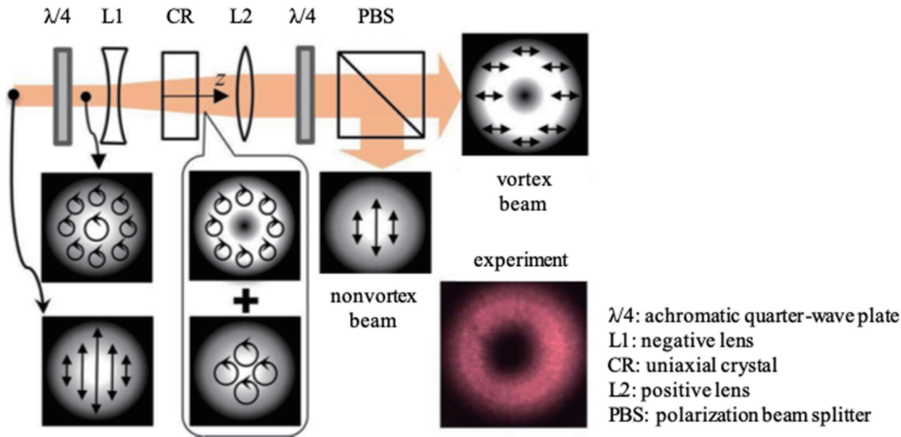


图 6 用于产生双电荷飞秒涡旋脉冲的装置示意图^[44]

Fig. 6 Setup diagram for generation of double-charge femtosecond vortex pulses^[44]

的损伤阈值,不存在任何光吸收元件,适用于高能脉冲,且具有较高的转换效率。但是受总角动量守恒特性的限制,这个方案只能用于产生单拓扑电荷和双拓扑电荷的涡旋光。

2.5 基于衍射螺旋光栅的产生方案

2012年 Bock 等^[45]利用衍射螺旋光栅元件,在特定的传输距离处获得了最短脉冲持续时间为 8 fs、带宽为 200 nm、拓扑荷数为 1 和 2 的少周期、高对比度的超短涡旋脉冲。对于只有几个周期的超短脉冲,需要同时考虑角色散以及群延迟色散的影响,因此进行色散补偿就显得十分重要。如图 7 所示,利用衍射螺旋光栅对超短脉冲进行相位调制,便可以产生超短涡旋脉冲,该元件是通过厚度为 3 mm 的熔融二氧化硅基底进行多级蚀刻得到的,利用基底引入的正群速度色散来补偿光栅引入的负群速度色散。该课题组提出的方案具有高度紧凑的结

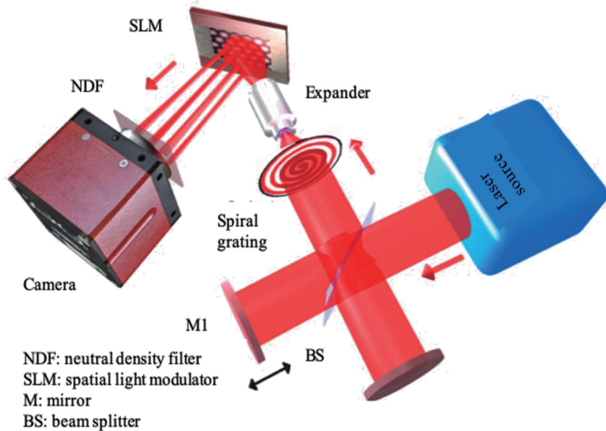


图 7 少周期超短涡旋脉冲产生与表征的装置示意图^[45]

Fig. 7 Setup diagram for generation and characterization of few-cycle ultrashort vortex pulses^[45]

构,无需复杂的光学调整便可以得到对比度较高的涡旋光束,但是衍射螺旋光栅的结构较为复杂,需要预先进行精准的计算以及加工,这限制了该装置的使用灵活性。

2.6 基于螺旋多针孔板的产生方案

2017年, Ma 等^[47]将螺旋多针孔板作为光学调制器件,产生了脉宽为 12 fs、带宽为 240 nm 的涡旋脉冲,实现了超短脉冲到超短涡旋脉冲的转化。螺旋多针孔板由聚焦的飞秒激光器在铝箔上冲孔制成,它的结构如图 8 所示,针孔半径约为 26 μm,针孔数量 $N=36$,沿着板原点以初始半径 $\rho_1=0.5$ cm 螺旋曲线排列,这些针孔的方位角增量恒定而径向距离递增。螺旋多针孔板对光束的调制利用了多光束的干涉和衍射效应,适用于超宽带的脉冲。该方案在转化过程中未出现介质引起的色散,可以避免超短激光脉冲的时间展宽,同时多针孔板易于制造,产生的超短涡旋光具有较高的对比度,但该元件会引起螺旋拓扑电荷分散,而且转化效率较低,在通过

