

## 可见光波段全固态涡旋激光腔内产生技术研究进展（特邀）

齐瑶瑶 李珺辰 张雨 闫大鹏 常峰 虞秀芬 白振旭 丁洁 颜秉政 王雨雷 吕志伟

### Research progress of all-solid-state intra-cavity vortex beam generation in visible laser (invited)

Qi Yaoyao, Li Junchen, Zhang Yu, Yan Dapeng, Chang Feng, Yu Xiufen, Bai Zhenxu, Ding Jie, Yan Bingzheng, Wang Yulei, Lv Zhiwei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20230424>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 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）

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

红外与激光工程. 2020, 49(12): 20201061 <https://doi.org/10.3788/IRLA20201061>

#### 红外与可见光图像融合技术的研究进展

Research progress of infrared and visible image fusion technology

红外与激光工程. 2021, 50(9): 20200467 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200467>

#### 不同湿度环境下可见光波段激光偏振特性研究

Laser polarization characteristics of visible light band in different humidity environments

红外与激光工程. 2020, 49(9): 20200057 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200057>

#### 脉冲LD泵浦千赫兹1.57 $\mu\text{m}$ 全固态激光器

Pulse LD pumped kilohertz 1.57  $\mu\text{m}$  solid-state laser

红外与激光工程. 2018, 47(1): 105003 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0105003>

#### 涡旋光束的几何坐标变换技术及应用研究进展（特邀）

Research progress on technologies and applications of geometric coordinate transformation of vortex beam (Invited)

红外与激光工程. 2021, 50(9): 20210445 <https://doi.org/10.3788/IRLA20210445>

#### 超连续谱光源辐照可见光CMOS图像传感器的实验研究

Experimental study on supercontinuum laser irradiating a visible light CMOS imaging sensor

红外与激光工程. 2017, 46(1): 106004 <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0106004>

## 可见光波段全固态涡旋激光腔内产生技术研究进展 (特邀)

齐瑶瑶<sup>1,2,3</sup>, 李珺辰<sup>1,2</sup>, 张雨<sup>1,2</sup>, 闫大鹏<sup>3</sup>, 常峰<sup>3</sup>, 虞秀芬<sup>3</sup>, 白振旭<sup>1,2</sup>, 丁洁<sup>1,2</sup>,  
颜秉政<sup>1,2</sup>, 王雨雷<sup>1,2</sup>, 吕志伟<sup>1,2\*</sup>

- (1. 河北工业大学先进激光技术研究中心, 天津 300401;
2. 河北省先进激光技术与装备重点实验室, 天津 300401;
3. 武汉锐科光纤激光技术股份有限公司, 湖北武汉 430223)

**摘要:** 涡旋光由于携带轨道角动量信息,在天文学、光学操控、显微成像、传感、量子科学和光通信等领域有着广泛的应用前景。特别地,针对可见光波段涡旋激光,在水下通信领域,涡旋光束可以显著提高通信容量。此外,在可见激光高分辨成像领域,涡旋光束可大幅度提高成像分辨率。目前,可见光波段涡旋光主要通过无源法和有源法产生。相比腔外转换的无源法,有源法在转换效率、光束质量(模式纯度)以及功率提升方面均具有显著优势。该综述重点阐述激光腔内直接产生可见光波段涡旋光的产生技术,具体包括离轴泵浦法、环形泵浦法、腔内球差法等技术手段。综述了可见光波段涡旋固态激光的腔内产生技术,分别从基于非线性频率变换的可见光涡旋激光产生技术、基于分立元器件的 LD 直接泵浦可见光全固态涡旋激光产生技术、基于光纤介质的 LD 直接泵浦可见光全固态涡旋激光产生技术方面进行介绍。最后对其未来发展进行分析和展望。

**关键词:** 可见光; 涡旋光; 有源法; 固体激光

**中图分类号:** O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230424

### 0 引言

涡旋光束因携带轨道角动量信息,并具有螺旋相位等特性<sup>[1-2]</sup>,在宏观量子纠缠测量<sup>[3]</sup>、角度遥感<sup>[4]</sup>、精确空间测量<sup>[5]</sup>以及手性等离激元纳米喷流激光打印<sup>[6]</sup>等领域,被视为理想光源。近年来,涡旋光束的产生与调控给激光技术注入了新的活力,并带动了新型激光产业的发展。随着可见光波段激光光源的快速发展,可见光波段涡旋激光备受瞩目,并广泛应用于激光打印<sup>[7]</sup>、量子技术<sup>[8]</sup>、激光高分辨成像<sup>[9]</sup>和水下激光通信领域<sup>[10]</sup>。如图 1 所示,在激光高分辨成像领域,涡旋光束可显著提升激光成像分辨率和滤噪效果;水下通信领域受益于蓝绿光波段在水下低吸收的特性,传输距离得以提高,同时,激光光束若携带轨道角动量,可进一步扩大通信容量。因此,发展可见光波段涡旋激光产生技术,将带动可见光通信、激光高分辨

成像等应用的快速发展,具有重要的科学价值和实际意义。

通常,可见光波段涡旋光束主要包括拉盖尔高斯光束<sup>[11]</sup>、贝塞尔光束<sup>[12]</sup>、高阶椭圆厄米高斯涡旋光束<sup>[13]</sup>等。产生上述可见光波段涡旋光的方法主要分为腔外转换法和腔内直接产生法<sup>[14-16]</sup>。腔外转换法通过在激光器外部放置光学元件实现从高斯光束到涡旋光束的转换<sup>[17-18]</sup>,包括模式转换器<sup>[19]</sup>、螺旋相位板<sup>[20-21]</sup>、全光纤器件<sup>[22]</sup>、等离子体超表面<sup>[23]</sup>等。然而,腔外转换法由于光学元件的引入导致了更大的损耗和误差,因此,常常面临光转换效率低、输出功率降低和光斑质量差等问题。为了克服腔外转换法的问题,研究人员开始关注腔内直接产生涡旋光的技术,此结构激光器具有更好的光束质量、更高的输出功率和更低的成本<sup>[24-26]</sup>。目前,主要通过控制腔内模式增

收稿日期:2023-07-07; 修订日期:2023-07-20

基金项目:河北省自然科学基金项目(F2022202036);天津市自然科学基金项目(20JCZDJC00430);河北省科技研究项目(BJK2022008)

作者简介:齐瑶瑶,女,副教授,博士生导师,博士,主要从事高功率全固态激光技术方面的研究。

通讯作者:吕志伟,男,教授,博士生导师,博士,主要从事高功率激光技术与器件及应用方面的研究。

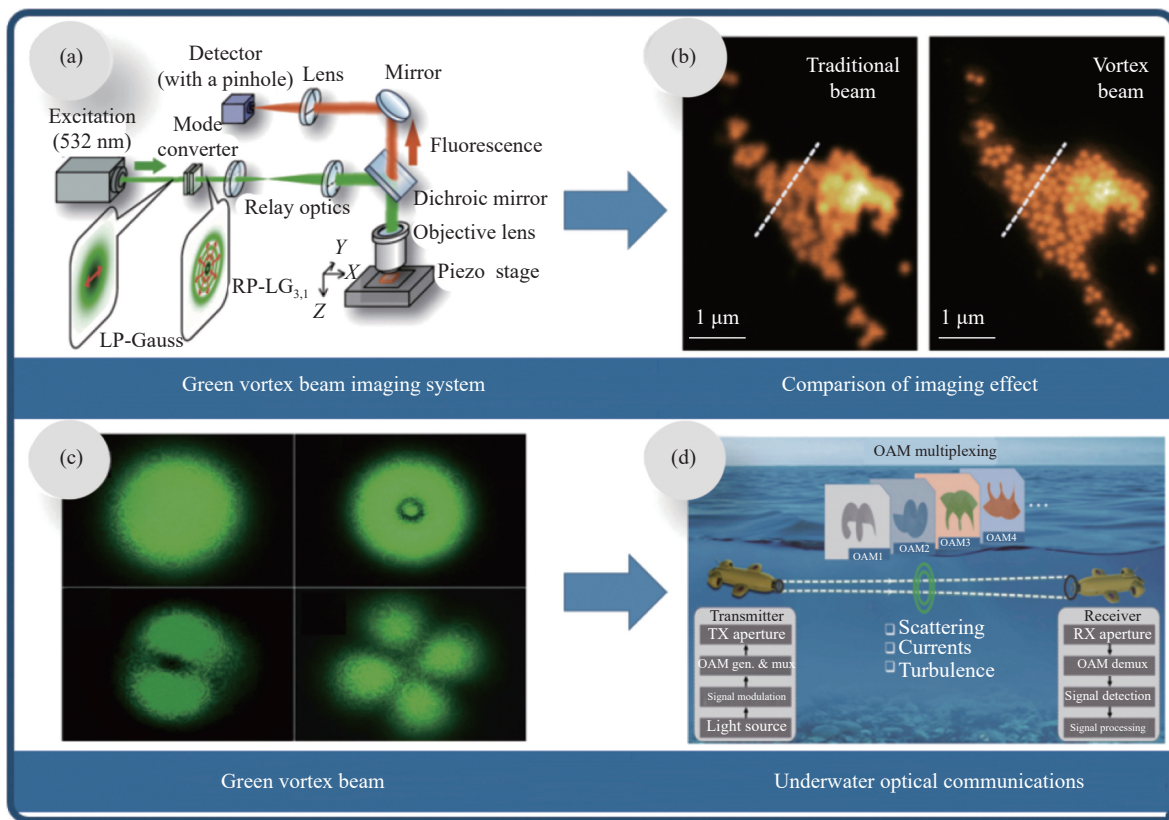


图 1 可见光波段涡旋激光在高分辨成像和 underwater 通信中的应用

Fig.1 Application of visible vortex laser in high resolution imaging and underwater communication

益与损耗关系来抑制腔内高斯模式振荡,从而产生不同阶次涡旋激光,包括离轴泵浦法<sup>[27-29]</sup>、环形泵浦法<sup>[30-31]</sup>、腔内球差法<sup>[32-33]</sup>、点缺陷镜<sup>[34-36]</sup>等。

文中重点阐述可见光波段全固态涡旋激光腔内产生技术。首先简要介绍可见光波段涡旋激光的应用背景和研究意义,以及可见光波段涡旋激光的腔内产生方法。接着重点介绍三种关键的可见光波段涡旋激光产生技术:基于非线性频率变换获得可见光波段的涡旋激光产生技术、基于分立元器件的 LD 直接泵浦可见光波段全固态涡旋激光产生技术以及基于光纤介质的 LD 直接泵浦可见光波段全固态涡旋激光产生技术。最后,总结分析当前可见光波段涡旋激光腔内产生技术存在的问题,并对未来的发展趋势进行展望。

