

文章编号: 1000-7032(2025)08-1468-17

2 μm 固体激光器多维度调控研究进展

宋晓钊^{1,2}, 朱 强^{1,2}, 康 惠^{1,2}, 姚添宸^{1,2}, 马嘉诚¹, 周 伟^{1,2*},
王昊天¹, 王 飞², 王屹山³, 沈德元^{1,2}

(1. 江苏师范大学 物理与电子工程学院, 江苏省先进激光材料与器件重点实验室, 江苏 徐州 221116;

2. 江苏中红外激光应用技术产业研究院, 江苏 徐州 221116;

3. 中国科学院 西安光学精密机械研究所, 超快光科学与技术全国重点实验室, 陕西 西安 710119)

摘要: 激光因在时域、频域、空间和相位等多个维度的物理特性具有重要科学研究和应用价值。尤其是 Tm^{3+} 、 Ho^{3+} 掺杂的2 μm 固体激光具有宽带宽、高增益、模式灵活选择以及波长可被大气分子吸收等特点,在光电对抗、医疗诊断、新波段通信和阿秒光源等领域有着重要的应用前景。本文针对2 μm 波段超快固体激光研究现状,梳理和分析了该波段固体超快激光多维度调控方面的研究历程、理论基础、技术进展和应用现状,并进一步展望了人工智能驱动下的中红外激光多维度调控的发展前景。本文将为中红外新体制超快激光的波长扩展和空间维度扩展等新兴研究提供参照。

关键词: 多维度; 超快激光; 固体激光器; 2 μm ; 横模调控

中图分类号: O436 文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20240348

CSTR: 32170.14.CJL.20240348

Research Progress on Multi-dimensional Manipulation of 2 μm Solid-state Lasers

SONG Xiaozhao^{1,2}, ZHU Qiang^{1,2}, KANG Hui^{1,2}, YAO Tianchen^{1,2}, MA Jiacheng¹, ZHOU Wei^{1,2*},
WANG Haotian¹, WANG Fei², WANG Yishan³, SHEN Deyuan^{1,2}

(1. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Laser Materials and Devices, School of Physics and Electronic Engineering,

Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China;

2. Jiangsu Institute of Middle Infrared Laser Technology, Xuzhou 221116, China;

3. State Key Laboratory of Ultrafast Optical Science and Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

* Corresponding Author, E-mail: zhwucumt@163.com

Abstract: Lasers have important scientific research and application values due to their physical properties in multiple dimensions such as time domain, frequency domain, space, and phase. In particular, Tm^{3+} and Ho^{3+} doped 2 μm solid-state lasers possess new characteristics such as wide bandwidth, high gain, flexible mode selection, and atmospheric molecular absorption, and have important application prospects in fields such as electro-optical countermeasures, medical diagnosis, new-band communication, and attosecond light sources. This paper focuses on the research status of 2 μm band ultrafast solid-state lasers, reviews and analyzes the research history, theoretical basis, technological progress, and application status of multi-dimensional regulation of solid-state ultrafast lasers in this band, and further looks forward to the development prospects of mid-infrared laser multi-dimensional regulation driven by artificial intelligence. This paper will provide a reference for emerging research such as wavelength expansion and spatial dimension expansion of new mid-infrared ultrafast laser systems.

Key words: multidimensional; ultrafast laser; solid state laser; 2 μm ; transverse mode regulation

收稿日期: 2024-12-27; 修订日期: 2025-01-17

基金项目: 江苏省自然科学基金面上项目(BK20231349); 徐州市重点研发计划(KC22461)

Supported by Jiangsu Provincial Natural Science Foundation General Project(BK20231349); Key R&D Plan of Xuzhou City(KC22461)

1 引言

由于激光兼具超快时域特性和丰富的空间特性,可以根据时间、空间、波长、振幅、偏振和相位等多重维度对激光光场进行调控。 Tm^{3+} 、 Ho^{3+} 离子掺杂的2 μm 激光具有波长特殊性,在超快激光动力学和多维度参数调控领域具有重要应用价值,是用于拓展人类认知的前沿基础科学和新型应用研究的重要工具^[1]。结构光束的创建、检测以及

其多个维度的控制将为未来的发展提供一个方向^[2]。对激光的多维度调控从基础研究到实际应用有着众多的优势。在医疗、加工方面,多维度激光有着参数可控、性能稳定和操作简单等优势。在信息处理和通信方面,多维度激光拥有更大容量和更高安全性的特点^[3]。因此,在通信领域,它可能会影响未来互联网的发展^[4]。如图1所示,根据激光携带的不同维度的信息,能催生许多不同的应用场景。

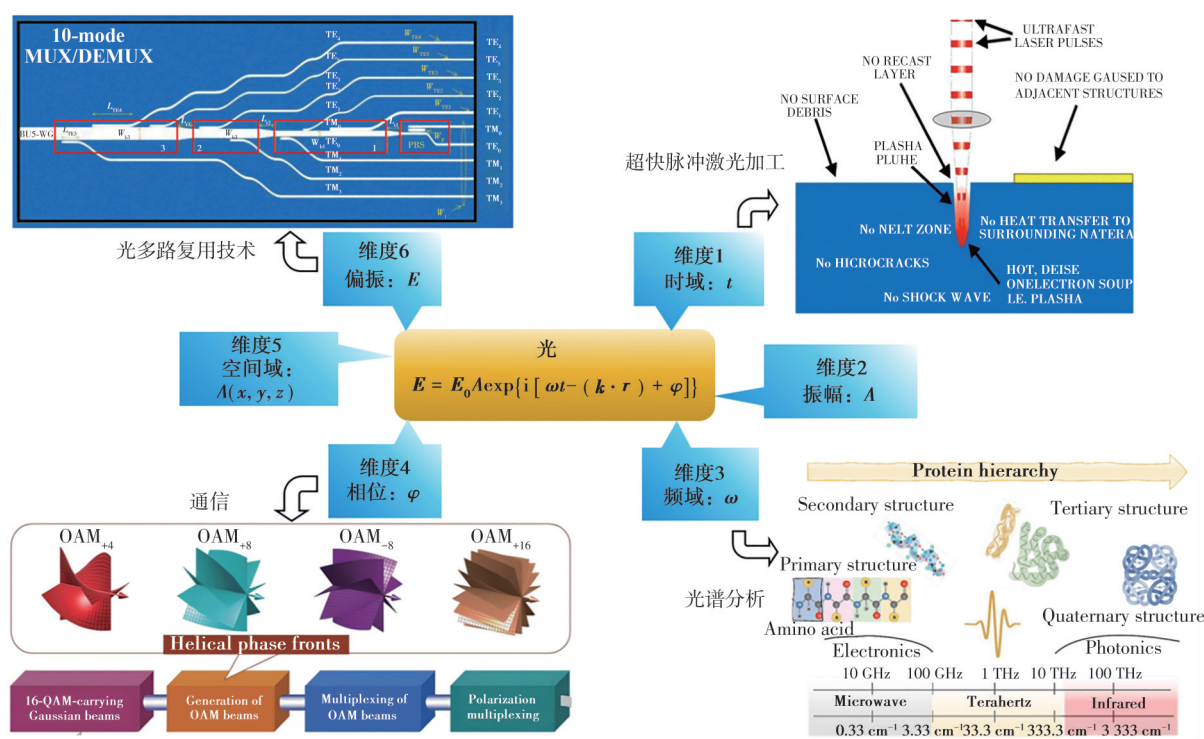


图1 激光已知的众多维度,通过调整组合自由度的分布,可以产生各种不可分离的状态,同时在多种不同方向上有自己的应用^[5-10]

Fig.1 The laser has numerous known degrees of freedom. By adjusting the distribution of the combined degrees of freedom, various inseparable states can be generated, and it has its own applications in multiple different directions^[3,5-10]

在激光技术领域,中红外波段一般指2~5 μm 波段,位于该波段的激光在国防、医疗、通信、材料加工等方面有着特殊的重要应用。2 μm 波段激光一般通过铥(Tm^{3+})、铒(Ho^{3+})或者铥铒共掺的稀土离子掺杂增益介质直接产生,其中掺杂的增益介质包括晶体、陶瓷、玻璃、光纤等^[11]。 Tm^{3+} 属于准三能级系统,在790 nm附近的泵浦光抽运下,可有效抑制1.5 μm 附近的荧光,理论量子泵浦效率为200%。理论上 Tm^{3+} 离子的发射光谱在1700~2100 nm范围内(半高全宽大于200 nm),很好地匹配了大气中水分子在1800~1970 nm波段强烈的吸收峰,1970~2150 nm范围又处于大气传输窗口,这使得在该波段的激光在激光手

术^[12]、聚合物加工^[13]、3D激光打印^[14]、新波段激光通信^[15]、光电对抗^[16],高能产生阿秒脉冲^[17],以及3~5 μm 更长波长中红外激光高效产生等领域具有不可替代的应用价值。

与超快光纤激光器不同,超快固体激光器在空间横模、偏振和相位(非线性相移)的维度具有灵活调控等优势^[18]。比如固体谐振腔同时支持多种高阶横模,易于通过腔型调控实现模式选择。超短脉冲在谐振腔中接近线性传输,易于实现色散和非线性独立调控。其增益介质晶体的空间点群特性也十分有利于偏振态的时空调控。因此,通过同时控制2 μm 固体激光器的纵模、横模、轨道角动量、自旋角动量以及相位的时空分

布等多个维度特性在激光应用方面展现出显著优势。首先,控制光束的横模形态可以调整光束的强度空间分布以及聚焦等特性,提升红外显微镜成像、长周期光栅制造和聚合物激光加工的精度。控制纵模,即控制激光器的光谱形态、脉冲宽度以及重频可以实现超短脉冲激光调控,适用于高时间分辨率要求应用,如超快光谱学、时间分辨成像和非金属材料加工等。特别是对于精密材料和透明材料加工,利用飞秒脉冲的高峰值功率和窄脉宽特性可显著减少加工中的热效应,提升加工精度。与传统连续激光不同,飞秒脉冲的高重频和高峰值功率形成的多光子吸收等非线性效应进一步通过能量沉积、等离子体形成和材料去除等过程,实现高精度、低损伤、高效率的材料加工。