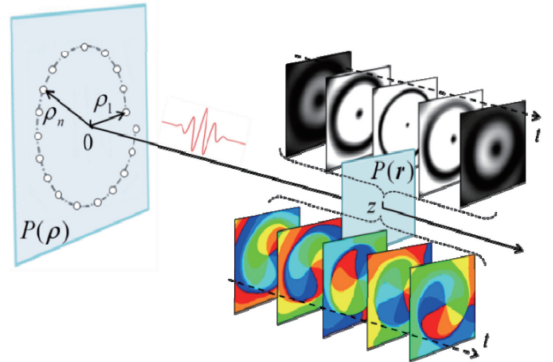


图 8 螺旋多针孔板产生超短涡旋脉冲的原理图^[46]

Fig. 8 Schematic of ultrashort vortex pulse generation by spiral multi-pinhole plate^[46]

转化器件时会有大量的能量损失。

2.7 基于 Sagnac 干涉仪的产生方案

2017 年 Naik 等^[48]将 Sagnac 干涉仪与脉冲激光结合,产生了单拓扑电荷的超短光学涡旋,并利用产生的超短涡旋脉冲进行了非线性频率转化并生成矢量脉冲,从而验证该方案的可行性。实验光路如图 9 所示,旋转反射镜 M_2 控制光束 x 方向的线性

相位差,倾斜反射镜 M_1 、 M_3 控制光束 y 方向的横向剪切,从而产生了高度稳定的消色差超短涡旋脉冲,而通过对横向剪切量以及线性相位差符号的改变,则可以控制涡旋光的旋向。该方案实验装置简单、成本低,适用于高功率涡旋光,不会被特殊光学元器件的工作带宽所限制,但是对于高阶涡旋光的制备,这种方案就不再适用。

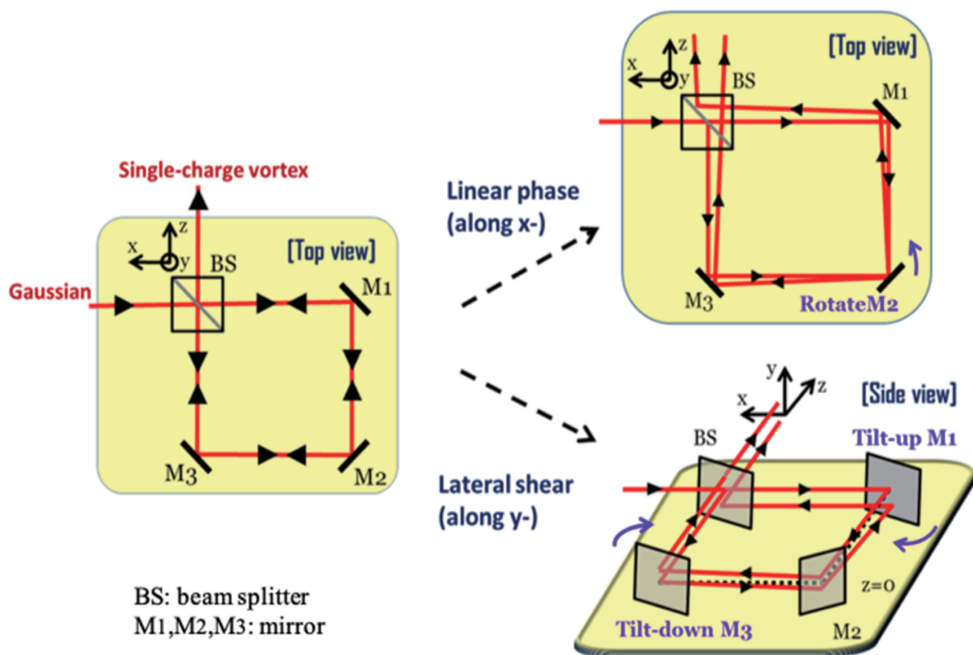


图 9 Sagnac 干涉仪作为单电荷涡旋调制器的示意图^[47]