### 1 基于非线性频率变换的可见光波段涡旋激光产生技术

近年来,随着近红外波段涡旋激光技术的迅速发展,通过非线性频率变换结合涡旋光产生技术可直接

将近红外波段激光转换为可见光波段涡旋激光,并逐渐发展成为一种有效的可见光涡旋激光产生方法。目前主流的方法为腔内直接产生或利用腔外光学调制元件产生近红外涡旋光,并结合倍频技术实现可见光波段涡旋激光输出。

#### 1.1 基于腔内直接产生近红外涡旋光结合倍频的技术

通常,在近红外波段激光腔内可直接产生涡旋光,比如,利用腔内热透镜效应所诱导的球差法,或飞秒激光刻蚀点缺陷镜法,均可以轻松抑制腔内基模激光振荡,产生近红外波段的高阶模式,再结合倍频或拉曼等非线性频率变换技术,即可获得可见光波段涡旋激光激射。

2009 年,伦敦帝国理工大学 Chard 等通过控制泵浦光束的反射角度和光斑尺寸,设计具有圆对称增益区和球形热透镜效应的 Nd:YVO<sub>4</sub> 侧泵激光放大器,如图 2(a) 所示,并结合腔外倍频技术,最终在低像散腔内获得瓦级的 LG 涡旋模式输出<sup>[37]</sup>。由于腔内倍频相比于腔外倍频具有更高的倍频转换效率,2014 年,

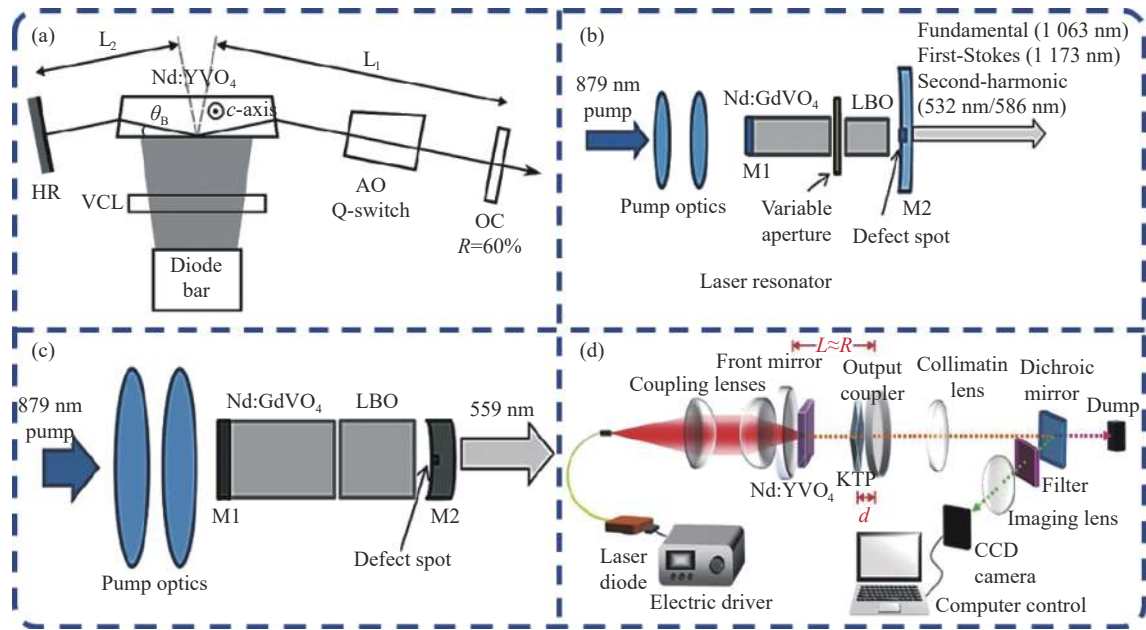


图 2 直接产生涡旋光的激光源。(a) 基于热透镜效应产生涡旋光的倍频激光器<sup>[37]</sup>；(b)~(c) 基于点缺陷镜技术的 Nd:GdVO<sub>4</sub> 内腔倍频激光器<sup>[38-39]</sup>；(d) 基于半球形谐振腔的 Nd:YVO<sub>4</sub> 内腔倍频激光器<sup>[40]</sup>

Fig.2 Laser source that directly generates vortex beam. (a) Frequency doubled laser generating vortex laser based on thermal lens effect<sup>[37]</sup>; (b)-(c) Nd:GdVO<sub>4</sub> intra-cavity frequency doubling laser based on point defect mirror technology<sup>[38-39]</sup>; (d) Nd:YVO<sub>4</sub> intra-cavity frequency doubling laser based on hemispherical resonator<sup>[40]</sup>

澳大利亚麦考瑞大学 Lee 等报道了一种腔内倍频自拉曼涡旋激光器,使用 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体作为激光自拉曼晶体,并结合三硼酸锂 (LBO) 晶体进行倍频,在输出镜上刻蚀点缺陷,成功实现中心波长为 586 nm 的拉盖尔高斯光束<sup>[38]</sup>。其后,该团队实现了中心波长为 559 nm 的涡旋光输出,如图 2(c) 所示<sup>[39]</sup>。2018 年,日本千叶大学 Tung 等设计了一个 LD 端面泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub> 半球形谐振腔激光器,通过腔内倍频,实现了局域空心绿光激光束,如图 2(d) 所示。这种空心光束沿传播方向形成封闭暗域,由高强度光围绕而成<sup>[40]</sup>。

### 1.2 基于腔外光学调制元件结合倍频的技术

传统的光学涡旋通过腔外空间光调制器 (Spatial Light Modulator, SLM)<sup>[41]</sup> 或螺旋相位板 (Spiral Phase Plate, SPP)<sup>[42]</sup> 实现对高斯光束的相位调制,尽管 SLM 在宽波长覆盖和动态相位调制方面具有灵活性,但 SPP 的高损伤阈值使其成为产生高功率光学涡旋的首选方案。通过在激光腔外采用长波长的 SPP,可以高效获得近红外涡旋光,同时结合倍频转换技术,可以实现较短波长的高阶光学涡旋输出<sup>[43-44]</sup>。

2015 年,印度 Samanta 等基于三硼酸铋 (BIBO) 晶

体实现了 12 阶超快涡旋光,其工作波长位于 532 nm,功率高达 900 mW<sup>[45]</sup>。同年,日本千叶大学 Omatsu 团队基于 Nd:YAG 激光器结合 LBO 晶体进行倍频,并采用 SPP 实现了 532 nm 涡旋绿光输出,如图 3(a) 所示,该装置光光转换效率超过 70%<sup>[46]</sup>。2016 年,该团队进一步结合数值模拟从理论和实验上研究了双涡旋激光的光束传输特性,并观察到基频和倍频涡旋光的空域变换现象<sup>[47]</sup>。2016 年,印度 Chaitanya 等基于掺镱光纤激光器作泵浦,并采用 LBO 晶体结合 SPP 获得了 532 nm 皮秒拉盖尔高斯光束<sup>[48]</sup>。2017 年,日本千叶大学 Nishigata 等<sup>[49]</sup> 成功地利用 SPP 将 532 nm 激光转换为涡旋光,并应用于可见光拉曼变换中,获得 563 nm 和 599 nm 的一阶、二阶涡旋斯托克斯涡旋光,如图 3(b) 所示。2019 年,印度 Samanta 等进一步采用 SPP 腔外调制近红外超快激光器,成功生成了高阶矢量涡旋光束,并通过倍频技术实现 24 阶的可见光波段矢量涡旋光束<sup>[50]</sup>。

为了提高输出涡旋光束的模式纯度,SPP 表面必须光滑。此外,SPP 的厚度分布必须严格符合相位与光程的关系表达式<sup>[51]</sup>。然而,SPP 通常只适用于特定

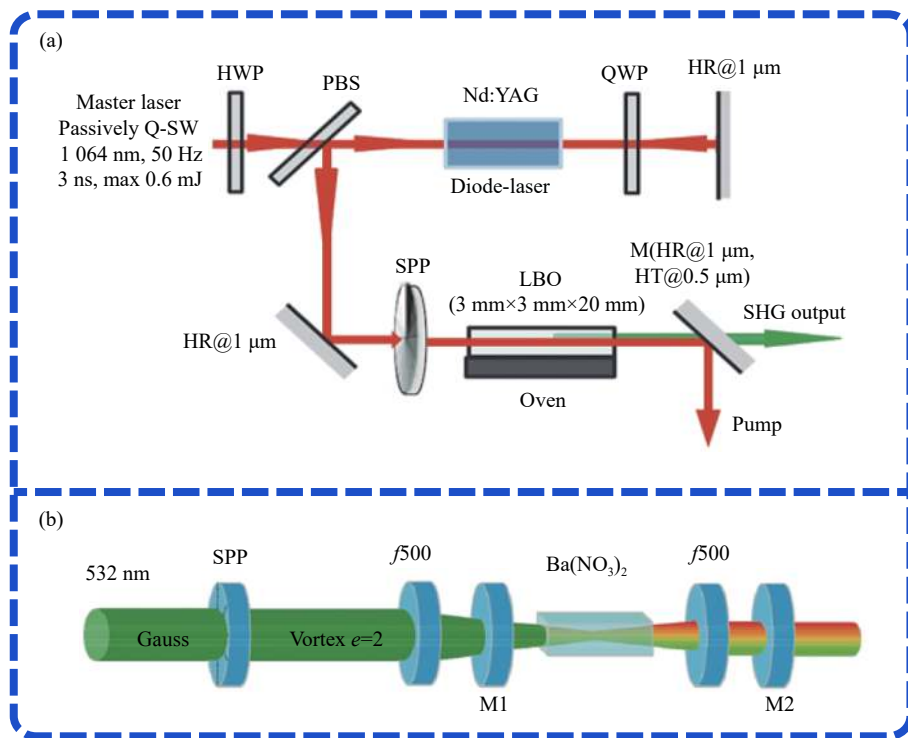


图 3 基于腔外螺旋相位板调制元件结合倍频输出可见涡旋光的实验装置。(a) 基于 LBO 倍频晶体的涡旋绿光激光器<sup>[46]</sup>; (b) 基于 Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 拉曼晶体的可见涡旋拉曼激光器<sup>[49]</sup>

Fig.3 An experimental device for output visible vortex beam based on an external cavity helical phase plate modulation element combined with frequency doubling. (a) Vortex green laser based on LBO frequency doubled crystal<sup>[46]</sup>; (b) Visible vortex Raman laser based on Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> Raman crystal<sup>[49]</sup>