涡旋光束指携带螺旋相位 $\exp(i l \varphi)$ 的光束(其中 φ 是方位角, l 是拓扑荷)。由于该类光束平均每个光子携带 $l\hbar$ 的 OAM, 因此也被称为 OAM 光束。而控制轨道角动量(OAM)属性则可以使激光携带额外的信息维度,增加通信系统的容量。在自由空间激光通信和光纤通信中,通过不同的 OAM 模式可以实现多路复用,大幅提升传输速率和带宽。精确控制光束的多个维度还能通过精确调控光场相位的空间分布(如平移对称性和旋转对称性等),应用于光镊技术中,对微纳米粒子进行捕获和操控^[18]。特别是 Tm^{3+} 、 Ho^{3+} 掺杂的 $2\text{ }\mu\text{m}$ 激光,其发射波长从 $1.7\text{ }\mu\text{m}$ 到 $2.1\text{ }\mu\text{m}$, 达 400 nm 的宽度。同时覆盖了 $1\text{ }760\sim 1\text{ }970\text{ nm}$ 的水分子吸收波段和 $2\text{ }000\sim 2\text{ }150\text{ nm}$ 的大气通信窗口,精准匹配激光医疗、大气监测、空间激光通信和红外光电对抗等应用。综上所述,控制激光的纵模、横模和轨道角动量等多个激光维度可以极大地提升激光系统的性能和应用范围,为前沿科学研究、光通信、先进制造和激光医疗等领域带来新的机遇和突破。

本文主要介绍近年来国内外 $2\text{ }\mu\text{m}$ 波段固体激光器多维度协同调控的研究现状,聚焦于激光的横纵模等不同维度特性的调控。

2 $2\text{ }\mu\text{m}$ 固体激光的多维度调控研究现状

近年来,中红外超快激光源在分子光谱学、中红外超连续光谱产生、中红外频率梳、材料加工、

激光外科、生物诊断学等领域有着广泛的应用前景,引起了人们的广泛关注^[19-21]。与此同时,越来越多的人开始关注光束的多维调控,因此本文梳理了近年来在红外波段的多种结构光束在多维控制方面的成果。如图 2 所示^[22-43]。

激光的不同维度可以携带不同的信息,为了更好地体现光束维度的多样性,考虑到空间域、时域、频域以及对光束相位和偏振态的控制,对其中的空间域横模控制、时域脉冲控制、频域光谱特性控制、涡旋相位控制,以及偏振控制进行了统计,确定了其控制的维度数,并以发表时间和发射波长作为坐标轴以判断其趋势,如图 2(a) 所示。此外,由于同一维度能够具有多个不同自由度,因此本文还统计了如图 2(b) 所示的相关文献调控的多个维度中所能够控制的自由度个数。从图 2 看出,目前大多数固体多维度激光器研究都还局限于两到三个维度的控制,对光束的时空、相位以及

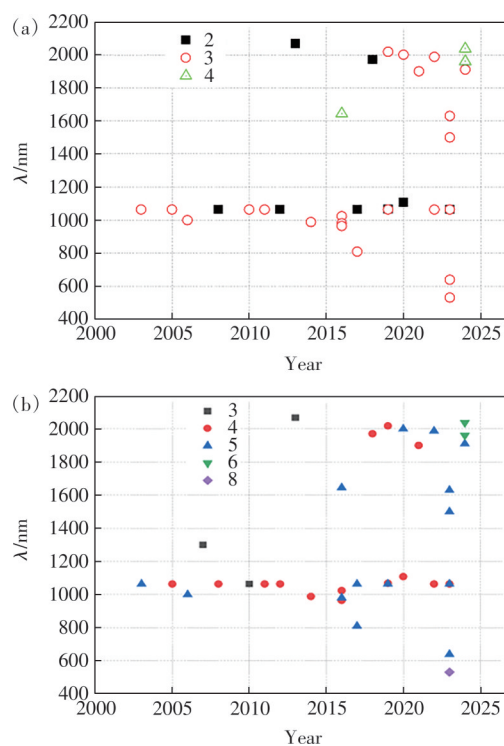


图 2 近年激光多维调控的相关文献统计。(a)不同发表年份,不同波长的光束多维度调控的维度数统计;(b)多维度调控中涉及到的自由度的调控数量^[22-50]

Fig.2 Literature statistics on multi-dimensional laser control in recent years. (a) Statistics of the number of dimensions of multi-dimensional regulation of beams of different wavelengths in different publication years. (b) The number of degrees of freedom involved in multi-dimensional control^[22-50]

频谱特性等多个维度同时调控研究不多。例如,在维持脉冲的情况下控制激光器产生涡旋光以及高阶横模或者产生波长可调谐的脉冲光束。但当需要进一步上升维度时,控制就开始变得愈发困难起来。在多维调控方面,相比于其他波长,2 μm 波段有着明显的优势,现有的增益介质如 Tm:CaYAlO₄ 晶体增益谱较宽,增益截面较大,有利于在谐振腔中进行偏振选择和横纵模调控,使得在多维调控中更容易实现高阶横模的锁模^[24]、涡旋锁模^[49]、矢量涡旋激光^[22],甚至于矢量涡旋锁模。现有多维调控的激光波长主要集中在 1 μm 近红外波段,其他波段的研究较少。这其中的困难是多样化的,一方面,在 2 μm 水吸收波段,激光受空气湿度影响,强度会产生波动,还会导致模式调控难以进行。此外,多维度调控过程中无法做到多个维度之间完全单独调控,这大大增加了多维度同时准确控制的难度。近年来,2 μm 激光的多维调控由于其在激光医学、传感、通信和非线性光学应用中的重要性,受到了越来越多研究者的关注。目前,在多个维度上都使得光束特性保持在理想范围内还是一个需要攻克的难题。接下来本文将逐一详细介绍相关理论与实验进展。

2.1 激光多维度调控的相关理论

激光光束多维度特性本质上是电磁场 3+1 维时空复数数学形式的表现,其纵模和横模的多维时空特性都由麦克斯韦方程组描述。自由空间中电磁波随时间变化的亥姆霍兹方程为:

$$\nabla^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2}, \quad (1)$$

其中, $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ 为电场, $\mathbf{r}$ 表示位置矢量, ε 、 μ 分别为介电常数和磁导率。在频率为 ω 的单色光中,电场可以表示为:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \text{Re}\{E_0(\mathbf{r}) \exp[i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)]\}, \quad (2)$$

其中 $\mathbf{k}$ 为波矢量,其大小由 $|\mathbf{k}| = 2\pi/\lambda$ 决定,而 $E_0(\mathbf{r})$ 则是由

$$E_0(\mathbf{r}) = [E_1 \mathbf{e}_1 + E_2 \mathbf{e}_2 + E_3 \mathbf{e}_3] u(\mathbf{r}), \quad (3)$$

决定,其中复系数 $E_1(\mathbf{r})$ 、 $E_2(\mathbf{r})$ 、 $E_3(\mathbf{r})$ 表示电场沿着单位向量 $\mathbf{e}_1$ 、 $\mathbf{e}_2$ 、 $\mathbf{e}_3$ 的强度^[35]。

对于多种高阶模式,现在已经有了较为统一的理论模型来模拟光斑的偏振特性与涡旋属性^[42]。

$$|\psi\rangle = \cos\left(\frac{1}{2}\theta\right)|R\rangle + e^{i\alpha}\sin\left(\frac{1}{2}\theta\right)|L\rangle, \quad (4)$$

$$|\psi\rangle = \cos\left(\frac{1}{2}\theta\right)|l\rangle + e^{i\alpha}\sin\left(\frac{1}{2}\theta\right)|-l\rangle, \quad (5)$$

$$|\psi\rangle = \cos\left(\frac{1}{2}\theta\right)|l\rangle|R\rangle + e^{i\alpha}\sin\left(\frac{1}{2}\theta\right)|-l\rangle|L\rangle, \quad (6)$$

公式(4)表示的是光束的偏振性质,公式(5)则是涡旋性质,将两式组合得到张量积公式(6)。要表示光束的偏振特性,就需要利用庞加莱球。文献[5]进一步指出低阶庞加莱球可以用来很好地表示常规的高斯光束的偏振态,但当涉及不同横模的 LG_{mn} (Laguerre-Gaussian) 时就需要布洛赫球来表示。将两者结合之后可以得到高阶庞加莱球,如图 3(c) 所示^[5]。如今已知的多种二维结构光束如表 1^[5]。每个光束族都是一个或多个给定操作符的一组特征函数,其中大部分光束的特征值对应多维度调控的自由度,光束的整体行为是由哈密顿算子决定。可以看出,这些理论上的结构光束在激光光场的强度、相位和偏振等方面表现出了一系列的独特性,譬如贝塞尔光束拥有无衍射极限的特性,艾里光束则具有自加速特性,IG (Ince-Gaussian) 光束与艾里光束类似,IG 光束横截面上的场分布具有椭圆对称性,此外也具有一定的自加速特性,但这种特性通常与其特定的椭圆结构和模式分布有关。这些结构光束的不同特点使其在许多应用中非常有用,例如光操纵和粒子操纵,特别是具有时域超快激光特性的结构光束展现出了诱人的应用前景,其进一步研究也必将催生更多的新型应用场景。

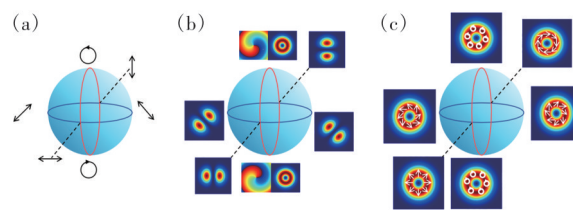


图3 (a)庞加莱球;(b)布洛赫球;(c)高阶庞加莱球^[5]

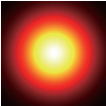
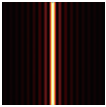
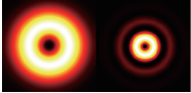
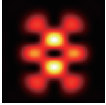
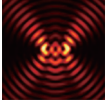
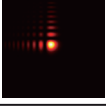
Fig.3 (a)Poincare ball. (b)Bloch ball. (c)High-order Poincare ball^[5]

2.2 2 μm 水吸收波段基阶空间横模超快激光研究进展

脉冲作为激光在时域上主要研究的内容,其对于激光加工方面的应用有着决定性的影响,因此,在探讨激光多维度调控的前提下,时域脉冲的控制重要性不言而喻。

在传统的锁模(纵模锁模)实验方面,2 μm 波

表 1 多种结构光束的光斑及决定其特性的算子
Tab. 1 Spot of various structural beams and operators determining their characteristics

光束族	光斑样式	算子	自由度(特征值)
高斯光束		光束质量: $\hat{M}^2 = \frac{r^2}{\omega_0^2} + \frac{k^2 \omega_0^2}{4} \hat{p}^2$	$N+1$
传播不变光束		横向拉普拉斯函数(自由的空间哈密顿量) $\hat{p}^2$	k_r^2
HG 模式光束 HGmn		质量因子差异: $\hat{M} = \frac{x^2 - y^2}{\omega_0^2} + \frac{k^2 \omega_0^2}{4} (\hat{p}_x^2 + \hat{p}_y^2)$	$m-n$
LG 模式光束 LG _{lp} 与 BG 模式光束 BGmn		角动量: $\hat{L} = x\hat{p}_y^2 - y\hat{p}_x^2$	角动量: $\pm l$
GHLG 模式光束		算子叠加: $\alpha \hat{L} + \beta \hat{M}$	相同特征值 $m - n = \pm l$
IG 模式光束		$\alpha \hat{L}^2 + \beta \hat{M}^2$	—
马修光束(传播不变性模拟 IG 光束)		算子叠加: $\alpha \hat{L}^2 + \beta (\hat{p}_x^2 - \hat{p}_y^2)$	—
艾里光束		具有线性势的量子哈密顿量: $\hat{p}^2 + \alpha x$	—