Fig. 9 Diagram of Sagnac interferometer used as single-charge vortex generator^[47]

3 分析与讨论

通过调研发现,为产生超短涡旋脉冲,既有研究对窄带涡旋光产生方案进行改进,也有研究针对宽带涡旋光提出了全新方案。每种方案都有其特点,也存在自身的局限性,需要根据实际情况选择合适的方法,尽可能提高超短涡旋脉冲的光束质量,提升系统的稳定性。这里对目前常见的几种超短涡旋脉冲产生方法的优势与不足进行对比分析(表 2)。

基于螺旋相位板的产生方案光路简单,损伤阈值高,损耗低,具有较高的转换效率,非常适用于高功率、大口径条件。但是螺旋相位板并不是针对宽带设计的,一旦输入的脉冲带宽较宽,便会由群延迟以及螺旋拓扑电荷分散等导致光束质量降低,尽管可以通过色散补偿元件以及消色差螺旋透镜等结构进行补偿,但这大大提高了该方案的复杂程度。

基于全息光栅的产生方案通过精巧的光路设计,使用常见的光学元件进行了色散补偿。但补偿

过程较为复杂,对光路对准要求很高,同时转化效率较低,只有 10% 左右。

基于 ASP 和 ASWP 的产生方案主要通过对偏振的控制实现超短涡旋脉冲的转化。由于实验中的调制元件均对波长不敏感,因此该方案可以在一个超宽带的范围内产生高质量的输出脉冲,而不存在角色散或螺旋拓扑电荷分散,其中 ASP 可以达到 25% 的转化效率,ASWP 的转化效率甚至可以达到 100%,但是调制元件损伤阈值较低,不适用于高功率脉冲。

基于单轴双折射晶体的产生方案,同样也是通过对偏振的控制实现超短涡旋脉冲的输出,在一个超宽带范围内均可使用。所使用的元件具有较高的损伤阈值,因此该方案适用于高能脉冲,且转化效率较高;但是受到角动量守恒的约束,该方案仅能用于产生单电荷和双电荷的超短涡旋脉冲。

基于衍射螺旋光栅的产生方案具有高度紧凑的结构,无需复杂的光学调整便可以补偿宽带涡旋脉

冲在转化过程中引入的色散,从而产生对比度较高的涡旋光束,但是转化元件结构较为复杂,需要预先进行精准的计算以及加工。

基于螺旋多针孔板的产生方案实验装置简单,损伤阈值高,转化器件多针孔板易于制造,适用于超宽带的脉冲,但是该元件在转化过程中会产生螺旋拓扑

电荷分散,且转化效率较低,会有大量能量损失。

基于 Sagnac 干涉仪的产生方案利用了成熟的光路结构,实验装置简单、成本低,不受光谱带宽限制,损伤阈值较高,十分适用于高功率涡旋光转化。但是通过对利用该方案产生涡旋光的原理进行分析,可以发现该方案仅能用于产生 $l = \pm 1$ 的涡旋光。

表 2 超短涡旋脉冲产生方法的对比分析

Table 2 Comparison of different methods for ultrashort vortex beam generation

Generation method	Advantage	Disadvantage
Spiral phase plate	High damage threshold, low dissipation, greater flexibility	Topological-charge dispersion, group delay
Computer-generated hologram	Generate any topological charge	Low conversion efficiency, complicated compensation procedure
Axially symmetric polarizer/axially symmetric half-wave plate	High conversation efficiency, applicable to ultrabroadband pulses	Low damage threshold
Uniaxial crystal	Applicable to ultrabroadband pulses, high damage threshold, high conversation efficiency	Only generate single-and double-charge vortex
Spiral grating	Compact structure, generate high contrast pulse	Complicate components
Spiral multi-pinhole plate	High damage threshold, easily fabricated	Topological-charge dispersion, low conversion efficiency
Sagnac interferometer	Common-path configuration, applicable to ultrabroadband pulses, high damage threshold	Only generate single-charge vortex