波段的涡旋光束,对于不同波长的入射光,需要制作不同的 SPP,从而增加了制作工艺和成本的复杂性。

另一种实现涡旋光束的腔外调制方法是使用模式转换器,它由相互关联的柱透镜组成,可以将高阶厄米高斯光束转换为高阶拉盖尔高斯光束<sup>[52-53]</sup>。如图 4 所示,利用环形光泵浦的 Nd:LYSO 固体激光器通过柱透镜和 KTP 晶体倍频的方式可以直接产生绿光波段的脉冲涡旋光<sup>[54]</sup>。2022 年,国立台北工业大学 Tung 等<sup>[55]</sup>通过柱透镜作为模式转换器,采用离轴泵浦方式从 Nd:YVO<sub>4</sub>/KGW 拉曼倍频固体激光器中获得 588 nm 的涡旋光。

在理想条件下,模式转换器可以将入射的厄米-高斯光束转换为拉盖尔-高斯光束,且转换效率极高,因此在粒子操控和转速测量等领域具有巨大的潜在应用价值。然而,模式转换器仍存在一些限制。首先,生成所需阶次的厄米-高斯光束需要使用特定的技术手段。其次,模式转换器体积较大,并且对柱面透镜的相对位置和角度有严格要求。目前柱透镜模

式转换器主要在腔外进行调制,但往往伴随能量损耗和光束质量下降的问题。此外,由于光学元件的低损伤阈值,难以实现大功率、高能量的涡旋光输出。已有研究表明模式转换器可以作为内腔元件插入到激光腔中,实现对称性的损耗控制,并在腔内直接输出涡旋光<sup>[56]</sup>。这为可见光波段激光腔内直接实现涡旋光输出提供了新思路。

综上,基于非线性频率变换产生可见光波段涡旋光的方法依赖于非线性晶体,可通过腔内直接产生或腔外放置调制元件结合倍频实现可见涡旋光输出。利用腔内的热透镜效应或合理设计腔的结构(如腔镜刻蚀点缺陷,构造半球形谐振腔等),可以产生近红外波段涡旋光,并结合非线性频率变换获得可见涡旋光,由于这种方法直接在腔内产生,因此具有更高的输出功率。此外,通过在腔外放置 SPP 或模式转换器进行涡旋光转换,再结合非线性频率变换也可获得可见涡旋光输出。该方法操作简单,所实现的涡旋光阶次更高,当然由于引入腔外调制元件,易出现光束质

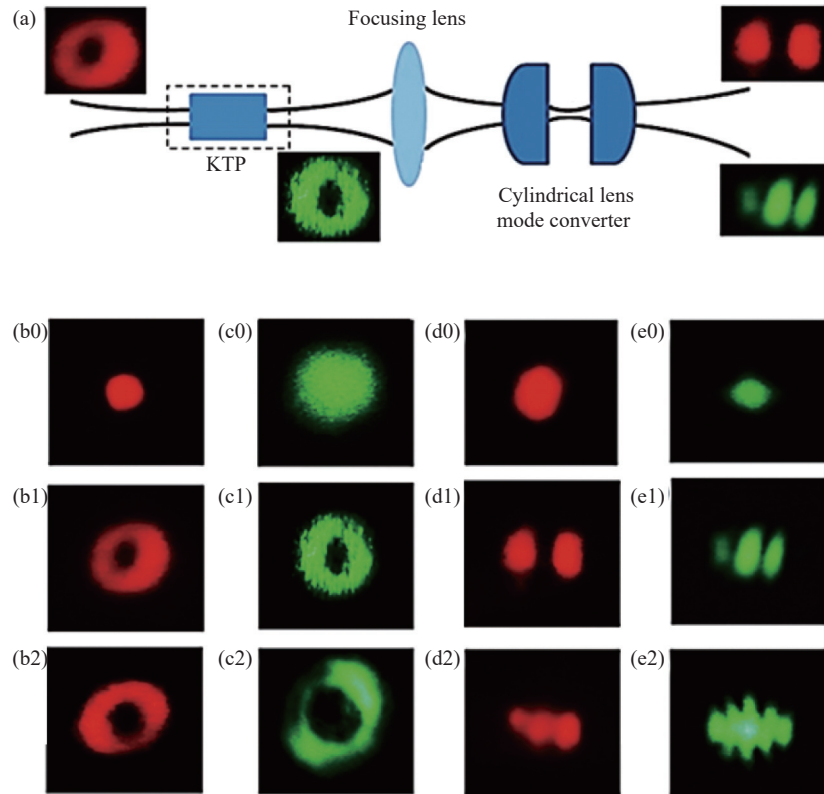


图 4 基于腔外柱透镜模式转换器结合倍频输出的可见涡旋光典型装置图<sup>[54]</sup>

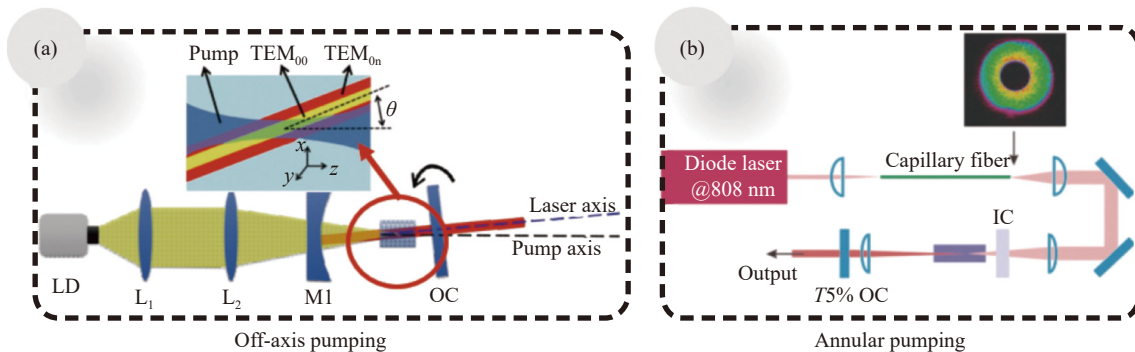
Fig.4 Typical device diagram of visible vortex beam based on external cylindrical lens mode converter combined with frequency doubling output<sup>[54]</sup>

量恶化等问题。

## 2 基于分立元器件的 LD 直接泵浦可见光全固态涡旋激光产生技术

目前,可见光波段(380~760 nm)涡旋激光主要基于近红外波段激光进行倍频,然后在腔外调控横模模式产生涡旋光,但该方法结构复杂,光光转换效率低,且成本高昂。近年来,随着高亮度蓝光 LD 的快速发展,LD 直接泵浦的可见光全固态激光振荡输出成为可能,目前用于可见光输出的激光晶体主要为掺 Pr<sup>3+</sup>晶体、掺 Ho<sup>3+</sup>晶体、掺 Dy<sup>3+</sup>晶体等<sup>[57]</sup>,其中 Pr<sup>3+</sup>具

有多个激光能级,可获得多种可见光波长的激光输出,因此掺 Pr<sup>3+</sup>晶体是实现全固态可见涡旋光输出的重要激光介质。基于分立元器件的 LD 直接泵浦可见光全固态涡旋激光器具有构造简单、输出光场稳定、输出模式数目多等优点,主要途径包括离轴泵浦、环形光泵浦、腔内球差法等,如图 5 所示。近年来,国内外多家研究机构逐渐参与到 LD 直接泵浦的可见光全固态涡旋激光产生的研究工作中,国内单位主要有厦门大学、天津大学、南京理工大学等,国外的主要研究单位包括印度光子科学实验室、日本千叶大学等。



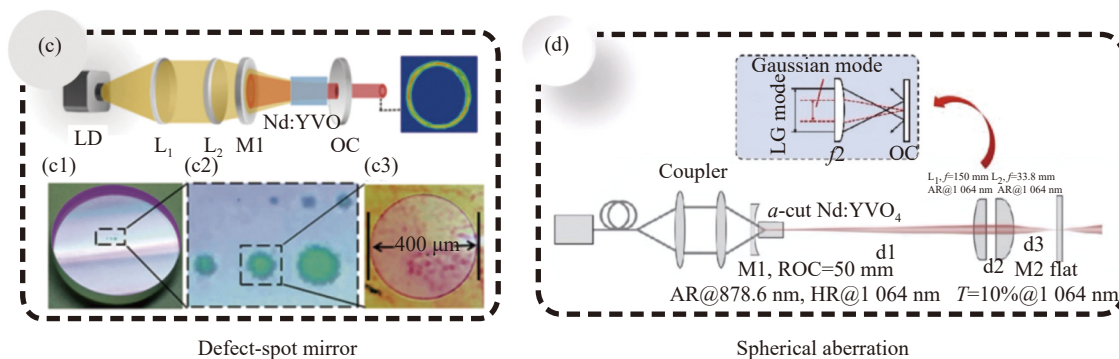


图 5 LD 直接泵浦的可见光全固态涡旋激光的产生方法

Fig.5 Direct-pumped visible solid-state vortex laser generation methods

### 2.1 腔内离轴泵浦技术

腔内离轴泵浦是产生涡旋光束的常用方式,具有成本低、易于实现、集成度高等优点。该方法通过对泵浦的离轴控制来改变泵浦和不同模式分布的重叠率,产生所需的高阶模式,主要实现途径是将腔镜或晶体进行微小位移或偏折一定角度,如图 6 所示。通过离轴泵浦技术,谐振腔通常更易于产生 HG 光束,如进一步与模式转换器等元件结合,可成功将 HG 光束转换为 LG 光束。

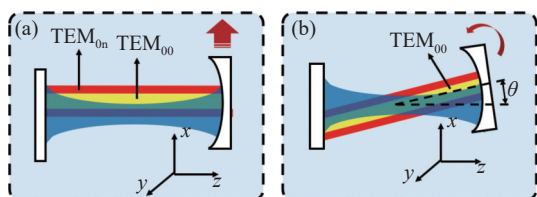


图 6 离轴泵浦技术的两种实现途径

Fig.6 Two ways to realize off-axis pumping technology

2019 年,日本千叶大学 Ma 等<sup>[58-59]</sup>基于离轴泵浦技术,首次在全固态 Pr:YLF 激光腔中实现手性可控的可见光涡旋激光输出,如图 7(a) 所示,中心波长为 640 nm,最大平均功率为 100 mW。同年,该团队利用离轴泵浦方式直接产生中心波长分别为 640 nm 和 607 nm 的双波长涡旋光束。当泵浦功率为 3.16 W 时,两种波长下涡旋光最大输出功率分别为 808 mW 和 211 mW<sup>[60]</sup>。2020 年,日本千叶大学 A.Srinivasa Rao 等<sup>[61]</sup>采用离轴泵浦实现 640 nm LG 模式、HG 模式和涡旋晶格输出,并通过腔内倍频获得紫外激光输出,如图 7(b) 所示。2021 年,该团队采用离轴光学针泵浦 Pr:YLF 晶体,实现 523 nm 涡旋光输出。此外,通