段已有较多的研究成果。该波段的被动锁模技术主要有半导体可饱和吸收镜(SESAM)锁模和碳纳米管(CNT)、石墨烯(Graphene)等二维材料锁模,而克尔透镜锁模在该波段仍存在一定的困难。目前,波长在 2 μm 以上的固体锁模激光器发展较好,脉冲宽度可以达到 100 fs 以下。由于大气分子(水分子中的羟基)在 1.8~1.97 μm 波长范围内具有强烈的水吸收峰,对该波段固体锁模激光器的研究不利。其脉宽大都局限在数十皮秒水平,与其他近红外波段有较大的差距。首先,谐振腔中水汽的流动和不均匀会使得激光的空间模式指向不稳定,增加横模调控难度。其次,腔内水汽吸收会导致激光器腔内功率发生衰减和抖动,影响锁模脉冲的时域稳定性,易失锁。此外,水汽吸收还会裂化激光的发射光谱,使锁模的光谱较窄,呈现多峰状态,限制飞秒量级窄脉宽的产生。表 2 总结了近十年来 2 μm 水吸收波段锁模固体激光器的研究进展。

2009 年,德国马克斯·波恩研究所 Cho 等利用透射型的单壁碳纳米管(SWCNT)作为可饱和吸收器件,钛宝石激光器作为泵浦源,在 Tm:KLu-(WO₄)₂ 激光器中实现了稳定的自启动锁模^[43]。实验装置如图 4(a)所示,其中心波长 1 944 nm,脉宽 14.9 ps,最大平均输出功率 240 mW。2011 年,该研究所 Andreas 等在 Cho 的研究基础上,同样利用透射型的 SWCNT 作为可饱和吸收器件,钛宝石激光器作为泵浦源,在 Tm:YLF 激光器中实现了稳定锁模^[52]。其中心波长 1 888 nm,脉宽 19 ps,测得光谱宽度 0.31 nm,最大平均输出功率 55 mW。2014 年,上海交通大学 Xie 等报道了一种采用 SESAM 作为锁模器件的皮秒被动锁模激光器^[54]。该锁模激光器以 Tm:CaGdAlO₄ 无序晶体为增益介质,在中心波长 1 949.5 nm 处获得了 27 ps 的超短脉冲,重频为 128.6 MHz,最大平均功率 330 mW。2015 年,上海交通大学 Kong 等首次在 2 μm 水吸收波段利用 SESAM 实现了双波长同步锁模^[55]。

表 2 2 μm 水吸收波段固体超短脉冲时域调控研究进展

Tab. 2 Research progress on mode-locked solid-state lasers in the 2 μm water absorption band

增益介质	饱和吸收体	最大平均输出 功率/mW	中心波长/ nm	脉宽/ps	3 dB 带宽/nm	泵浦源	发表年份
Tm:GdLiF ₄	InGaAs quantum	270	1 886	17	0.2	LD	2010 ^[51]
Tm:YLF	SWCNT	55	1 888	19	0.31	Ti:sapphire	2011 ^[52]
Tm:LuYSiO ₅	SESAM	64.5	1 944.3	19.6	0.6	Ti:sapphire	2012 ^[53]
Tm:CaGdAlO ₄	SESAM(ΔR=1.2%)	330	1 949.5	27	2	LD	2014 ^[54]
Tm:CaYAlO ₄	SESAM(ΔR=1.2%)	830	1 958.9 1 960.6	35.3	—	LD	2015 ^[55]
Tm:YAP	SESAM(ΔR=1%)	710	1 938	1.89	3.7	LD	2015 ^[56]
Tm:CaYAlO ₄	SESAM	420	1 965	0.621	11	LD	2017 ^[57]
Tm:CaYAlO ₄	SESAM(ΔR=1.2%)	1 350	1 950	49	0.13	LD	2017 ^[58]
Tm:YLF	SESAM(ΔR=1.2%)	95	1 909	31	0.2	双端 LD	2018 ^[59]
Tm:YAP	自锁模	1 650	1 943	621	1.1	LD	2018 ^[60]
Tm:YLF	SESAM(ΔR=1.2%)	1 040	1 831.9	107	0.067	LD	2019 ^[61]
Tm:Y ₂ O ₃ ceramics	SESAM(ΔR=1.2%)	240	1 951	40	0.15	LD	2019 ^[62]
Tm:CaF ₂	SESAM	132	1 886.8	10	2.9	LD	2019 ^[63]
Tm,Ho:LiLuF ₄	SESAM(ΔR=1.2%)	350	1 895	12	14	Ti:sapphire	2020 ^[64]
Tm:CaYAlO ₄	SESAM(ΔR=3%)	195	1 967	1.97	3.1	LD	2022 ^[65]
Tm:YAP	SESAM(ΔR=3%)	1 830	1 938	1.97	4.3	LD	2024 ^[66]

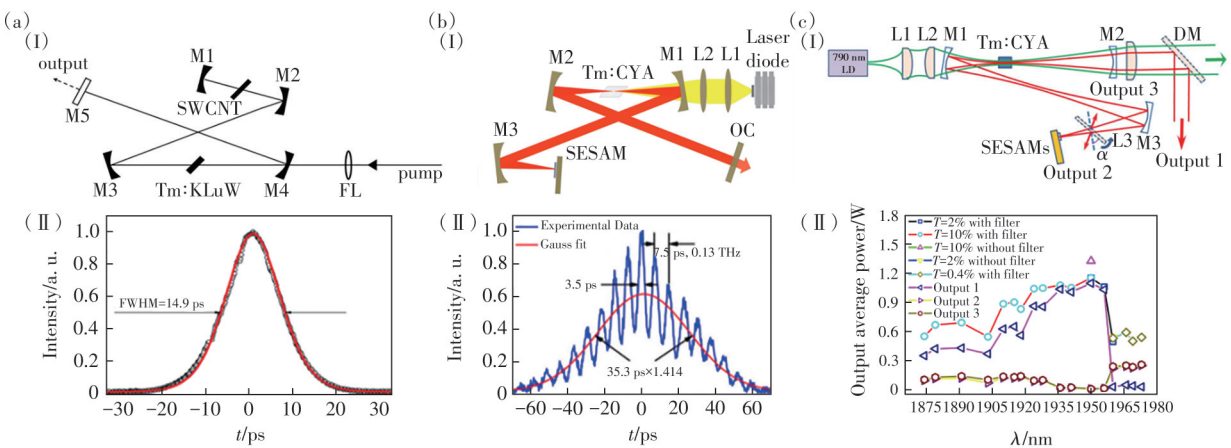


图 4 (a)SWCNT-SA 锁模的 Tm:KLuW 激光器:(I)实验装置图,(II)自相关轨迹;(b)双波长同步锁模的 Tm:CaYAlO₄ 激光器:(I)实验装置图,(II)自相关轨迹;(c)(I)Tm:CaYAlO₄ 激光器实验装置图,(II)在不同投射 OC 镜的腔体中锁模 Tm:CYA 激光器的输出功率^[43,57,60]

Fig.4 (a)Tm:KLuW laser with SWCNT-SA mode locking: (I)experimental setup diagram; (II)autocorrelation trace. (b) Tm:CaYAlO₄ laser with dual wavelength synchronous mode locking: (I)experimental setup diagram; (II)self related traces. (c)(I)Tm:CaYAlO₄ laser experimental setup diagram. (II)The output power of a mode-locked Tm:CYA laser in cavities with different projected OC mirrors^[43,57,60]

实验装置图如图 4(b)(I)所示,激光器谐振腔采用的是典型的“x”型折叠腔。锁模激光器在 1 958.9 nm 和 1 960.6 nm 实现了时间同步的双色脉冲。

Tm:CaYAlO₄ 无序晶体具有 185 nm(1 861~2 046 nm)的自发辐射谱宽,理论上可实现 2 μm 水吸收波段波长宽调谐和飞秒量级的窄脉冲。2017 年,江苏师范大学 Zhou 等在 Tm:CaYAlO₄ 激光器中首次实现了水吸收波段高功率、宽波长可调谐的稳定锁模^[57]。实验装置如图 4(c)所示,采

用“z”型折叠腔,使用 790 nm 的多模光纤耦合激光二极管泵浦(LD)。通过在腔内插入一块石英,使得稳定的锁模波长可在 1 874~1 973 nm 调谐,可调谐波长范围 100 nm,最大输出功率可达 1.35 W。图 4(c)(II)为不同透射 OC 下腔的输出功率曲线图。2018 年,天津工业大学 Zhang 等采用 792 nm 的 LD 端面泵浦,在 Tm:YAP 激光器实现了 2 μm 水吸收波段的自锁模^[60]。其中心波长 1 943 nm,重频为 468 MHz,脉冲宽度小于 621 ps。2022 年,江苏师范大学 Cao 等采用 793 nm LD 泵

浦,在 Tm:CaYAlO₄ 激光器中成功地实现了窄脉冲稳定锁模^[65],其中心波长为 1 967 nm。实验装置如图 5 所示,激光器谐振腔采用的是三焦点型折叠腔,通过调节 SESAM 的位置获得稳定锁模。图 5(b)为实验中测得的稳定锁模时脉冲序列、锁模光谱、自相关轨迹和射频频谱。脉冲与射频频谱显示的锁模非常稳定,处于水吸收波段,脉冲宽

度为 1.97 ps,重频为 120.9 MHz,信噪比为 70 dB。此外,通过采用不同调制深度的 SESAM 作为锁模器件,发现在饱和参数增加的情况下,稳态腔内的输出脉冲得到了压缩。利用 Ginzburg-Landau 方程演示了 2 μ m 水吸收波段的脉冲调节机制,这为超短中红外脉冲调节提供了一种有效可行的方法。