4 结束语

涡旋光束具有独特的性质,而将其拓展到超短领域产生超短涡旋脉冲,具有很大的应用前景和发展潜力,如何获得宽带的超短涡旋脉冲引起越来越多研究人员的兴趣。对近年来国内外超短涡旋脉冲主要产生方案的研究进展进行总结,对其原理进行了简要介绍,并对对比分析了各个方案的优势与不足。更稳定、更成熟的超短涡旋脉冲产生方案的逐渐提出,将会在越来越多的领域发挥重要的作用。

参 考 文 献

- [1] Born M, Wolf E. Principles of optics[J]. 7th ed. New York: Press Syndicate of the University of Cambridge, 1999.
- [2] Nye J F, Berry M V. Dislocations in wave trains[J]. Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences, 1974, 336 (1605): 165-190.
- [3] 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): 8185-8189.

- [4] Nye J, Wright F J. Natural focusing and fine structure of light: caustics and wave dislocations[J]. American Journal of Physics, 2000, 68(8): 776-778.
- [5] Allen L, Padgett M J, Babiker M. IV the orbital angular momentum of light[M] // Wolf E. Progress in optics. Amsterdam: Elsevier, 1999, 39: 291-372.
- [6] Kivshar Y S, Pelinovsky D E. Self-focusing and transverse instabilities of solitary waves[J]. Physics Reports, 2000, 331(4): 117-195.
- [7] Padgett M, Courtial J, Allen L. Light's orbital angular momentum [J]. Physics Today, 2004, 57 (5): 35-40.
- [8] Yao A M, Padgett M J. Orbital angular momentum: origins, behavior and applications[J]. Advances in Optics and Photonics, 2011, 3(2): 161-204.
- [9] Grier D G, Roichman Y. Holographic optical trapping[J]. Applied Optics, 2006, 45(5): 880-887.
- [10] Padgett M, Bowman R. Tweezers with a twist[J].

- Nature Photonics, 2011, 5(6): 343-348.
- [11] Phillips D B, Padgett M J, Hanna S, et al. Shape-induced force fields in optical trapping [J]. Nature Photonics, 2014, 8(5): 400-405.
- [12] Wang J, Yang J Y, Fazal I M, et al. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing [J]. Nature Photonics, 2012, 6(7): 488-496.
- [13] Yan Y, Xie G D, Lavery M P J, et al. High-capacity millimetre-wave communications with orbital angular momentum multiplexing [J]. Nature Communications, 2014, 5: 4876.
- [14] Wang J, Willner A E. Using orbital angular momentum modes for optical transmission [C] // Optical Fiber Communication Conference, March 9-13, 2014, San Francisco, California, United States. Washington, D.C.: OSA, 2014: W4J.5.
- [15] Willner A E, Huang H, Yan Y, et al. Optical communications using orbital angular momentum beams[J]. Advances in Optics and Photonics, 2015, 7(1): 66-106.
- [16] Khonina S N, Kotlyar V V, Shinkaryev M V, et al. The phase rotor filter[J]. Journal of Modern Optics, 1992, 39(5): 1147-1154.
- [17] Beijersbergen M W, Coerwinkel R P C, Kristensen M, et al. Helical-wavefront laser beams produced with a spiral phase plate [J]. Optics Communications, 1994, 112(5/6): 321-327.
- [18] Padgett M J, Allen L. Orbital angular momentum exchange in cylindrical-lens mode converters [J]. Journal of Optics B: Quantum and Semiclassical Optics, 2002, 4(2): S17-S19.
- [19] Heckenberg N R, McDuff R, Smith C P, et al. Generation of optical phase singularities by computer-generated holograms [J]. Optics Letters, 1992, 17(3): 221-223.
- [20] Ibarra J C, Ortiz-Gutiérrez M, Alonso-Magaña P. Characterization of bromocresol green and resin as holographic film [J]. Optical Materials, 2004, 27(3): 567-572.
- [21] Smith A, Armstrong D. Generation of vortex beams by an image-rotating optical parametric oscillator[J]. Optics Express, 2003, 11(8): 868-873.
- [22] Cheng K, Zhong X, Xiang A. Propagation dynamics, Poynting vector and accelerating vortices of a focused Airy vortex beam [J]. Optics & Laser Technology, 2014, 57: 77-83.
- [23] Picón A, Mompert J, Vázquez de Aldana J R, et al. Photoionization with orbital angular momentum beams [J]. Optics Express, 2010, 18(4): 3660-3671.
- [24] Krausz F, Ivanov M. Attosecond physics [J]. Reviews of Modern Physics, 2009, 81(1): 163-234.
- [25] 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.
- [26] Hnatovsky C, Shvedov V G, Shostka N, et al. Polarization-dependent ablation of silicon using tightly focused femtosecond laser vortex pulses [J]. Optics Letters, 2012, 37(2): 226-228.
- [27] Hamazaki J, Morita R, Chujo K, et al. Optical-vortex laser ablation [J]. Optics Express, 2010, 18(3): 2144-2151.
- [28] Allegre J, Jin Y, Perrie W, et al. Complete wavefront and polarization control for ultrashort-pulse laser microprocessing [J]. Optics Express, 2013, 21(18): 21198-21207.
- [29] Nivas J J J, He S T, Anoop K K, et al. Laser ablation of silicon induced by a femtosecond optical vortex beam [J]. Optics Letters, 2015, 40(20): 4611-4614.
- [30] Tokizane Y, Shimatake K, Toda Y, et al. Global evaluation of closed-loop electron dynamics in quasi-one-dimensional conductors using polarization vortices [J]. Optics Express, 2009, 17(26): 24198-24207.
- [31] Matos-Abiague A, Berakdar J. Photoinduced charge currents in mesoscopic rings [J]. Physical Review Letters, 2005, 94(16): 166801.
- [32] Quinteiro G F, Berakdar J. Electric currents induced by twisted light in Quantum Rings [J]. Optics Express, 2009, 17(22): 20465-20475.
- [33] Sueda K, Miyaji G, Miyanaga N, et al. Laguerre-Gaussian beam generated with a multilevel spiral phase plate for high intensity laser pulses [J]. Optics Express, 2004, 12(15): 3548-3553.
- [34] Swartzlander G A. Achromatic optical vortex lens [J]. Optics Letters, 2006, 31(13): 2042-2044.
- [35] Xie Q S, Zhao D M. Optical vortices generated by multi-level achromatic spiral phase plates for broadband beams [J]. Optics Communications, 2008, 281(1): 7-11.
- [36] Bezuharov K, Dreischuh A, Paulus G G, et al. Vortices in femtosecond laser fields [J]. Optics Letters, 2004, 29(16): 1942-1944.
- [37] Mariyenko I G, Strohaber J, Uiterwaal C J G J. Creation of optical vortices in femtosecond pulses [J].