过改变谐振腔输出镜位移,可选择性生成映射到庞加莱球上的所有本征态,还可产生其他高阶结构模式,如 HIG 和涡旋晶格<sup>[62]</sup>。次年,该团队进一步实现 640 nm 和 320 nm 的光学涡旋晶格 (Optical Vortex Lattice, OVL) 模式输出,如图 7(c) 所示<sup>[63]</sup>。2021 年,厦门大学蔡志平教授课题组<sup>[64]</sup>基于 LD 泵浦 Pr:YLF 晶体结合离轴泵浦技术实现中心波长 639 nm 的涡旋红光输出。同年,该课题组通过离轴泵浦技术实现 670.4 nm 一阶涡旋激光输出<sup>[65]</sup>。

2019 年,厦门大学徐斌课题组利用 LD 泵浦 V 型 Pr:YLF 激光腔结构,在连续波模式下产生正交偏振双波长涡旋光。此外,他们还实现了同步正交偏振双波长被动调 Q 涡旋激光输出<sup>[66]</sup>,并利用 Pr:YLF 晶体和石墨烯可饱和吸收体实现稳定的 TEM<sub>00</sub> 模式锁模输出<sup>[67]</sup>。同年,他们报道了基于蓝光 LD 泵浦的 Pr:YLF 激光器,在连续波运转下产生 12 阶 HG 模式输出<sup>[68]</sup>。这些研究成果展示了非共线泵浦技术在可见涡旋光生成方面的潜力,并为涡旋光应用提供重要的实验基础。2020 年,南京理工大学 Luo 等人首次在 Pr:YLF 激光腔中获得 604 nm 高阶涡旋光束,如图 8 所示。通过在 V 型腔中进行可控 Gouy 相移引入和离轴晶体旋转技术产生高阶 HG 模,实现 3 阶拓扑荷的涡旋激光,并通过阈值调控实现 604、607 nm 波长可选择涡旋光输出<sup>[69]</sup>。厦门大学研究团队在蓝光 LD 直接泵浦 Pr:YLF 的全固态激光器中,通过旋转输出镜的方式,成功获得中心波长 639.5 nm 的厄米高斯光束和拉盖尔高斯光束。当输出镜透过率为 3.2% 时,一阶涡旋光输出功率达 320 mW<sup>[70]</sup>。次年,该团队在 607、604 nm 处实现单波长涡旋激光输出,其最大

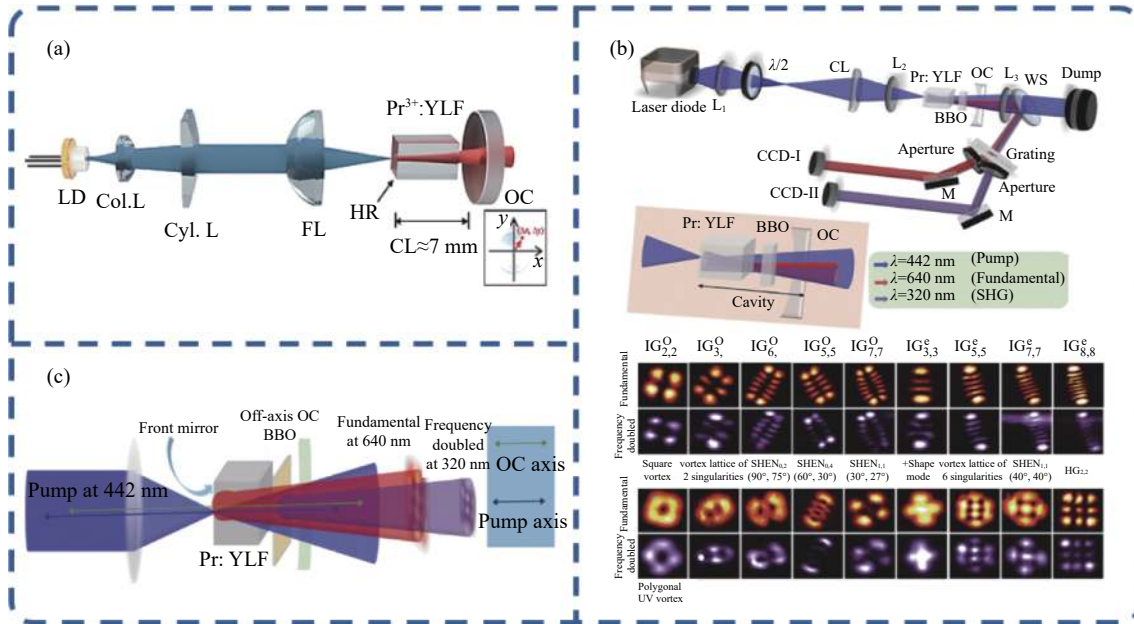


图 7 离轴泵浦技术产生的可见涡旋光激光装置。(a) 离轴泵浦结构的手性可控涡旋光激光器<sup>[61]</sup>; (b) 离轴泵浦结构的腔内变频 Pr:YLF 激光器装置及基频和紫外高阶结构光场<sup>[61]</sup>; (c) 离轴变频 Pr:YLF 涡旋晶格激光器<sup>[63]</sup>

Fig.7 Visible vortex laser generation based on off-axis pumping technology. (a) Chiral controllable vortex laser with off-axis pumping structure<sup>[61]</sup>; (b) Intracavity frequency doubling Pr:YLF laser and ultraviolet high order structured light field based on off-axis pumping structure<sup>[61]</sup>; (c) Off-axis frequency doubling Pr:YLF vortex lattice laser<sup>[63]</sup>

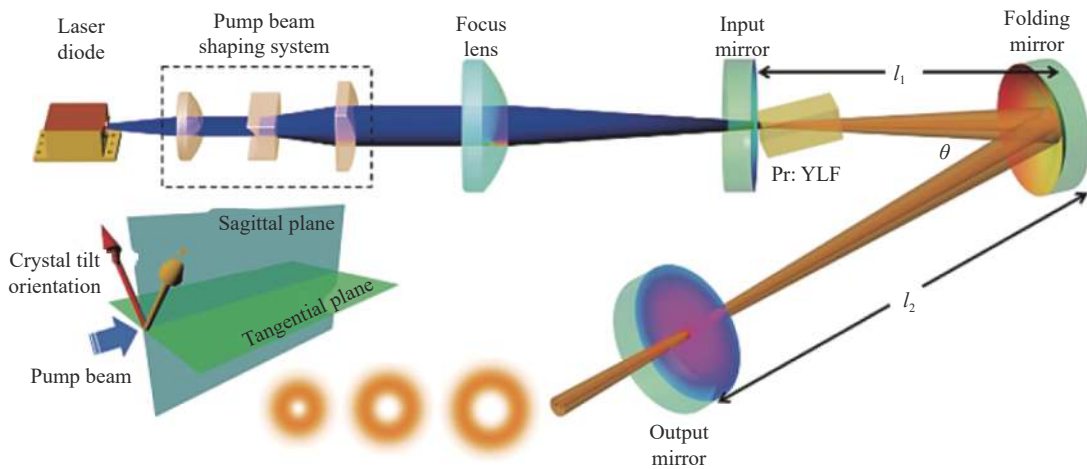


图 8 基于晶体旋转离轴泵浦技术的 604、607 nm 波长可调谐涡旋激光器<sup>[69]</sup>

Fig.8 Wavelength-tunable vortex laser at 604 nm and 607 nm based on off-axis pumping technology of crystal rotation<sup>[69]</sup>

输出功率分别为 2.78 W 和 0.71 W, 斜率效率分别为 40.3% 和 27.8%。此外, 还获得了 604、607 nm 的正交偏振双波长涡旋激光输出, 最大功率为 1.91 W<sup>[71]</sup>。

## 2.2 环形光泵浦技术

除此之外, 改变泵浦光光斑形状亦可以实现高阶模式输出。采用中空反射镜<sup>[72]</sup>、特制光纤<sup>[73]</sup>、衍射光学器件<sup>[74]</sup>、环形空心聚焦透镜<sup>[75]</sup>、锥透镜<sup>[76]</sup>以及将泵

浦光聚焦进多模光纤<sup>[77]</sup>等方法, 可将泵浦光转换为环形光束, 以实现涡旋激光产生。

采用环形光斑分布的二极管泵浦的 Pr<sup>3+</sup>:YLF 激光器可以轻松实现可见涡旋光束输出, 如图 9 所示, 基于此激光装置已实现中心波长为 523 nm、607 nm、639 nm 和 721 nm 的涡旋光输出。此外, 通过在激光腔中插入 Co:MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 晶体作为可饱和吸收体, 结



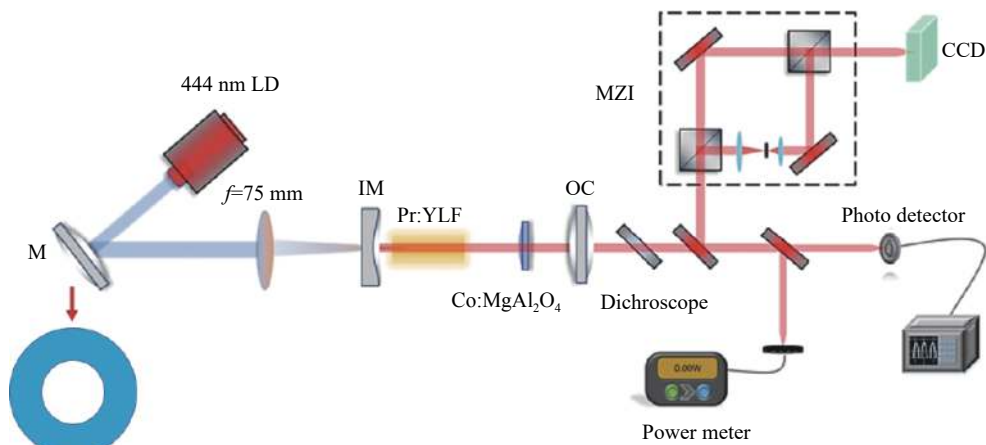


图 9 基于环形泵浦技术产生调 Q 涡旋激光装置<sup>[78]</sup>

Fig.9 Q-switched vortex laser device based on annular pumping technology<sup>[78]</sup>

合环形泵浦技术,已实现橘红色被动调 Q 涡旋激光输出<sup>[78]</sup>。

综上,基于环形泵浦的固体涡旋激光器具有结构紧凑、损伤阈值高等优点,无需在腔内插入额外的光学元件和特制的点缺陷镜,有利于输出高光束质量涡旋光束。然而,想要获得其他阶次涡旋光输出,则需要进一步改变泵浦光的形状等,其灵活性较差。此外,环形泵浦技术多通过中间缺陷反射镜来实现环状泵浦光斑整形,必然牺牲部分泵浦光,因此不利于激光器整体光光转换效率的提高。

### 2.3 腔内球差技术

在谐振腔内使用具有较大球差的平凸透镜可以改变激光强度分布和模式体积,使得不同阶数模式的光路在空间上发生分离,以进行模式选择,如图 10 所示。通过调整透镜在谐振腔内的位置,可以实现不同腔模的振荡,输出高阶拉盖尔-高斯模式<sup>[79]</sup>。