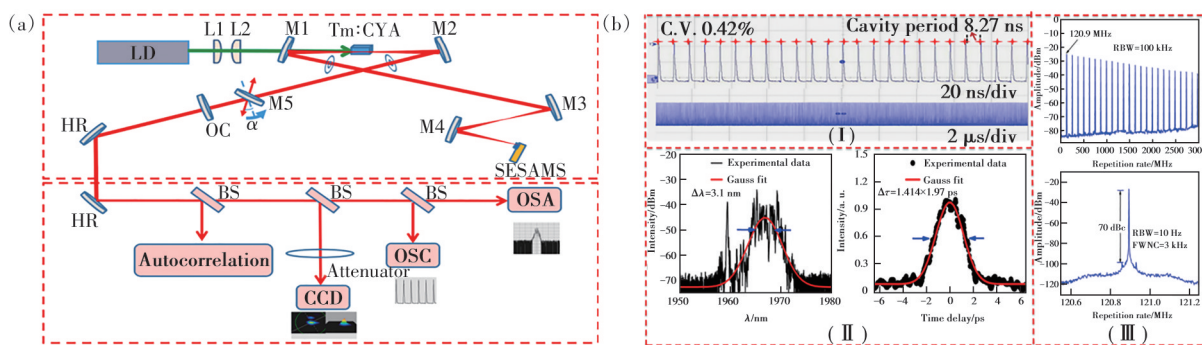


图 5 (a)基于 SESAM 的 Tm:CaYAlO₄ 锁模激光器实验装置图;(b)基于 SESAM 的 Tm:CaYAlO₄ 锁模激光器实验结果:(I)不同扫描范围下的锁模脉冲序列,(II)锁模光谱图和自相关轨迹,(III)锁模脉冲的射频频谱^[65]

Fig.5 (a) Experimental setup of Tm:CaYAlO₄ mode-locked laser based on SESAM. (b) Experimental results of Tm:CaYAlO₄ mode-locked laser based on SESAM. (I) Locking pulse sequences at different scanning ranges. (II) Lock in spectra and autocorrelation trajectories. (III) RF spectrum of mode-locked pulses^[65]

综上所述,传统低调制深度 SESAM 的锁模激光器的脉冲持续时间在水吸收波段内通常为几十皮秒。这进一步表明,在该波长范围内,传统的锁模方法实现脉冲调节面临巨大挑战。基于 2 μ m 水吸收波段的应用牵引,具有皮秒或飞秒脉冲宽度、衍射限制光束质量和高平均功率的高质量锁模激光器的突破对于超快中红外光源至关重要,也是研究人员所追求的重要目标^[67-68]。

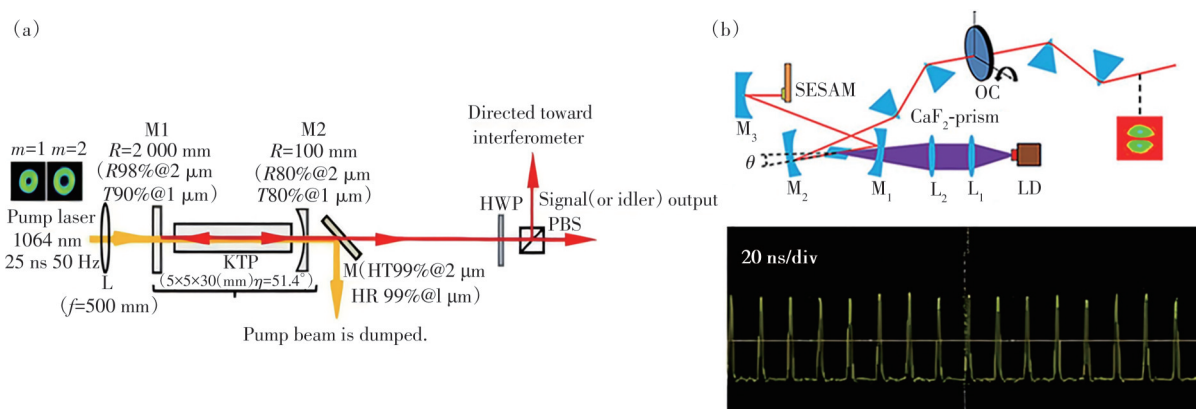
2.3 2 μ m 高阶横模涡旋光束研究进展

基横模锁模激光器的一个典型特点是输出的光强横向分布无节线。这就意味着在超短激光脉冲的应用中,大部分只涉及了脉冲的时间尺度特性,很少涉及锁模脉冲的横向空间分布。高阶横模具有多种空间模式,在很多领域都具有非常重要的应用价值。比如拉盖尔-高斯光束(LG)是赫姆霍兹方程在笛卡尔坐标系下的解,其中 LG 光束是具有螺旋相位因子 $e^{i\ell\phi}$ 的常见涡旋光束。近年来,关于涡旋光束的各种研究引起了研究者的广泛关注。这种光束在光学处理微观粒子^[69]、原子操纵^[70]、近衍射极限显微镜^[71]、激光材料加工^[72]、量子信息处理与通信^[73]等方面具有重要的应用。而超快涡旋光束结合了传统超快激光器和涡旋光束的优点,可以在携带轨道角动量的前提下,提升信

噪比^[73]。矢量涡旋还能够使加工精度提升,其在超快微纳操控^[74]、超快微处理^[75]、超快灯丝光学^[76]、利用高次谐波产生极紫外(XUV) OAM 光束^[77]等应用领域展示出巨大的潜力。

激光腔外产生涡旋光束的研究较多,例如插入空间光调制器(SLM)^[78]、q 板^[79]或其他定制超表面^[80-81]等特殊腔内元件来产生可调谐 OAM 光束。但这些方法都需要额外的器件,且存在转换效率低、损伤阈值低、波长限制等缺点。而在腔内直接产生涡旋光束基本上是通过主动选择振荡激光模式来完成的,高阶横模与泵浦光的模式匹配优于基横模光束匹配,从而使得高阶横模的增益大于基横模光束的增益,更有利于高阶横模光束的输出。例如,在 LD 端面泵浦激光腔中使用环形光束泵浦^[24]、点缺陷腔镜^[23]、腔内纯相位光学元件^[82]、或旋转增益介质引起的非共线泵浦和离轴泵浦^[83]。由于高阶横模光束的调节较为复杂,目前腔内直接产生超快涡旋激光的研究较少。

2012 年,日本千叶大学 Yusufu 等在涡旋泵浦半对称光学参量振荡器中,通过拓扑电荷从泵浦光束到信号输出的各向异性传输如图 6(a)所示^[84]。在 1.953~2.158 μ m 波长范围内利用光参量振荡器产生了拓扑电荷为 1 或 2 的可调谐光涡



旋脉冲。他们通过螺旋相位板调整泵浦源为环形光泵浦,随后由于KTP的激光中的o光与e光各向异性,携带了不同的拓扑荷数,可以使用PBS将其分离。此外,他们还研究了信号和惰轮输出光束的涡旋性质,并对拓扑荷数分别为1和2的涡旋光束以及高斯光束的干涉条纹进行了比较。这使得涡旋光与高斯光以及不同阶数涡旋光束的直接调控成为可能。

2015年,韩国汉阳大学 Kim 等利用环形光束泵浦在单频固体激光器中直接产生了LG模涡旋光束^[23]。2017年,上海交通大学 Qiao 等采用非线性LD泵浦,在飞秒锁模Tm:CaYAlO₄激光器中在1 965 nm波段实现了可控的基模和高阶HG模式输出,所得的TEM₀₂模式的脉冲持续时间为621 fs,平均输出功率为321 mW,进一步通过腔外转化实现了2 μm 涡旋飞秒激光输出^[83]。图6(b)上图为实验装置示意图,激光器谐振腔采用的是典型的“x”型折叠腔和793 nm 半导体激光器(LD)泵浦。

在腔内利用一对棱镜补偿腔内的群延迟色散,腔外利用一对棱镜消除光束的空间啁啾效应。高阶 TEM_{01} 的锁模结果如图 6(b) 所示。锁模的中心波长为 1 965 nm,测得的脉宽 621 fs,脉冲重频为 100.3 MHz。

上述产生涡旋光束的研究需要使用特殊设计的腔镜或采用专门设计的泵浦系统,另外还需要在腔外使用“ $\pi/2$ 转换器”进行相位调整。2021年,江苏师范大学Cao等在没有横模转换的情况下,采用高斯光束非共线泵浦,首次在 $\text{Tm}:\text{CaYAlO}_4$ 激光器中直接获得了超快涡旋光束^[85]。实验装置如图7所示,激光谐振腔采用的是三焦点折叠腔型并通过倾斜泵浦得到了涡旋光,通过在腔内插入YAG晶体板对 LG_{01} 模式的手性进行选择,并验证 LG_{01} 模式的涡旋相位特性。锁模脉冲在保持环形光结构情况下脉冲持续时间为2.1 ps,重频为120.6 MHz。图7(b)表示涡旋的拓扑荷数为+1,0和-1的LG光束干涉得到的分叉条纹与模拟

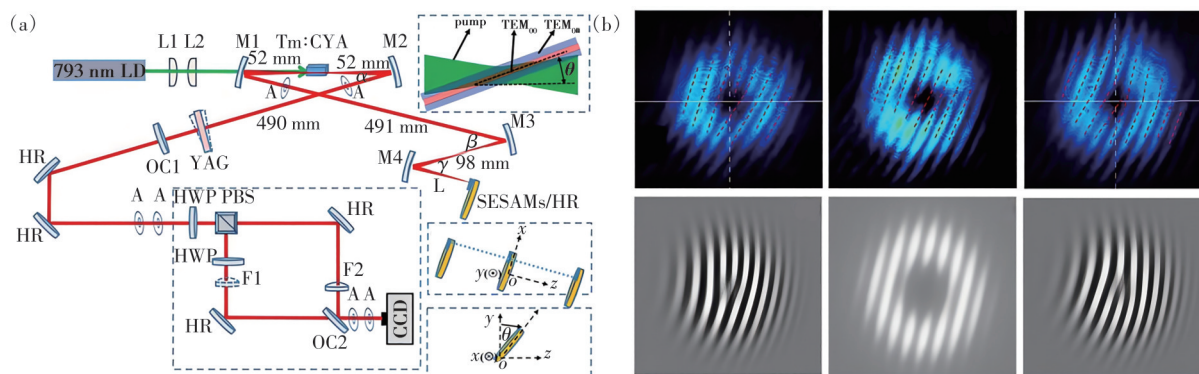


图7 (a)Tm:CYA锁模涡旋激光器实验装置示意图;(b)经过马赫曾德尔干涉仪后的涡旋光干涉图及其模拟结果^[85]

Fig.7 (a)Schematic diagram of Tm:CYA mode-locked vortex laser experimental setup. (b)Vortex light interference pattern and simulation results after Mach Zehnder interferometer^[85]

结果的对比。

2022年,山东师范大学 Zhang 等通过 Tm:YAP 激光器中的热透镜效应直接产生了 1 937.7 nm 的

LG₀₁ 光束,如图 8(a) 所示^[86],实现了激光器的自调 Q,图 8(b) 为不同泵浦功率下其涡旋激光器的脉冲。

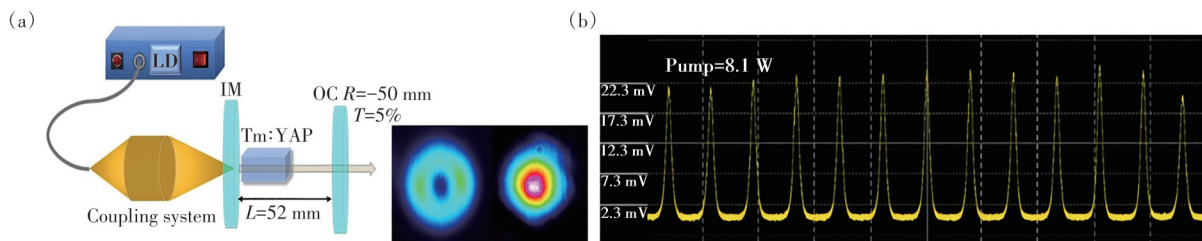


图 8 (a)通过热透镜效应直接产生 2 μm 环形光实验装置示意图;(b)涡旋激光器的脉冲^[86]

Fig.8 (a) Schematic diagram of experimental setup for directly generating 2-micron annular light through thermal lens effect.