- Optics Express, 2005, 13(19): 7599-7608.
- [38] Bezuharov K, Dreischuh A, Paulus G G, et al. Spatial phase dislocations in femtosecond laser pulses [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2006, 23(1): 26-35.
- [39] Schwarz A, Rudolph W. Dispersion-compensating beam shaper for femtosecond optical vortex beams [J]. Optics Letters, 2008, 33(24): 2970-2972.
- [40] Zeylikovich I, Sztul H I, Kartazaev V, et al. Ultrashort Laguerre-Gaussian pulses with angular and group velocity dispersion compensation [J]. Optics Letters, 2007, 32(14): 2025-2027.
- [41] Tokizane Y, Oka K, Morita R. Supercontinuum optical vortex pulse generation without spatial or topological-charge dispersion [J]. Optics Express, 2009, 17(17): 14517-14525.
- [42] Yamane K, Toda Y, Morita R. Generation of ultrashort optical vortex pulses using optical parametric amplification [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics 2012, May 6-11, 2012, San Jose, California, United States. Washington, D.C.: OSA, 2012: JTU1K.4.
- [43] Yamane K, Toda Y, Morita R. Ultrashort optical-vortex pulse generation in few-cycle regime [J]. Optics Express, 2012, 20(17): 18986-18993.
- [44] 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.
- [45] Bock M, Jahns J, Grunwald R. Few-cycle high-contrast vortex pulses [J]. Optics Letters, 2012, 37(18): 3804-3806.
- [46] Musigmann M, Jahns J, Bock M, et al. Refractive-diffractive dispersion compensation for optical vortex beams with ultrashort pulse durations [J]. Applied Optics, 2014, 53(31): 7304-7311.
- [47] Ma L, Zhang P, Li Z H, et al. Spatiotemporal evolutions of ultrashort vortex pulses generated by spiral multi-pinhole plate [J]. Optics Express, 2017, 25(24): 29864-29873.
- [48] 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: 2395.