2022 年,日本千叶大学 Omatsu 等首次在 Pr<sup>3+</sup>:YLF

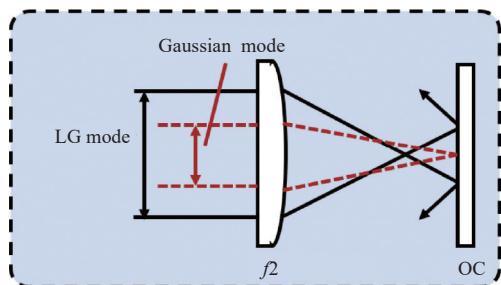


图 10 增强球差选择模式的原理示意图

Fig.10 Schematic diagram of enhanced spherical aberration selection mode

激光腔内利用平凸透镜产生圆形几何模,如图 11(a)所示,使得具有正负拓扑荷±1 的高阶拉盖尔-高斯 (LG) 模式选择性振荡,实现 640 nm 的环形几何模输出<sup>[80]</sup>。然而,通过调整腔内损耗来实现涡旋光的方法导致谐振腔损耗较大,难以产生大拓扑荷 OAM 光束和高功率输出。2023 年,该团队进一步利用激光分束镜分离不同波长,如图 11(b)所示,成功实现 607、640 nm 高阶 LG 模式的选择性输出<sup>[81]</sup>,这项工作也为未来实现其他波长可见涡旋光输出提供了一定参考价值。

通常情况下,在具有腔内球差的激光腔内,一般无法有效区分同时起振左旋和右旋的拉盖尔-高斯模式,因此由相反旋向的高阶拉盖尔-高斯模式叠加后,激光器输出的涡旋光光斑一般呈瓣状分布。由于在激光腔中插入透镜的方法较难实现输出拥有螺旋形相位分布的稳定拉盖尔-高斯模式,所以这种激光器在涡旋光束的应用上也会受到很大的限制。

综上,在基于分立元器件的全固态可见涡旋光产生技术方面,目前主要通过直接泵浦可见光晶体并设计特殊谐振腔结构以实现腔内涡旋激光直接输出。主要采用的方法包括离轴泵浦法、环形泵浦法、球差法等,未来有望通过腔镜刻蚀点缺陷的方法实现可见涡旋光的输出。腔内直接输出涡旋激光凭借着高功率、高光束质量和高稳定性等优势,成为当前涡旋光产生研究的重点关注方向。然而,可见光波段小的受激发射截面和低增益仍然是可见光波段激光晶体和激光器所面临的重要挑战,在涡旋光输出方面,仍存在输出涡旋光束阶次低和效率低等问题。

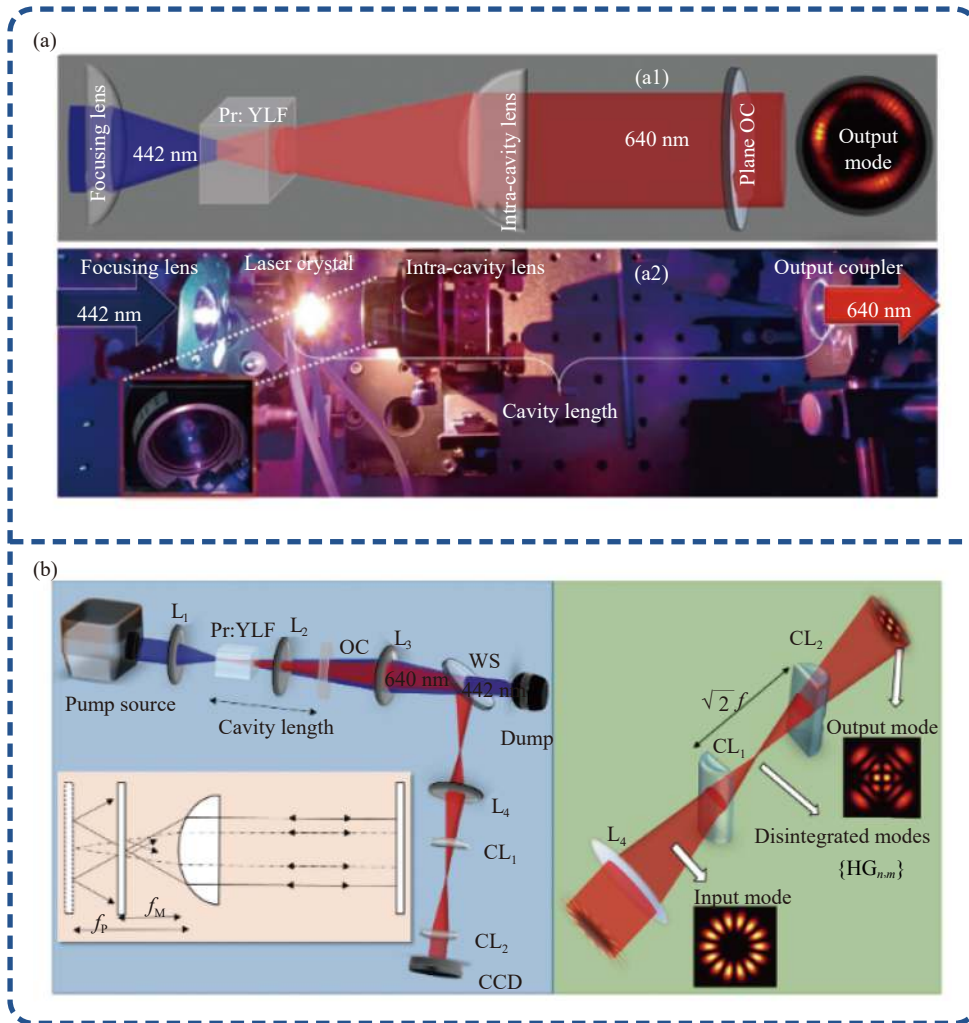


图 11 基于球差选模的涡旋激光光源装置。(a) 640 nm 可见涡旋激光器<sup>[80]</sup>；(b) 波长可切换 607 nm 和 640 nm 涡旋激光器<sup>[81]</sup>

Fig.11 Vortex laser device based on spherical aberration mode selective. (a) 640 nm visible vortex laser<sup>[80]</sup>; (b) 607 & 640 nm wavelength-switchable vortex laser<sup>[81]</sup>

### 3 基于光纤介质的 LD 直接泵浦可见光全固态涡旋激光产生技术

针对基于光纤介质的可见涡旋光腔内产生技术，主要研究工作集中于可见光波段脉冲涡旋光纤激光产生技术，国内研究单位主要包括厦门大学、清华大学、北京理工大学、上海大学、天津大学等。如图 12 所示，主要采用纤芯偏移（错位熔接）<sup>[82]</sup>、引入长周期光纤光栅<sup>[83]</sup>、手性光纤光栅<sup>[84]</sup>、或模式选择耦合器<sup>[85]</sup>等涡旋光产生手段结合传统可见光锁模来实现，或采用离轴泵浦结合新型可见光波段可饱和吸收体实现。

2019 年，厦门大学蔡志平教授课题组首次报道圆柱形矢量或涡旋光束的全光纤可见光激光直接振荡<sup>[86]</sup>和基于光纤错位熔接技术所实现的可见光波段全光

纤纳秒涡旋激光输出<sup>[82]</sup>，如图 13 所示，不过光纤错位熔接技术在一定程度上会降低模式转换和激光腔振荡效率。2020 年，上海大学曾祥龙教授团队采用全光纤模式选择耦合器产生了涡旋可见光<sup>[83]</sup>。

此外，特定的模式转换器也可用于光纤激光腔内以产生可见涡旋光。2021 年，厦门大学罗正钱教授团队采用 Pr/Yb 共掺 ZBLAN 增益光纤，基于 Sagnac 环光纤滤波器和高效长周期光纤光栅实现可见波长的涡旋光输出<sup>[83]</sup>，并基于 9 字型腔结合模式选择器，首次实现 634 nm 皮秒涡旋光输出<sup>[87]</sup>，如图 14 所示。

此外，将腔镜直接设计为特殊的模式转换器，可以将腔内基模直接转换为高阶模。2023 年，William 等提出一种基于 Pr:WPGF 单晶光纤的超紧凑涡旋被动锁模激光器，如图 15 所示，该激光器使用标准显