(b) Pulse of vortex laser^[86]

因此,随着越来越多的研究开始关注高阶横模的调控,2 μm 高阶横模涡旋光束逐渐作为多维调控重要的一环,未来在提升通信信道、加工精度等方面有远大发展前景。

2.4 2 μm 高阶横模矢量光束激光的研究现状

矢量光(Vector light)也称为矢量光束或矢量光场,是一种具有偏振态随着空间变化的光束。与传统的标量光束(如线偏振光或圆偏振光)相比,矢量光的电场矢量在横截面上呈现复杂的空间分布,其偏振态通常在空间中发生变化,在科学研究和技术应用中具有许多独特的作用和优势。

2023年,江苏师范大学 Liu 等通过 *c* 切的 Tm:CaYAlO₄ 晶体,使用六镜腔结构,实现了 2 μm 波段径向和角向柱矢量光束的直接输出^[87]。当激光穿过 *c*-cut 晶体时,由于双折射效应,e 光的稳定腔长比 o 光的稳定腔长要长。因此,他们通过调节

端镜位置控制腔长的方式实现了腔内横模的调控,产生了中心波长在 1 962 nm 左右的径向与角向偏振的环形光束输出。

2024年,江苏师范大学 Zhu 等进一步通过调整腔长的方法连续得到了径向、角向以及线偏的环形光束,如图 9(a)^[22]。通过数值模拟表明,径向、角向或者是线偏的环形光束都是由两个 HG 模式叠加形成的。随后,他们还通过干涉对光斑的涡旋特性进行了测量,测得拓扑荷数分别为 1 和 -1。最后,利用 SESAM 的可饱和吸收效应,使用示波器测得此时光斑的脉冲状态为调 Q 锁模,脉宽 829.5 ps,这表明在涡旋、偏振,以及时域脉冲三个维度上实现了同时调控。2025年,江苏师范大学 Kang 等在此基础上使用 *c* 切的 Tm:CYA 晶体实现了矢量涡旋特性的连续锁模脉冲激光输出,脉宽~41.2 ps^[88]。

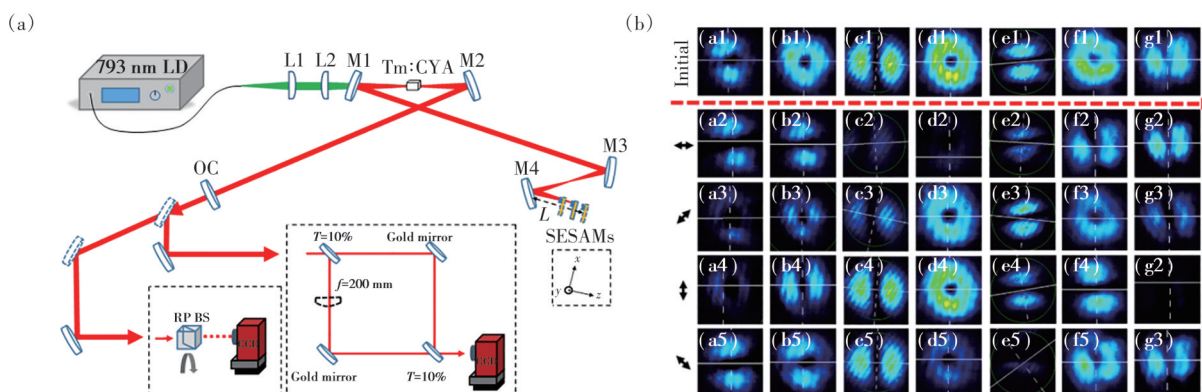


图 9 (a)*c*切 Tm:CYA 激光器产生柱矢量光束的实验装置示意图;(b)连续获得多种高阶横模及经过偏振片后的光^[22]

Fig.9 (a) Schematic diagram of experimental setup for generating column vector beam with Tm:CYA laser. (b) Continuous acquisition of multiple high-order transverse modes and light passing through polarizer^[22]

2.5 固体激光器多维调控的新发展

随着人工智能的快速发展,以神经网络为代

表的机器学习也给激光的研究和应用提供了新方向。2020年,电子科技大学 Lu 等设计与实现了

一种基于神经网络优化的深紫外锁模激光器^[89]。传统的优化方法过于依赖于实验者的经验,效率较低且不适应实时环境变化。为了克服这些问题,作者引入了人工神经网络(ANN)作为优化工具,通过实时调整实验环境中的关键参数(如晶体位置、腔长、聚焦透镜的位置和倍频晶体的温度)来优化激光器性能。实验装置如图10(a)所示。通过使用神经网络,作者将激光输出功率提升至

18 mW,并获得了较好的光谱中心。优化过程中的关键因素包括选择合适的激活函数和训练算法,以确保神经网络能够快速收敛并适应实时环境变化。最终,研究表明,该方法显著提高了深紫外锁模激光器的性能,并为多参数优化问题提供了一种通用的解决方案,尤其是在激光器及其他复杂系统的优化中。这一尝试让人们看到了AI控制固体激光器的广阔前景。

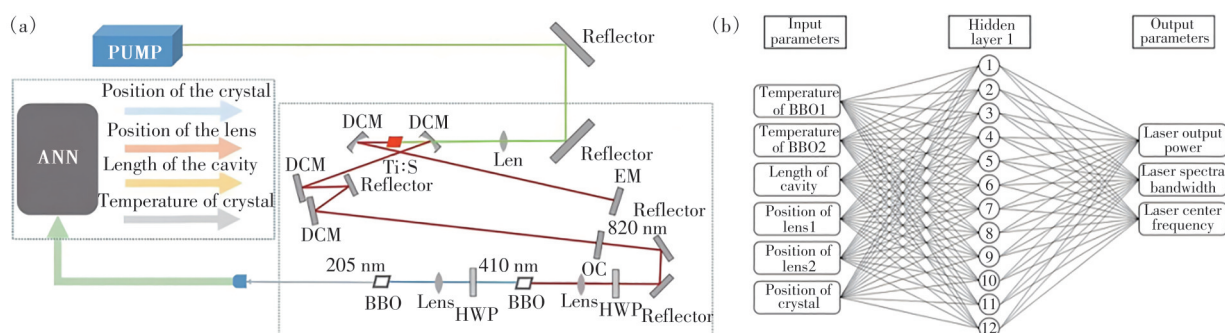


图10 (a)系统的简化方框图;(b)人工神经网络的结构^[88]

Fig.10 (a)Simplified block diagram of the system. (b)The structure of artificial neural networks^[88]

2024年,四川大学Guo等在1 μm 波段通过识别散斑,实现了固体激光器的类人算法锁模调控^[90]。他们使用Yb:QX玻璃作为增益介质,采用980 nm的光纤耦合激光二极管作为泵浦源,并通过不同的光学元件和调节策略来实现智能控制。特别是在锁模过程中,通过监测和分析激光散斑的强度和对比度变化来进行反馈控制。图11(a)所示即为试验装置图,从无激光发射到实现稳定锁模,整个过程在40 s内完成,其中,利用训练好的神经网络调整凹面镜M₁和M₂的位置,10次实验平均耗时11 s。使用改进的ARS算法调整OC和SESAM的取向角,10次实验平均耗时12.7 s;运用

神经网络和滑动窗口策略调整SESAM的位置,10次实验平均耗时9.1 s。调控激光锁模这一在人工调控的过程中需要消耗大量精力与时间的工程,在算法帮助下成功实现了自动调控。实验结果表明,智能控制系统能够快速、准确地调整激光器腔体中的各个元件,实现稳定的锁模输出,这不仅能够减少对人工的需求,还能迅速而高精度地筛选模式,以实现人工难以找到的模式。

然而,目前的智能调控还在起步阶段,需要大量的数据来学习和优化。特别是在2 μm 波段,目前还主要聚焦于较少的维度控制,其控制方式主要依赖于人工调控;而多维度同时调控由于难度

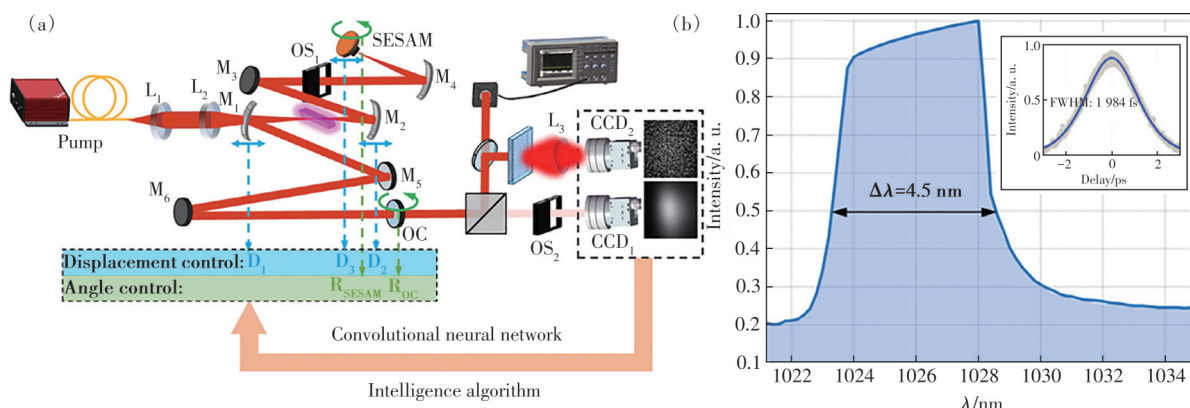


图11 (a)智能类人固体锁模激光系统原理图;(b)光谱以及自相关轨迹^[90]

Fig.11 (a)Schematic diagram of intelligent humanoid solid-state mode-locked laser system. (b)Spectral and autocorrelation trajectories^[90]

更大,耗时更长,实际上更适合未来交由人工智能控制以减少人力消耗,因此这也是未来多维调控的一大发展方向。

3 多维度调控激光器的相关应用

由于对于激光的多维调控还在探索阶段,对于多维度激光的应用还需要进一步探索,我们可以根据已有的对激光不同维度控制的应用的了解来探寻可能的应用方向。

1993年,美国科希伦公司 Henderson 等基于 $2\ \mu\text{m}$ 波长 Tm, Ho:YAG 固体激光器的脉宽、重频、光谱、能量等多个维度的调控实现了相干激光雷达(LIDAR)系统的开发和应用^[91]。该系统产生了 50 mJ 脉冲能量的单纵模脉冲,脉冲宽度为 150 ns,重复频率为 5 Hz。系统的波长可调谐范围为 2 086~2 100 nm,允许在大气吸收线之间的高透射波长区域工作。

对于激光横模调控的应用,2008年,伊利诺伊大学 O Hosten 检测到垂直于通过空气-玻璃界面的光子的折射率梯度的自旋依赖性位移,如图 12(a)^[92]。该效应是电子系统中自旋霍尔效应的光子版本。他们对自旋态使用预选和后选技术将原始位移增强了近四个数量级,从而实现了约 0.1 nm 位移的敏感性,自旋霍尔效应可用于操纵光子角动量状态,可能实现精密测量。2012年,湖南大学 Zhou 等通过上述的光子霍尔效应实现了对石墨烯层数变化的识别^[93]。2024年,湖南大学 Zhen 等又在此基础上实现了通过光子霍尔效应测量单层原子晶体表面磁化率^[94]。此外,高阶横模在加工行业也开始有新的应用。2019年,巴黎第十一大学 Syubaev 等通过圆柱形矢量束印刷制备了等离子体纳米镜^[21]。他们使用柱矢量光束照射等离子纳米环,可以大量制备等离子纳米镜,如图 12(b)。

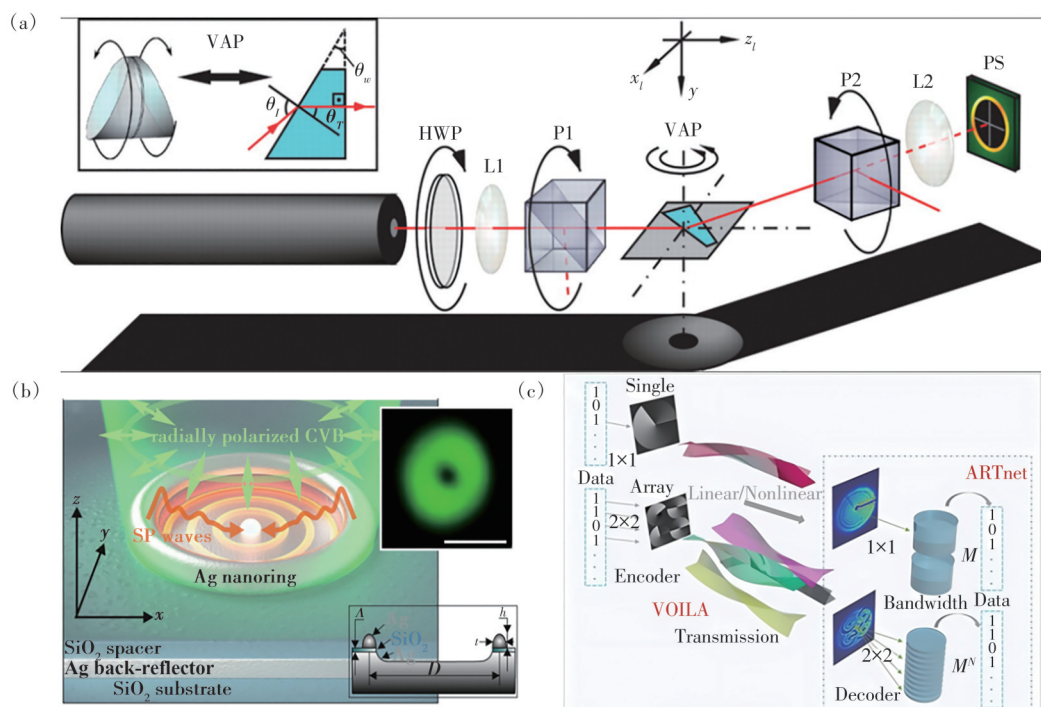


图 12 (a)用于表征光子自旋霍尔效应的装置示意图;(b)金属-绝缘体-金属等离子体纳米材料;(c)空间复用原理及装置示意图^[21,92,97]

Fig.12 (a)Schematic diagram of the device used to characterize the photon spin Hall effect. (b)Metal-insulator-metal plasma nanomaterials. (c)Principle and schematic diagram of spatial reuse^[21,92,97]

而涡旋光已经开发出了相当数量的应用。2020年,上海交通大学 Chen 等尝试在光子芯片中嵌入矢量涡旋光束发射器^[95],涡旋激光可以利用其固有的无限维度来增强数据容量,以维持大数据和互联网流量的空前增长。同年,西安电子科

技大学 Qu 等研究了大气气溶胶聚集对高阶 Bessel 涡旋束(HOBVB)散射的解析解^[96]。2023年,浙江大学 Fan 等通过空间多路复用,实现了具有光学非线性的鲁棒光涡旋传输,如图 12(c)所示^[97]。

超快脉冲能实现高精度、高效率、高清洁度的

加工,这是早已有的共识^[98]。2015年,德累斯顿工业大学 Bogdan 等利用 1 950 nm 超快脉冲激光进行材料加工,他们通过波长、功率、脉宽等维度调控,获得平均功率 4.35 W、脉宽 40 ps、重频 4.2 MHz 的激光器,实现了材料的高精度加工^[99]。近年来,更高速的超快脉冲实现了对纳米级材料的精确加工^[100-101]。随着 2 μm 超快激光的发展,对其他维度的同时调控也渐渐投入使用。2023年,南安普敦大学 Lei 等产生超快激光的同时控制激光偏振以实现 2 μm 超快激光直写。

虽然目前的应用都还集中在近红外和可见光波段,但越来越多的人开始注意到 2 μm 多维调控激光的优势。2013年,德国马克斯·普朗克量子光学研究所 Wang 等通过仔细选择谐振器材料和设计谐振腔,通过波长、相位的调控实现了 2.5 μm 的宽带、低相位噪声克尔梳^[102]。2017年,丹麦技术大学 Israelsen 等利用中红外超连续谱源光源生成二维横截面图像,实现了实时高分辨率中红外光学相干断层扫描^[103]。

在聚合物的微纳加工方面,可以通过光场的调控来控制雕刻的形状,同时通过高频脉冲实现高精度的雕刻。在 2 μm 新波长通信方面,时域、偏振和相位的多维度激光还有越来越多的维度可以有效拓宽带宽,并增强通信的保密性和通信容量。

4 总结与展望

2 μm 波段的激光应用广泛,在光学遥感、环境监测、激光医疗以及国防等领域都具有较深层次的应用基础,为研究者及科学家们聚焦前沿领域奠定了基础。因此,对 2 μm 波段激光的多维调控研究十分有必要。

目前,对于激光器的多种模式调控的研究还主要集中在 1 μm 、1.6 μm 等近红外波段范围,在 2 μm 波段的相关研究成果较少。目前已取得了一定的进展,能在该波段的固体谐振腔内直接或者间接产生携带有轨道角动量的涡旋光光束以及可控偏振态空间分布的矢量光束,并且获得了百飞秒量级的超短脉冲输出。然而,在 2 μm 波段范围的水吸收波段(1.8~1.97 μm)范围内,还有很多问题需要解决:(1)2 μm 波段水汽吸收光谱和时域脉冲调制使得腔模调节难度增加,因此在进行 2 μm 固体激光的实验或是设计 2 μm 固体激光器时应考虑水汽吸收带来的影响。(2)时域可饱

和吸收体及二维材料等关键锁模器件不成熟,损伤阈值低,特别在 1 850~1 970 nm 的水吸收波段,造成时域锁模脉冲脉宽窄化困难,所以接下来可以尝试发展适合于水吸收波段、高损伤阈值的人造可饱和吸收体或克尔透镜锁模技术。(3)传统 2 μm 固体锁模激光采用的折叠腔型造成的像散增加了横模调控的难度,使得对端镜与晶体的细微调整就会对横模产生很大的影响。对此,应尽快发展 AI 智能控制激光器技术,以减少人力消耗,并能够更精准地控制腔模。(4)2 μm 波段高损伤阈值的超快激光偏振状态的时空探测技术器件和技术相对缺乏,难以对现有的实验结果进行更高效率与更多维度的同时探测,因此还需要构建一套偏振时空测量系统以应对日益丰富的多维度调控激光。

综合现阶段 2 μm 波段存在的困难和挑战,未来的发展方向主要有以下几个:(1)寻求新型增益介质。近年来,少周期超短中红外脉冲的产生和放大越来越具有吸引力。以 2 μm 为代表的中红外锁模激光源的发展历来受到激光材料发展不足的阻碍,为了实现高效率、高功率的超快激光稳定输出以确保在多维调控过程中能够稳定控制生成目标模式,需要发展平滑宽增益谱(Tm, Ho 梯度掺杂,多格位)、新型几何结构(单晶光纤)、低声子能量(倍半氧化物)的新型增益材料。(2)由于当前 2 μm 调控相较于 1 μm 有着一定的困难,因此,未来 2 μm 多维调控的发展可以利用 1 μm 的控制经验,发展独特的技术方案。未来可以引入更高阶更多维度的同时调控以加强我们对激光各方面的控制,包括偏振、OAM、SAM、高阶横模和脉冲等,为实现更精准的材料加工、更安全的激光手术和更高容量更安全的通信提供技术与理论支持。(3)下一步,可以引入人工智能对激光器调控实现智能化、便捷化。由于 2 μm 波长处于大部分激光材料的反常色散区和羟基吸收,其动力学过程比较复杂,特别是高峰值功率的超短脉冲容易产生孤子效应、脉冲分裂和谐振腔横模克尔自聚焦等非线性现象。为方便调控,可以通过遗传算法、神经网络等方法,训练人工智能,使其具备自主调控激光器以达到目标状态的能力,从而实现减少人力与提高精度的目标。此外,对激光各维度的实时探测,机器往往能相比人工更快获取信息从而更快地进行

实时调控。这对于未来激光器的进一步发展,提高激光器稳定性,扩展激光器功能以及推进激光器量产及商用有着极大的裨益。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20240348>

参 考 文 献:

- [1] 刘军,曾志男,梁晓燕,等. 超快超强激光及其科学应用发展趋势研究 [J]. 中国工程科学, 2020, 22(3): 42-48.
LIU J, ZENG Z N, LIANG X Y, *et al.* Development trend of ultrafast and ultraintense lasers and their scientific application [J]. *Strat Study CAE*, 2020, 22(3): 42-48. (in Chinese)
- [2] 马云聪,梁兆恒,凌琳,等. 智能调控多维激光技术与应用 [J]. 中国激光, 2023, 50(11): 1101004.
MA Y C, LIANG Z H, LING L, *et al.* Intelligent manipulation of multi-dimensional laser technologies and applications [J]. *Chin. J. Lasers*, 2023, 50(11): 1101004. (in Chinese)
- [3] HE C, SHEN Y J, FORBES A. Towards higher-dimensional structured light [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2022, 11(1): 205.
- [4] RICHARDSON D J. Filling the light pipe [J]. *Science*, 2010, 330(6002): 327-328.
- [5] FORBES A, DE OLIVEIRA M, DENNIS M R. Structured light [J]. *Nat. Photonics*, 2021, 15(4): 253-262.
- [6] BAI Y H, LV H R, FU X, *et al.* Vortex beam: generation and detection of orbital angular momentum [Invited] [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2022, 20(1): 012601.
- [7] PHILLIPS K C, GANDHI H H, MAZUR E, *et al.* Ultrafast laser processing of materials: a review [J]. *Adv. Opt. Photonics*, 2015, 7(4): 684-712.
- [8] MANCINI T, MOSETTI R, MARCELLI A, *et al.* Terahertz spectroscopic analysis in protein dynamics: current status [J]. *Radiation*, 2022, 2(1): 100-123.
- [9] KHONINA S N, KAZANSKIY N L, BUTT M A, *et al.* Optical multiplexing techniques and their marriage for on-chip and optical fiber communication: a review [J]. *Opto-Electron. Adv.*, 2022, 5(8): 210127.
- [10] WANG J, YANG J Y, FAZAL I M, *et al.* Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing [J]. *Nat. Photonics*, 2012, 6(7): 488-496.
- [11] DORRAH A H, CAPASSO F. Tunable structured light with flat optics [J]. *Science*, 2022, 376(6591): eabi6860.
- [12] LECLÈRE F M P, SCHOOF S, AUGER F, *et al.* Blood flow assessment with magnetic resonance imaging after 1.9 μm diode laser-assisted microvascular anastomosis [J]. *Lasers Surg. Med.*, 2010, 42(4): 299-305.
- [13] MALINAUSKAS M, ŽUKAUSKAS A, HASEGAWA S, *et al.* Ultrafast laser processing of materials: from science to industry [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2016, 5(8): e16133.
- [14] CHEN X Y, GAO Q, WANG X L, *et al.* Experimental design and parameter optimization for laser three-dimensional (3-D) printing [J]. *Lasers Eng.*, 2016, 33(1-3): 189-196.
- [15] LI Q, ZHANG P, FAN Y L, *et al.* 1.7 μm gain-switched and mode-locked hybrid Tm-Ho codoped fiber laser signal generation and optimization [J]. *Appl. Opt.*, 2022, 61(2): 455-462.
- [16] HENDERSON-SAPIR O, MALOUF A, BAWDEN N, *et al.* Recent advances in 3.5 μm erbium-doped mid-infrared fiber lasers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2017, 23(3): 0900509.
- [17] CHEN M C, ARPIN P, POPMINTCHEV T, *et al.* Bright, coherent, ultrafast soft X-ray harmonics spanning the water window from a tabletop light source [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2010, 105(17): 173901.
- [18] 沈德元,范滇元. 中红外激光器 [M]. 北京:国防工业出版社, 2015.
SHEN D Y, FAN D Y. *Mid-infrared Lasers* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015. (in Chinese)
- [19] GATTASS R R, MAZUR E. Femtosecond laser micromachining in transparent materials [J]. *Nat. Photonics*, 2008, 2(4): 219-225.
- [20] EBRAHIM-ZADEH M, VODOPYANOV K. Mid-infrared coherent sources and applications: introduction [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2016, 33(11): M1C1.
- [21] MANDON J, GUELACHVILI G, PICQUÉ N. Fourier transform spectroscopy with a laser frequency comb [J]. *Nat. Photonics*, 2009, 3(2): 99-102.
- [22] ZHU Q, SONG X Z, LI L Y, *et al.* Observation of 2 μm multiple annular structured vortex pulsed beams by cavity-mode tailoring [J]. *Opt. Lett.*, 2024, 49(13): 3709-3712.

- [23] 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.
- [24] 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(3): 399-402.
- [25] CHU S C, CHEN Y T, TSAI K F, *et al.* Generation of high-order Hermite-Gaussian modes in end-pumped solid-state lasers for square vortex array laser beam generation [J]. *Opt. Express*, 2012, 20(7): 7128-7141.
- [26] TAKAYUKI O, CHU S C, OTSUKA K. Generation of vortex beams from lasers with controlled Hermite- and Ince-Gaussian modes [J]. *Opt. Express*, 2008, 16(7): 5082-5094.
- [27] WAN Z S, SHEN Y J, GONG M L, *et al.* Quadrant-separable multi-singularity vortices manipulation by coherent superposed mode with spatial-energy mismatch [J]. *Opt. Express*, 2018, 26(26): 34940-34955.
- [28] CUI C, WANG L, ZHANG G, *et al.* Generation of high-power first-order Laguerre-Gaussian beam from a solid-state tm laser at $\sim 2 \mu\text{m}$ [C]. *Proceedings of the CLEO: Science and Innovations 2022, San Jose*, 2022: SF1B. 3.
- [29] MA Y Y, LEE A J, PASK H M, *et al.* Direct generation of 1 108 nm and 1 173 nm Laguerre-Gaussian modes from a self-Raman Nd:GdVO₄ laser [J]. *Opt. Express*, 2020, 28(16): 24095-24103.
- [30] JUNG G B, KANAYA K, OMATSU T. Highly efficient phase-conjugation of a 1 μm pico-second Laguerre-Gaussian beam [J]. *Opt. Express*, 2006, 14(6): 2250-2255.
- [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]. *Opt. Express*, 2007, 15(12): 7616-7622.
- [32] AADHI A, SAMANTA G K, KUMAR S C, *et al.* Controlled switching of orbital angular momentum in an optical parametric oscillator [J]. *Optica*, 2017, 4(3): 349-355.
- [33] ISHAAYA A A, DAVIDSON N, FRIESEM A A. Very high-order pure Laguerre-Gaussian mode selection in a passive Q-switched Nd:YAG laser [J]. *Opt. Express*, 2005, 13(13): 4952-4962.
- [34] WEI D Z, CHENG Y, NI R, *et al.* Generating controllable Laguerre-Gaussian laser modes through intracavity spin-orbital angular momentum conversion of light [J]. *Phys. Rev. Appl.*, 2019, 11(1): 014038.
- [35] HUANG Y J, CHIANG P Y, LIANG H C, *et al.* High-power Q-switched laser with high-order Laguerre-Gaussian modes: application for extra-cavity harmonic generations [J]. *Appl. Phys. B*, 2011, 105(2): 385-390.
- [36] ISHAAYA A A, DAVIDSON N, MACHAVARIANI G, *et al.* Efficient selection of high-order Laguerre-Gaussian modes in a Q-switched Nd:YAG laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2003, 39(1): 74-82.
- [37] RAO A S, MOROHASHI T, KERRIDGE-JOHNS W R, *et al.* Generation of higher-order Laguerre-Gaussian modes from a diode-pumped Pr³⁺:LiYF₄ laser with an intra-cavity spherical aberration [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2023, 40(2): 406-411.
- [38] MEENA H K, PANT B, SINGH B K. Controllable experimental modulation of high-order Laguerre-Gaussian laser modes [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2023, 40(9): 1770-1778.
- [39] BELL T, HASNAOUI A, AIT-AMEUR K, *et al.* Excitation of high-radial-order laguerre-gaussian modes in a solid-state laser using a lower-loss digitally controlled amplitude mask [J]. *J. Opt.*, 2017, 19(10): 105604.
- [40] SHENG Q, WANG A H, GENG J N, *et al.* Ultra-high-order Laguerre-Gaussian field generated directly from a laser cavity with spherical aberration [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2023, 17(8): 2300369.
- [41] ZHAO Y G, WANG L, CHEN W D, *et al.* Structured laser beams: toward 2- μm femtosecond laser vortices [J]. *Photonics Res.*, 2021, 9(3): 357-363.
- [42] LIU J, ZHANG N, SONG Q S, *et al.* Tunable and mode-locked Tm, Ho:GdScO₃ laser [J]. *Opt. Letter*, 2024, 49(8): 2145-2148.
- [43] CHO W B, SCHMIDT A, YIM J H, *et al.* Passive mode-locking of a Tm-doped bulk laser near 2 μm using a carbon nanotube saturable absorber [J]. *Opt. Express*, 2009, 17(13): 11007-11012.
- [44] LIU J L, LIN J Q, CHEN X Y, *et al.* A 1.9 μm Tm:YLF external cavity mode conversion vortex laser based on LD off-axis pump [J]. *Opt. Commun.*, 2021, 482: 126596.
- [45] TONG L Y, CHEN C D, CAI Y J, *et al.* Pulsed optical vortex array generation in a self-Q-switched Tm:YALO₃ laser [J]. *Materials*, 2024, 17(5): 1144.
- [46] DU T Y, ZHENG C S, SUN X Z, *et al.* Wavelength-tunable Tm:Y₂O₃ ceramic vortex laser with a changeable orbital