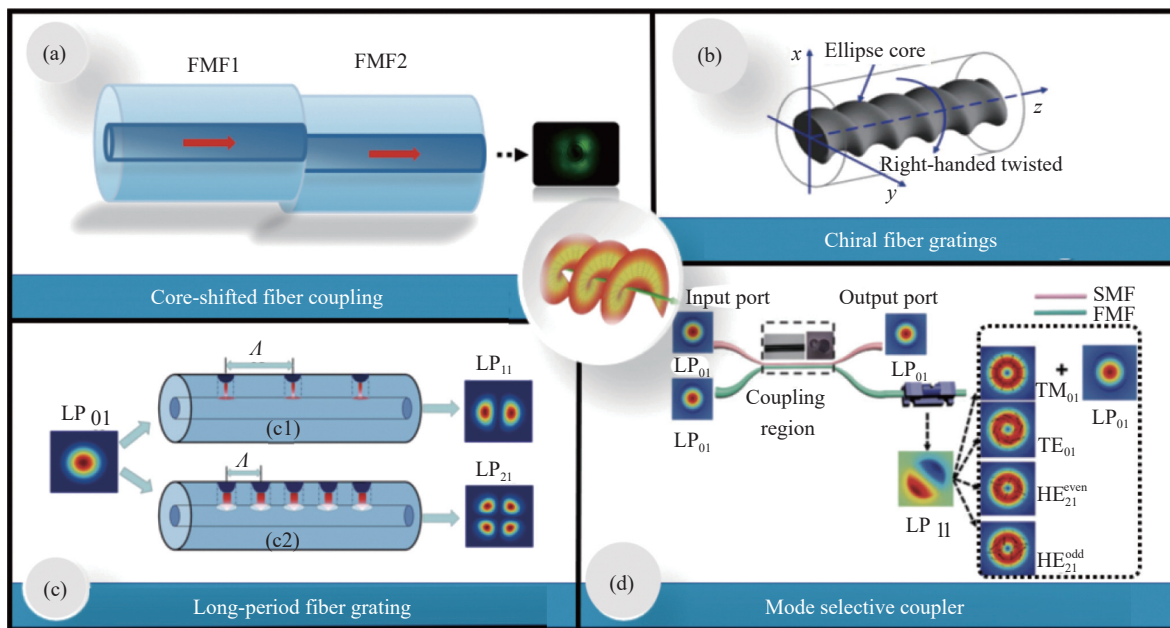


图 12 光纤激光中涡旋光产生方法示意图

Fig.12 Schematic diagram of vortex generation method in fiber laser

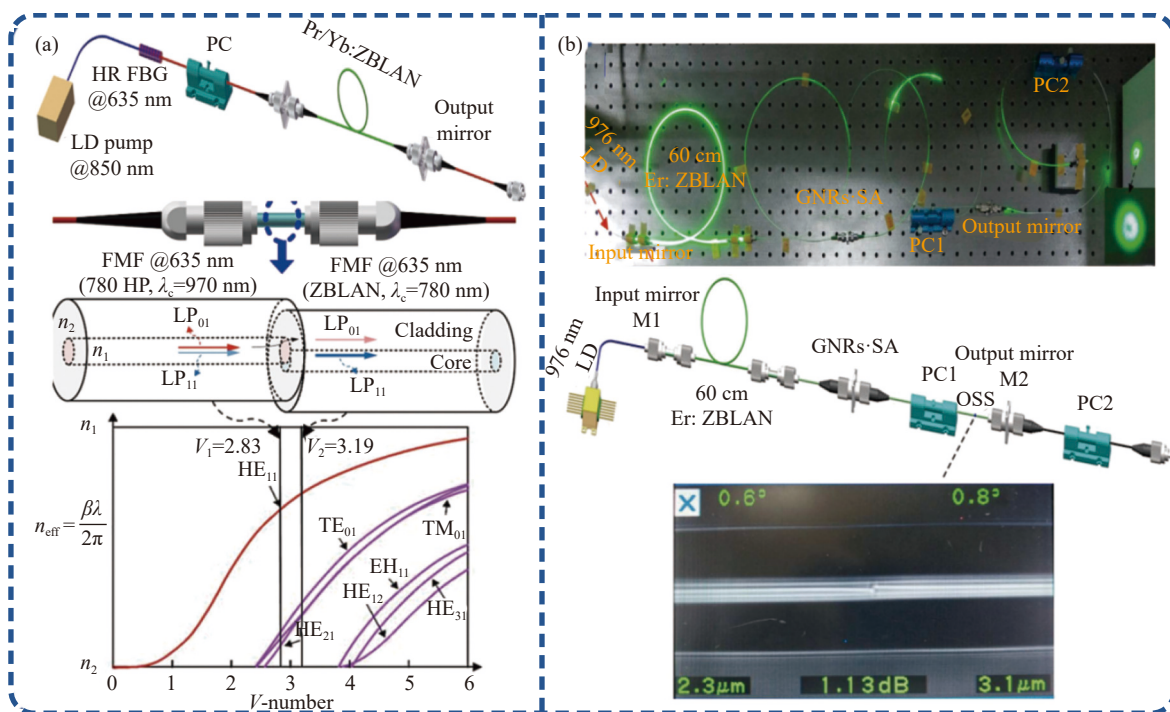


图 13 基于光纤错位熔接技术的光纤涡旋激光器。(a) 可见光波长全光纤激光器及纤芯位移光纤耦合原理图<sup>[86]</sup>；(b) 红-绿脉冲涡旋光纤激光器<sup>[82]</sup>

Fig.13 Fiber vortex laser based on the core-shifted fiber coupling method. (a) Schematic of the visible all-fiber laser and the principle of core-shifted fiber coupling method<sup>[86]</sup>; (b) Red-green pulse vortex fiber laser<sup>[82]</sup>

显微镜载玻片作为干涉输出耦合器，将内部高斯模式转换为涡旋输出，从而产生高质量一阶涡旋模式。该涡

旋光纤激光器同时发射橙色 (610 nm) 和红色 (637 nm) 波长，通过平移内腔透镜可以选择发射波长，实现

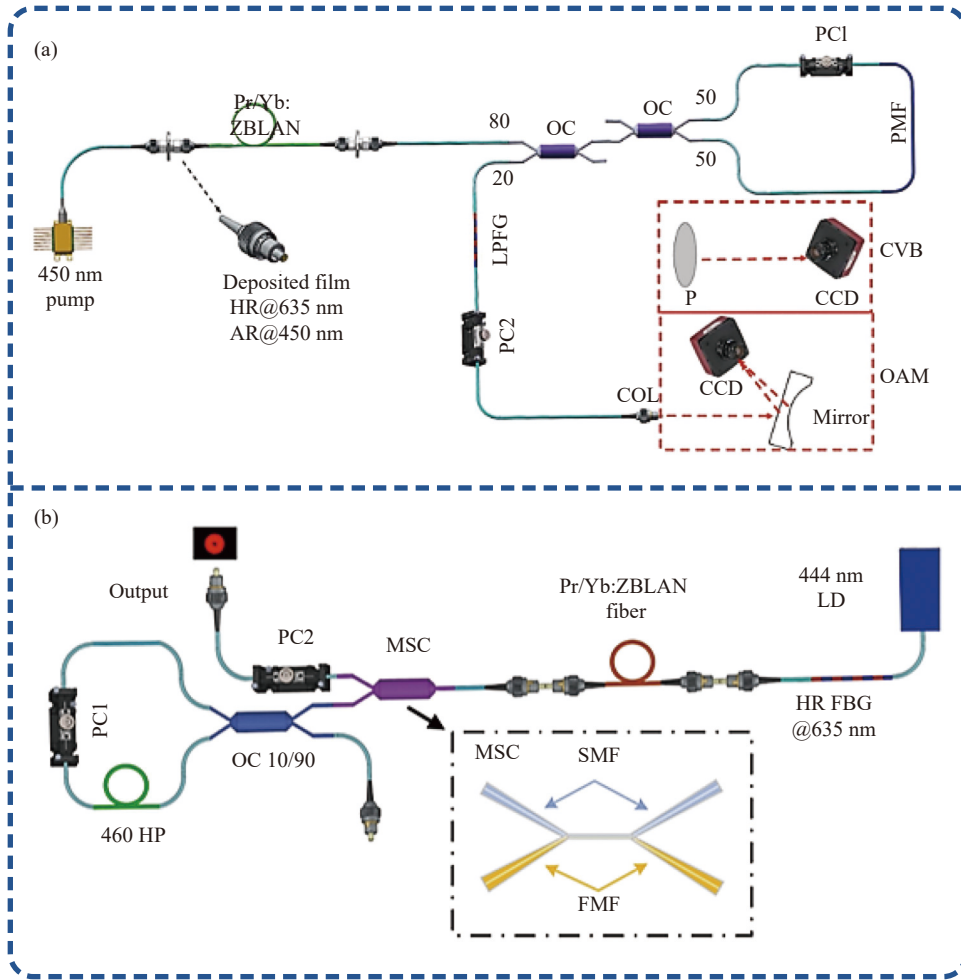


图 14 基于特殊设计的模式选择器的涡旋光纤激光器。(a) 波长可调可见涡旋光纤激光器<sup>[83]</sup>; (b) 634.4 nm 全光纤被动锁模涡旋激光器<sup>[87]</sup>

Fig.14 Vortex fiber lasers based on specially designed mode selectors. (a) Wavelength tunable visible vortex fiber laser<sup>[83]</sup>; (b) All-fiber passive mode-locked vortex laser at 634.4 nm<sup>[87]</sup>

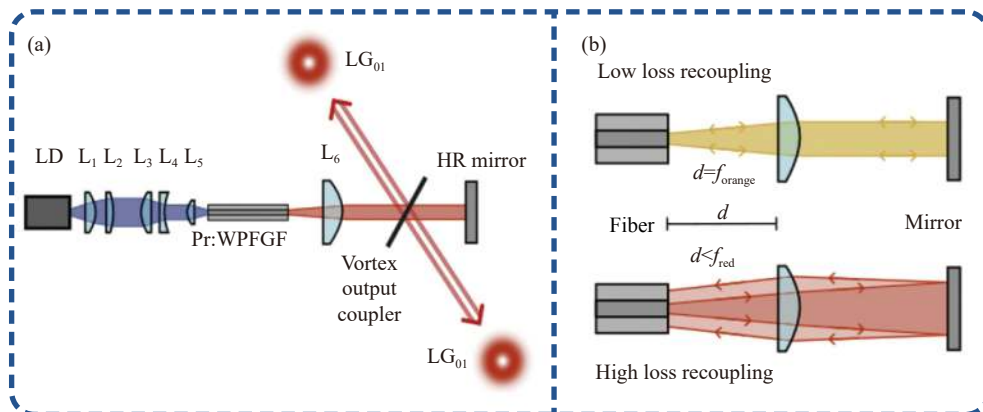


图 15 基于 Pr:WPF GF 单晶光纤的超紧凑涡旋激光器。(a) 激光器装置图; (b) 波长选择法示意图<sup>[88]</sup>

Fig.15 Ultra-compact vortex laser based on Pr:WPF GF single crystal fiber. (a) Schematic of laser experimental setup; (b) Schematic diagram of wavelength selection method<sup>[88]</sup>

均等功率双波长发射<sup>[88]</sup>。值得关注的是,该团队首次发现 Pr:WPF GF 单晶光纤可激射跨越橙色 (606~

615 nm)、红色 (635~640 nm) 和红外 (695~700 nm) 区域的多种波长激光,这为在不同激光腔内绿色 (530 nm)

和青色 (485 nm) 区域介质膜实现可调谐激射提供了可能性。

综上,基于光纤介质的可见光波段涡旋光产生技术主要通过基于少模光纤的纤芯位移耦合结构或设计特定的模式选择器,实现可见光波段涡旋光腔内输出。相较于全固态激光器,光纤涡旋激光器具有结构紧凑、锁模稳定等优势,适应性广泛,能够满足集成和便携应用的需求。然而,光纤涡旋激光器仍需克服光纤模式串扰和输出功率较低的挑战。未来的研究将继续探索新的光纤设计和优化技术,以提高可见光波段光纤涡旋激光器的性能和稳定性,进一步推动其在各个领域的应用。

#### 4 总结与展望

随着大数据时代下水下通信、激光高分辨成像等领域对可见光波段涡旋激光提出的高应用需求,开展可见光波段涡旋光腔内产生技术的研究具有重要意义。文中从基于非线性频率变换技术的可见光涡旋激光、基于分立元器件的可见光全固态涡旋激光、基于光纤介质的可见光全固态涡旋激光三种技术途径综述了可见光波段涡旋激光研究进展。总的来说,通过非线性频率变换产生可见光波段的涡旋光技术更为成熟,其输出功率指标和拓扑荷数更高,腔外通过螺旋相位板和模式转换器等调制元件产生涡旋光也更加简单可控,但是激光器整体结构较为复杂,总体转换效率较低。目前,随着高亮度蓝光 LD 和可见光波段激光增益介质的快速发展,基于分立元器件的固体和和光纤可见光全固态涡旋光产生技术也逐渐发展为新型激光技术,并在连续波、被动调  $Q$  和被动锁模等运转方式上均取得了显著的进步。然而,相比于成熟的近红外波段涡旋光而言,通过 LD 直接泵浦的固体/光纤的可见光全固态涡旋激光仍然有一些问题亟待解决,例如在更高输出功率、更高单脉冲能量、更短脉冲宽度、更高拓扑荷数、更宽波长调谐范围等方面仍有很多的工作要做。

当前,基于蓝光 LD 直接泵浦的可见光波段全固态连续涡旋激光最高功率水平仍在 1 W 以下;通过离轴泵浦技术所获得的可见光波段涡旋激光阶次最高为三阶,且涡旋光阶次仍不可控;点缺陷技术目前仍

未在可见光波段获得应用;针对大能量调  $Q$  可见光涡旋激光而言,有必要深入研究可饱和吸收体的性能,以获得更短的脉冲和更高的单脉冲能量;同时针对超快涡旋可见激光而言,需进一步挖掘新型锁模机制和高调制深度锁模元件,探索纵模锁定的同时,研究空间域上高阶横模激发与横模竞争及复用机制,从而为飞秒超快涡旋可见激光光源研制提供新的思路;在可见光波长拓展方面,蓝光 LD 直接泵浦的可见光全固态激光其中心波长主要集中于红光、橙光、青光、绿光等分立激光波长,且未完全实现上述波段的涡旋激射,因此可进一步挖掘新的高增益宽带可见光激光材料或结合拉曼变换等非线性过程以实现全波段可见光的宽调谐运转。

总而言之,为了提升可见光波段涡旋激光的输出性能,未来仍需从半导体激光泵浦源、激光谐振腔调控、激光增益介质、可饱和吸收体、涡旋光调控技术等多方面进行优化、改进和提高,从而支撑可见光波段激光高分辨成像、可见光通信等应用,甚至有望开拓出前所未有的新应用。

#### 参考文献:

- [1] 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): 90.
- [2] 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.
- [3] Fickler R, Campbell G, Buchler B, et al. Quantum entanglement of angular momentum states with quantum numbers up to 10, 010 [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(48): 13642-13647.
- [4] Fickler R, Lapkiewicz R, Plick W N, et al. Quantum entanglement of high angular momenta [J]. *Science*, 2012, 338(6107): 640-643.
- [5] Emile O, Emile J. Naked eye picometer resolution in a Michelson interferometer using conjugated twisted beams [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(2): 354-357.
- [6] Omatsu T, Miyamoto K, Toyoda K, et al. A new twist for materials science: the formation of chiral structures using the

- angular momentum of light [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(14): 1801672.
- [7] Omatsu T, Miyamoto K, Yuyama K I, et al. Laser-induced forward-transfer with light possessing orbital angular momentum [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 2022, 52: 100535.
- [8] Leach J, Jack B, Romero J, et al. Quantum correlations in optical angle-orbital angular momentum variables [J]. *Science*, 2010, 329(5992): 662-665.
- [9] Wang B, Shi J, Zhang T, et al. Improved lateral resolution with an annular vortex depletion beam in STED microscopy [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(23): 4885-4888.
- [10] 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: 33306.
- [11] Kotlyar V V, Khonina S N, Almazov A A, et al. Elliptic Laguerre-Gaussian beams [J]. *Journal of the Optical Society of America, A. Optics, Image Science, and Vision*, 2006, 23(1): 43-56.
- [12] Mcgloin D, Dholakia K. Bessel beams: Diffraction in a new light [J]. *Contemporary Physics*, 2005, 46(1): 15-28.
- [13] Smith P W. Mode selection in lasers [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1972, 60(4): 422-440.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Yang Y, Wang W, Moitra P, et al. Dielectric meta-reflectarray for broadband linear polarization conversion and optical vortex generation [J]. *Nano Letters*, 2014, 14(3): 1394-1399.
- [17] Malyutin A A, Ilyukhin V A. Generation of high-order Hermite-Gaussian modes in a flashlamp-pumped neodymium phosphate glass laser and their conversion to Laguerre-Gaussian modes [J]. *Quantum Electronics*, 2007, 37(2): 181.
- [18] Chen Y, Fang Z X, Ren Y X, et al. Generation and characterization of a perfect vortex beam with a large topological charge through a digital micromirror device [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(27): 8030-8035.
- [19] Beijersbergen M W, Allen L, Van der Veen H, et al. Astigmatic laser mode converters and transfer of orbital angular momentum [J]. *Optics Communications*, 1993, 96(1-3): 123-132.
- [20] Gu Miaojun, Zeng Jun, Li Jinhong. Generation and Interference of vortex beam based on spiral phase plate [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(9): 092602.
- [21] Xin J, Dai K, Zhong L, et al. Generation of optical vortices by using spiral phase plates made of polarization dependent devices [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(7): 1984-1987.
- [22] Yan Y, Zhang L, Wang J, et al. Fiber structure to convert a Gaussian beam to higher-order optical orbital angular momentum modes [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(16): 3294-3296.
- [23] Karimi E, Schulz S A, De Leon I, et al. Generating optical orbital angular momentum at visible wavelengths using a plasmonic metasurface [J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(5): e167.
- [24] Qiao Z, Xie G, Wu Y, et al. Generating high - charge optical vortices directly from laser up to 288 th order [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2018, 12(8): 1800019.
- [25] Naidoo D, Roux F S, Dudley A, et al. Controlled generation of higher-order Poincaré sphere beams from a laser [J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(5): 327-332.
- [26] Kim J W, Clarkson W A. Selective generation of Laguerre-Gaussian ( $LG_{0n}$ ) mode output in a diode-laser pumped Nd:YAG laser [J]. *Optics Communications*, 2013, 296: 109-112.
- [27] Wang S, Zhang S L, Qiao H, et al. Direct generation of vortex beams from a double-end polarized pumped Yb: KYW laser [J]. *Optics Express*, 2018, 26(21): 26925-26932.
- [28] Huang X, Xu B, Cui S, et al. Direct generation of vortex laser by rotating induced off-axis pumping [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(5): 1-6.
- [29] Yuan Y, Tong L, Cai F, et al. Direct generation of optical vortex arrays by rotating in an all-solid-state Yb: CALGO laser [J]. *Optical Materials Express*, 2021, 11(6): 1594-1602.
- [30] Kim D J, Kim J W. Direct generation of an optical vortex beam in a single-frequency Nd:YVO<sub>4</sub> laser [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(3): 399-402.
- [31] Chen Y F, Lan Y P, Wang S C. Generation of Laguerre-Gaussian modes in fiber-coupled laser diode end-pumped lasers

- [J]. *Applied Physics B*, 2001, 72: 167-170.
- [32] Wang M, Ma Y, Sheng Q, et al. Laguerre-Gaussian beam generation via enhanced intracavity spherical aberration [J]. *Optics Express*, 2021, 29(17): 27783-27790.
- [33] Sheng Q, Wang A, Ma Y, et al. Intracavity spherical aberration for selective generation of single-transverse-mode Laguerre-Gaussian output with order up to 95 [J]. *Photonix*, 2022, 3(1): 4.
- [34] Qiao Z, Wan Z, Xie G, et al. Multi-vortex laser enabling spatial and temporal encoding [J]. *Photonix*, 2020, 1(1): 1-14.
- [35] Zhou Lunbin, Feng Kai, Wang Dong, et al. Research on direct generation of high-power and high-order vortex lasers using defect-mirror technology (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(9): 20210408. (in Chinese)
- [36] Ito A, Kozawa Y, Sato S. Generation of hollow scalar and vector beams using a spot-defect mirror [J]. *Journal of the Optical Society of America, A. Optics, Image Science, and Vision*, 2010, 27(9): 2072-2077.
- [37] Chard S P, Shardlow P C, Damzen M J. High-power non-astigmatic TEM<sub>00</sub> and vortex mode generation in a compact bounce laser design [J]. *Applied Physics B*, 2009, 97(2): 275-280.
- [38] Lee A J, Zhang C Y, Omatsu T, et al. An intracavity, frequency-doubled self-Raman vortex laser [J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 5400-5409.
- [39] Lee A J, Pask H M, Omatsu T. A continuous-wave vortex Raman laser with sum frequency generation [J]. *Applied Physics B*, 2016, 122(3): 1-7.
- [40] Tung J C, Ma Y Y, Miyamoto K, et al. Bottle beam generation from a frequency-doubled Nd:YVO<sub>4</sub> laser [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 1-6.
- [41] Matsumoto N, Ando T, Inoue T, et al. Generation of high-quality higher-order Laguerre-Gaussian beams using liquid-crystal-on-silicon spatial light modulators [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2008, 25(7): 1642-1651.
- [42] 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.
- [43] Chaitanya N A, Aadhi A, Jabir M V, et al. Frequency-doubling characteristics of high-power, ultrafast vortex beams [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(11): 2614-2617.
- [44] Hui X, Zheng S, Hu Y, et al. Ultralow reflectivity spiral phase plate for generation of millimeter-wave OAM beam [J]. *IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters*, 2015, 14: 966-969.
- [45] Chaitanya 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.
- [46] Sasaki Y, Yusufu T, Miyamoto K, et al. Highly efficient frequency doubling of optical vortex[C]//Conference on Lasers & Electro-optics Pacific Rim, 2015: 15717830.
- [47] Yusufu T, Sasaki Y, Araki S, et al. Beam propagation of efficient frequency-doubled optical vortices [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(19): 5263-5266.
- [48] Chaitanya N A, Kumar S C, Devi K, et al. Ultrafast optical vortex beam generation in the ultraviolet [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(12): 2715-2718.
- [49] Yoshihiro Nishigata, Cheng-Yeh Lee, Yuji Miyamoto, et al. Optical vortex pumped solid-state Raman laser[C]//Solid State Lasers XXVI: Technology and Devices, SPIE, 2017, 10082: 13-16.
- [50] Saripalli R K, Ghosh A, Chaitanya N A, et al. Frequency-conversion of vector vortex beams with space-variant polarization in single-pass geometry [J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 115(5): 051101.
- [51] Schemmel P, Pisano G, Maffei B. Modular spiral phase plate design for orbital angular momentum generation at millimeter wavelengths [J]. *Optics Express*, 2014, 22(12): 14712-14726.
- [52] Gao Mingwei, Gao Chunqing, Lin Zhifeng. Generation of twisted stigmatic beam and transfer of orbital angular momentum during the beam transformation [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(4): 2184-2190.
- [53] Shen Y, Meng Y, Fu X, et al. Wavelength-tunable Hermite-Gaussian modes and an orbital-angular-momentum-tunable vortex beam in a dual-off-axis pumped Yb:CALGO laser [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(2): 291-294.
- [54] Zhao Y, Wang Z, Yu H, et al. Direct generation of optical vortex pulses [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(3): 031113.
- [55] Tung J C, Liu K W, Chen S C. Generating multiple optical vortices in orange beams induced by selectively pumped frequency-doubled solid-state Raman lasers with mode conversion [J]. *Optics Letters*, 2022, 47(4): 945-948.
- [56] Pan J, Shen Y, Wan Z, et al. Index-tunable structured-light beams from a laser with an intracavity astigmatic mode