- angular momentum state [J]. *Appl. Opt.*, 2024, 63(5): 1217-1221.
- [47] TONG L Y, YUAN Y, ZHANG W Y, *et al.* High-power picosecond structured optical vortices directly generated in an all-solid-state laser [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2022, 155: 108396.
- [48] CHEN Y, DING M M, WANG J L, *et al.* High-energy 2 μm pulsed vortex beam excitation from a Q-switched Tm: LuYAG laser [J]. *Opt. Lett.*, 2020, 45(3): 722-725.
- [49] ZHAO Y G, LIU Q Y, ZHOU W, *et al.* ~ 1 mJ pulsed vortex laser at 1 645 nm with well-defined helicity [J]. *Opt. Express*, 2016, 24(14): 15596-15602.
- [50] LAGATSKY A A, SUN Z, KULMALA T S, *et al.* 2 μm solid-state laser mode-locked by single-layer graphene [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, 102(1): 013113.
- [51] COLUCELLI N, GALZERANO G, GATTI D, *et al.* Passive mode-locking of a diode-pumped Tm: GdLiF₄ laser [J]. *Appl. Phys. B*, 2010, 101, 75-78.
- [52] SCHMIDT A, PARISI D, VERONESI S, *et al.* Passive mode-locking of a Tm: YLF laser [C]. *Proceedings of the CLEO: Science and Innovations 2011, Baltimore*, 2011: CMY5.
- [53] YANG K J, DEKORSY T, ZHENG L H, *et al.* Efficient tunable continuous wave laser operation of Tm: LuYSiO₅ at room temperature [C]. *Advanced Solid-State Photonics, San Diego, California*, 2012: AT4A-11.
- [54] QIN Z P, XIE G Q, KONG L C, *et al.* Diode-pumped passively mode-locked Tm: CaGdAlO₄ laser at 2 μm wavelength [J]. *IEEE Photonics J.*, 2015, 7(1): 1500205.
- [55] KONG L C, QIN Z P, XIE G Q, *et al.* Dual-wavelength synchronous operation of a mode-locked 2 μm Tm: CaYAlO₄ laser [J]. *Opt. Lett.*, 2015, 40(3): 356-358.
- [56] HOU J, ZHANG B T, SU X C, *et al.* High efficient mode-locked Tm: YAP laser emitting at 1 938 nm by SESAM [J]. *Opt. Commun.*, 2015, 347: 88-91.
- [57] ZHOU W, XU X D, XU R, *et al.* Watt-level broadly wavelength tunable mode-locked solid-state laser in the 2 μm water absorption region [J]. *Photonics Res.*, 2017, 5(6): 583-587.
- [58] LAN J, XU B, ZHOU Z, *et al.* High-power CW and Q-switched Tm: CaYAlO₄ lasers at 1.94 μm for shallow water absorption [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2017, 29(23), 2127-2130.
- [59] ZHANG B, LI L, HE C J, *et al.* Compact self-Q-switched Tm: YLF laser at 1.91 μm [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2018, 100: 103-108.
- [60] ZHANG S, ZHANG X L, HUANG J, *et al.* Self-mode-locking operation of a diode-end-pumped Tm: YAP laser with watt-level output power [J]. *Laser Phys.*, 2018, 28(3): 035804.
- [61] MAO Y F, & WANG L. Study of high power Tm: YLF Innoslab wavelength-selected laser [J]. *Laser Phys.*, 2019, 29(11): 115004.
- [62] ZHOU W, HUANG H, CHEN X, *et al.* 2 μm vector mode-locked pulses from Tm: Y₂O₃ ceramics laser [J]. *Laser Phys.*, 2019, 29(4): 045301.
- [63] THOUROUDE R, GILLES H, TYAZHEV A, *et al.* Widely tunable Tm: CaF₂ laser in-band pumped by a fiber laser at 1 610 nm [C]. *Proceedings of the 2019 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference, Munich*, 2019.
- [64] LING W, XIA T, SUN R, *et al.* Low threshold, high efficiency passively mode-locked picosecond Tm, Ho: LiLuF₄ laser [J]. *Front. Phys.*, 2020, 7: 216.
- [65] CAO X, ZHU Q, XIAN A H, *et al.* Ultrafast Tm: CaYAlO₄ laser with pulse regulation and saturation parameters evolution in the 2 μm water absorption band [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2022, 152: 108096.
- [66] MAO J J, HU P, ZHOU X, *et al.* All-solid-state ultrafast 2 μm laser with 1.83 W output power [J]. *Appl. Opt.*, 2024, 63: 2746-2749.
- [67] POLYANSKIY M N, BABZIEN M, POGORELSKY I V. Chirped-pulse amplification in a CO₂ laser [J]. *Optica*, 2015, 2(8): 675-681.
- [68] PADGETT M, BOWMAN R. Tweezers with a twist [J]. *Nat. Photonics*, 2011, 5(6): 343-348.
- [69] KAPALE K T, DOWLING J P. Vortex phase qubit: generating arbitrary, counterrotating, coherent superpositions in Bose-Einstein condensates via optical angular momentum beams [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, 95(17): 173601.
- [70] TAMBURINI F, ANZOLIN G, UMBRIACO G, *et al.* Overcoming the Rayleigh criterion limit with optical vortices [J].

- Phys. Rev. Lett.*, 2006, 97(16): 163903.
- [71] HAMAZAKI J, MORITA R, CHUJO K, *et al.* Optical-vortex laser ablation [J]. *Opt. Express*, 2010, 18(3): 2144-2151.
 - [72] ZHU Z Y, JANASIK M, FYFFE A, *et al.* Compensation-free high-dimensional free-space optical communication using turbulence-resilient vector beams [J]. *Nat. Commun.*, 2021, 12(1): 1666.
 - [73] LIU C X, GUO Z Y, LI Y, *et al.* Manipulating ellipsoidal micro-particles by femtosecond vortex tweezers [J]. *J. Opt.*, 2015, 17(3): 035402.
 - [74] PETROVICH M N, POLETTI F, WOOLER J P, *et al.* Demonstration of amplified data transmission at 2 μm in a low-loss wide bandwidth hollow core photonic bandgap fiber [J]. *Opt. Express*, 2013, 21(23): 28559-28569.
 - [75] NIVAS J J J, HE S T, RUBANO A, *et al.* Direct femtosecond laser surface structuring with optical vortex beams generated by a q-plate [J]. *Sci. Rep.*, 2015, 5(1): 17929.
 - [76] POLYNKIN P, AMENT C, MOLONEY J V. Self-focusing of ultraintense femtosecond optical vortices in air [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2013, 111(2): 023901.
 - [77] GÉNEAUX R, CAMPER A, AUGUSTE T, *et al.* Synthesis and characterization of attosecond light vortices in the extreme ultraviolet [J]. *Nat. Commun.*, 2016, 7: 12583.
 - [78] NGCOBO S, LITVIN I, BURGER L, *et al.* A digital laser for on-demand laser modes [J]. *Nat. Commun.*, 2013, 4: 2289.
 - [79] MARRUCCI L, MANZO C, PAPARO D. Optical spin-to-orbital angular momentum conversion in inhomogeneous anisotropic media [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, 96(16): 163905.
 - [80] SROOR H, HUANG Y W, SEPHTON B, *et al.* High-purity orbital angular momentum states from a visible metasurface laser [J]. *Nat. Photonics*, 2020, 14(8): 498-503.
 - [81] KARIMI E, SCHULZ S A, DE LEON I, *et al.* Generating optical orbital angular momentum at visible wavelengths using a plasmonic metasurface [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2014, 3(5): e167.
 - [82] NAIDOO D, ROUX F S, DUDLEY A, *et al.* Controlled generation of higher-order Poincaré sphere beams from a laser [J]. *Nat. Photonics*, 2016, 10(5): 327-332.
 - [83] QIAO Z, KONG L C, XIE G Q, *et al.* Ultraclean femtosecond vortices from a tunable high-order transverse-mode femtosecond laser [J]. *Opt. Lett.*, 2017, 42(13): 2547-2550.
 - [84] YUSUFU T, TOKIZANE Y, YAMADA M, *et al.* Tunable 2 μm optical vortex parametric oscillator [J]. *Opt. Express*, 2012, 20(21): 23666-23675.
 - [85] CAO X, LIU Y Y, XIAN A H, *et al.* Direct generation of ultrafast vortex beam from a Tm:CaYAlO₄ oscillator featuring pattern matching of a folded-cavity resonator [J]. *Opt. Express*, 2021, 29(24): 39312-39322.
 - [86] ZHANG W Y, TONG L Y, YUAN Y, *et al.* Self-Q-switched Tm:YAP vortex laser by thermal-lensing effect [J]. *Infrared Phys. Technol.*, 2022, 123: 104197.
 - [87] LIU Y Y, LI L Y, SONG X Z, *et al.* 2 μm cylindrical vector beam generation from a c-cut Tm:CaYAlO₄ crystal resonator [J]. *Opt. Express*, 2023, 31(6): 9387-9394.
 - [88] KANG H, XU T, MIAO K R, *et al.* Mode-locked cylindrical vector vortex beam unlocked the generation of a 2 μm multi-dimensional ultrafast laser [J]. *Opt. Express*, 2025, 33(6): 13001-13009.
 - [89] LU H Y, XU H, ZHAO J Y, *et al.* A deep ultraviolet mode-locked laser based on a neural network [J]. *Sci. Rep.*, 2020, 10(1): 116.
 - [90] GUO P, FAN M Y, LI H R, *et al.* Intelligent laser emitting and mode locking of solid-state lasers using human-like algorithms [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2024, 18(8): 2301209.
 - [91] HENDERSON S W, SUNI P J M, HALE C P, *et al.* Coherent laser radar at 2 μm using solid-state lasers [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1993, 31(1): 4-15.
 - [92] HOSTEN O, KWIAT P. Observation of the spin Hall effect of light *via* weak measurements [J]. *Science*, 2008, 319(5864): 787-790.
 - [93] ZHOU X X, LING X H, LUO H L, *et al.* Identifying graphene layers *via* spin Hall effect of light [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 101(25): 251602.
 - [94] ZHENG D D, LIU S Q, YANG Q, *et al.* Measurement of the surface susceptibility of single-layer atomic crystal by the

- photonic spin Hall effect in momentum space [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2024, 124(7): 071108.
- [95] CHEN Y, XIA K Y, SHEN W G, *et al.* Vector vortex beam emitter embedded in a photonic chip [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2020, 124(15): 153601.
- [96] QU T, LI H Y, WU Z S, *et al.* Scattering of aerosol by a high-order Bessel vortex beam for multimedia information transmission in atmosphere [J]. *Multimed. Tools Appl.*, 2020, 79(45): 34159-34171.
- [97] FAN W R, CHEN T R, TANG X B, *et al.* Spatial multiplexing for robust optical vortex transmission with optical nonlinearity [J]. *Opt. Express*, 2023, 31(19): 31610-31621.
- [98] CHENG J, LIU C S, SHANG S, *et al.* A review of ultrafast laser materials micromachining [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2013, 46: 88-102.
- [99] VOISIAT B, GAPONOV D, GEČYS P, *et al.* Material processing with ultra-short pulse lasers working in 2 μm wavelength range [C] *Proceedings of SPIE 9350, Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing, San Francisco*, 2015: 120-127.
- [100] ZHANG B, WANG Z, TAN D Z, *et al.* Ultrafast laser-induced self-organized nanostructuring in transparent dielectrics: fundamentals and applications [J]. *Photonix*, 2023, 4(1): 24.
- [101] LEI Y H, SHAYEGANRAD G, WANG H J, *et al.* Efficient ultrafast laser writing with elliptical polarization [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2023, 12(1): 74.
- [102] WANG C Y, HERR T, DEL' HAYE P, *et al.* Mid-infrared optical frequency combs at 2.5 μm based on crystalline microresonators [J]. *Nat. Commun.*, 2013, 4: 1345.
- [103] ISRAESEN N M, PETERSEN C R, BARH A, *et al.* Real-time high-resolution mid-infrared optical coherence tomography [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2019, 8: 11.



宋晓钊(2002-),男,江苏无锡人,硕士研究生,2024年于江苏师范大学获得学士学位,主要从事掺Tm激光器多维调控方面的研究。
E-mail: 18006195036@163.com



周伟(1983-),男,陕西宝鸡人,博士,副教授,硕士生导师,2013年于西安交通大学获得博士学位,主要从事2 μm 超快光纤激光器、超快固体激光器及智能化等方面的研究。
E-mail: zhwwcunt@163.com