- converter [J]. *Physical Review Applied*, 2020, 14(4): 44048.
- [57] Kränkel C, Marzahn D T, Moglia F, et al. Out of the blue: semiconductor laser pumped visible rare - earth doped lasers [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2016, 10(4): 548-568.
- [58] Ma Y, Tung J C, Chen Y F, et al. Handedness control of visible optical vortex output from a diode-pumped Pr<sup>3+</sup>:YLF Laser[C]// European Quantum Electronics Conference. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2019: 19148864.
- [59] Ma Y, Tung J C, Miyamoto K, et al. Direct generation of vortex beams from a diode-pumped Pr<sup>3+</sup>:YLF laser [C]//CLEO: Applications and Technology, 2019: 18846954.
- [60] Ma Y, Vallés A, Tung J C, et al. Direct generation of red and orange optical vortex beams from an off-axis diode-pumped Pr<sup>3+</sup>: YLF laser [J]. *Optics Express*, 2019, 27(13): 18190-18200.
- [61] Rao A S, Miyamoto K, Omatsu T. Ultraviolet intracavity frequency-doubled Pr<sup>3+</sup>: LiYF<sub>4</sub> orbital Poincaré laser [J]. *Optics Express*, 2020, 28(25): 37397-37405.
- [62] Rao A S, Miike T, Miyamoto K, et al. Direct generation of 523 nm orbital Poincaré mode from a diode-pumped Pr<sup>3+</sup>: LiYF<sub>4</sub> laser with an off-axis optical needle pumping geometry [J]. *Optics Express*, 2021, 29(19): 30409-30418.
- [63] Rao A S, Miyamoto K, Omatsu T. Direct generation of vortex lattice modes from an intracavity frequency doubled Pr:YLF laser[C]//2021 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2021: 21411084.
- [64] Lin X, Chen M, Feng Q, et al. LD-pumped high-power CW Pr<sup>3+</sup>:YLF Laguerre-Gaussian lasers at 639 nm [J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 142: 107273.
- [65] Lin X, Feng Q, Zhu Y, et al. Diode-pumped wavelength-switchable visible Pr<sup>3+</sup>:YLF laser and vortex laser around 670 nm [J]. *Opto-Electronic Advances*, 2021, 4(4): 210006.
- [66] Tian Q Y, Xu B, Li N, et al. Direct generation of orthogonally polarized dual-wavelength continuous-wave and passively Q-switched vortex beam in diode-pumped Pr:YLF lasers [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(22): 5586-5589.
- [67] Li N, Huang J J, Xu B, et al. Direct generation of an ultrafast vortex beam in a CVD-graphene-based passively mode-locked Pr:LiYF<sub>4</sub> visible laser [J]. *Photonics Research*, 2019, 7(11): 1209-1213.
- [68] Li N, Xu B, Cui S W, et al. High-order vortex generation from CW and passively Q-switched Pr:YLF visible lasers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(17): 1457-1460.
- [69] Luo S, Cai Z, Sheng C, et al. 604-nm high-order vortex beams directly generated from a Pr:YLF laser with a cavity-loss-induced gain switching mechanism [J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 127: 106185.
- [70] Lin X J, Cui S W, Ji S H, et al. LD-pumped high-power high-efficiency orange vortex Pr<sup>3+</sup>:YLF lasers [J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 133: 106571.
- [71] Cui S, Li N, Xu B, et al. Direct generation of visible vortex Hermite-Gaussian modes in a diode-pumped Pr:YLF laser [J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 131: 106389.
- [72] Zhao Y, Liu Q, Zhou W, et al. ~1 mJ pulsed vortex laser at 1645 nm with well-defined helicity [J]. *Optics Express*, 2016, 24(14): 15596.
- [73] Lin D, Daniel J M O, Clarkson W A. Controlling the handedness of directly excited Laguerre-Gaussian modes in a solid-state laser [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(13): 3903-3906.
- [74] Li J, Yao Y, Yu J, et al. Efficient vortex laser with annular pumping formed by circle Damman grating [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 28(4): 473-476.
- [75] He H S, Chen Z, Dong J. Direct generation of vector vortex beams with switchable radial and azimuthal polarizations in a monolithic Nd:YAG microchip laser [J]. *Applied Physics Express*, 2017, 10(5): 052701.
- [76] Wei M D, Lai Y S, Chang K C. Generation of a radially polarized laser beam in a single microchip Nd:YVO<sub>4</sub> laser [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(14): 2443-2445.
- [77] Fang Z, Yao Y, Xia K, et al. Actively Q-switched and vortex Nd:YAG laser [J]. *Optics Communications*, 2015, 347: 59-63.
- [78] Yang Q, Yang Z X, Cai D Y, et al. Direct generation of continuous-wave and passively Q-switched visible vortex beams from a doughnut-shaped diode-pumped Pr:YLF laser [J]. *Optics Express*, 2022, 30(13): 23909-23917.
- [79] Senatsky Y, Bisson J F, Shelobolin A, et al. Circular modes selection in Yb:YAG laser using an intracavity lens with spherical aberration [J]. *Laser Physics*, 2009, 19(5): 911-918.
- [80] Rao A S, Morohashi T, Miike T, et al. Generation of circular geometric modes from Pr<sup>3+</sup>: YLF laser with spherical aberration [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim. US: Optica Publishing Group, 2022: CThP1H\_02.
- [81] Rao A S, Morohashi T, Kerridge-Johns W R, et al. Generation of



- higher-order Laguerre–Gaussian modes from a diode-pumped Pr<sup>3+</sup>:LiYF<sub>4</sub> laser with an intra-cavity spherical aberration [J]. *Journal of the Optical Society of America B-Optical Physics*, 2023, 40(2): 406-411.
- [82] Zou J, Kang Z, Wang R, et al. Green/red pulsed vortex-beam oscillations in all-fiber lasers with visible-resonance gold nanorods [J]. *Nanoscale*, 2019, 11(34): 15991-16000.
- [83] Dong Z, Sun H, Zhang Y, et al. Visible-wavelength-tunable, vortex-beam fiber laser based on a long-period fiber grating [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(21): 1173-1176.
- [84] Xu H, Yang L. Conversion of orbital angular momentum of light in chiral fiber gratings [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(11): 1978-1980.
- [85] Yao H, Shi F, Wu Z, et al. A mode generator and multiplexer at visible wavelength based on all-fiber mode selective coupler [J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(4): 973-981.
- [86] Zou Jinhai, Wang Hongjian, Li Weiwei, et al. Visible-wavelength all-fiber vortex laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(18): 1487-1490.
- [87] Sun Honggang, Zou Jinhai, Ruan Qiuqun, et al. Visible-wavelength all-fiber mode-locked vortex laser [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(1): 191-195.
- [88] Kerridge-Johns W R, Rao A S, Fujimoto Y, et al. Red, orange, and dual wavelength vortex emission from Pr:WPFGF fiber laser using a microscope slide output coupler [J]. *Optics Express*, 2023, 31(10): 16607-16614.

## Research progress of all-solid-state intra-cavity vortex beam generation in visible laser (*invited*)

Qi Yaoyao<sup>1,2,3</sup>, Li Junchen<sup>1,2</sup>, Zhang Yu<sup>1,2</sup>, Yan Dapeng<sup>3</sup>, Chang Feng<sup>3</sup>, Yu Xiufen<sup>3</sup>, Bai Zhenxu<sup>1,2</sup>, Ding Jie<sup>1,2</sup>, Yan Bingzheng<sup>1,2</sup>, Wang Yulei<sup>1,2</sup>, Lv Zhiwei<sup>1,2\*</sup>

(1. Center for Advanced Laser Technology, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

2. Hebei Key Laboratory of Advanced Laser Technology and Equipment, Tianjin 300401, China;

3. Wuhan Raycus Fiber Laser Technologies Co., Ltd, Wuhan 430223, China)

### Abstract:

**Significance** In recent years, visible vortex laser carrying orbital angular momentum (OAM) has been widely used in the fields of astronomy, optical manipulation, microscopic imaging, sensing, quantum science and optical communication. Especially for the underwater communication or the super-resolution imaging, further optimizing the output of vortex beams in the visible range is of great significance in enhancing imaging resolution and communication capacity. This not only holds importance in scientific research but also holds vast potential for wide-ranging applications in real-life scenarios, paving the way for advancements in high-resolution imaging, high-speed communication, and other fields.

**Progress** Visible vortex beams can be generated through both extra-cavity and intracavity conversion methods. This study focuses on the intracavity conversion approach to obtain visible vortex beams. With the development of the vortex lasers operating at 1 μm, nonlinear frequency doubling has become a common technique for generating visible vortex beams. By utilizing techniques such as intracavity thermal lens effect, etched point defects, and design of a hemispherical resonator cavity, combined with frequency doubling method, visible vortex beams can be generated without the need for additional components. Alternatively, an extra-cavity mode converter can be used to generate vortex beams, which is then combined with frequency doubling method to produce visible vortex beams. Compared to nonlinear frequency conversion techniques, direct pumping the visible laser crystals to obtain visible vortex beams in the visible range can improve conversion efficiency. For the LD

pumped  $\text{Pr}^{3+}$  doped all-solid-state laser, visible vortex beams can be generated through intracavity mode conversion techniques such as off-axis pumping, annular light pumping, spherical aberration mode selection. Visible vortex fiber lasers offer advantages of compact structure and high conversion efficiency. They mainly utilize techniques such as fiber core misalignment fusion splicing or specially designed mode selectors to generate visible vortex lasers.

**Conclusions and Prospects** Currently, visible vortex solid-state lasers are mainly achieved by combining near-infrared vortex beams with frequency doubling or by utilizing LD direct pumped  $\text{Pr}^{3+}$ -doped crystals combined with intracavity vortex beam conversion technology. The former approach typically requires the insertion of laser crystals and frequency doubling crystals inside the cavity, leading to a complex system structure and lower optical-to-optical conversion efficiency. In the future, visible vortex solid-state lasers have great potential for development in terms of tunability, multi-wavelength operation, high power, and single longitudinal mode characteristics. Achieving multi-wavelength visible vortex beam output and generating ultra-short pulse vortex beams (such as picosecond and femtosecond vortex beams) are among the directions for further advancement. Furthermore, if visible vortex solid-state lasers can be extended to the realm of spatiotemporal mode locking, it will inject new vitality into the development of vortex beams.

**Key words:** visible light; vortex laser; active method; solid-state laser

**Funding projects:** Natural Science Foundation of Hebei Province (F2022202036); Natural Science Foundation of Tianjin (20JCZDJC00430); Hebei Science & Technology Research Project (BJK2022008)