

基于扭摆腔结构的双腔双频激光器研究

高万雨 高艺轩 高兰兰

Dual-cavity dual-frequency laser based on twisted-mode cavity structure

GAO Wanyu, GAO Yixuan, GAO Lanlan

引用本文:

高万雨, 高艺轩, 高兰兰. 基于扭摆腔结构的双腔双频激光器研究[J]. 应用光学, 2026, 47(1): 213–218. DOI: 10.5768/JAO202647.0107001

GAO Wanyu, GAO Yixuan, GAO Lanlan. Dual-cavity dual-frequency laser based on twisted-mode cavity structure[J]. Journal of Applied Optics, 2026, 47(1): 213–218. DOI: 10.5768/JAO202647.0107001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202647.0107001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于标准具选模的单纵模声光调Q Nd:YVO₄激光器

Single-longitudinal-mode acousto-optic Q-switched Nd:YVO₄ laser using Fabry–Perot etalon

应用光学. 2024, 45(6): 1307–1313 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0607004>

基于腔内滤波效应的双波长光纤激光器

Experimental and simulation study of dual-wavelength fiber laser based on intracavity filtering effect

应用光学. 2024, 45(5): 1079–1084 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0508001>

多维度脉冲复用传输的单腔多光梳光纤激光器

Single-cavity multi-comb fiber laser based on mechanism of multi-dimensional pulse multiplexing transmission

应用光学. 2025, 46(2): 458–464 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0208001>

单腔双光梳拍频信号包络提取方法

Beat frequency signal envelope extraction based on single-cavity dual-comb

应用光学. 2023, 44(4): 914–919 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0408001>

半外腔Nd:YAG和Nd:YVO₄微片固体激光器的腔调谐特性研究

Characteristics of cavity tuning of half-external cavity Nd:YAG and Nd:YVO₄ microchip solid-state lasers

应用光学. 2023, 44(2): 437–443 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0207002>

基于可重构微波光子滤波器的双频光电振荡器

Dual-frequency optoelectronic oscillator based on reconfigurable microwave photonic filters

应用光学. 2025, 46(6): 1300–1308 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0612012>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2026) 01-0213-06

引用格式: 高万雨, 高艺轩, 高兰兰. 基于扭摆腔结构的双腔双频激光器研究 [J]. 应用光学, 2026, 47(1): 213-218.

GAO Wanyu, GAO Yixuan, GAO Lanlan. Dual-cavity dual-frequency laser based on twisted-mode cavity structure[J]. Journal of Applied Optics, 2026, 47(1): 213-218.



在线阅读

基于扭摆腔结构的双腔双频激光器研究

高万雨, 高艺轩, 高兰兰

(长春理工大学 物理学院, 吉林 长春 130000)

摘 要: 为实现正交线偏振单纵模双频激光输出并抑制空间烧孔效应, 基于扭摆腔结构设计了一种双腔双频 Nd:YAG 激光系统。分析了扭摆腔的工作原理, 得到了驻波场的能量分布; 设计了一种基于扭摆腔的双腔双频 Nd:YAG 激光器, 采用偏振分光棱镜作为偏振元件, 使激光器的两个驻波腔均能以单纵模振荡的方式工作。实验结果表明: 当泵浦功率为 2 W 时, 直腔输出功率为 5.76 mW, L 腔输出功率为 1.97 mW, 两个子腔均实现了正交线偏振 1 064 nm 单纵模激光输出, 有效抑制了空间烧孔效应。结果证实了扭摆腔结构在实现双频激光同轴输出方面具有显著优势。

关键词: 扭摆腔; 单纵模; 双频激光器; 空间烧孔效应

中图分类号: TN248.1

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202647.0107001

Dual-cavity dual-frequency laser based on twisted-mode cavity structure

GAO Wanyu, GAO Yixuan, GAO Lanlan

(School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130000, China)

Abstract: To achieve orthogonally linearly polarized single-longitudinal-mode dual-frequency laser output and suppress spatial hole-burning effects, a dual-cavity dual-frequency Nd:YAG laser system was designed based on a twisted-mode cavity configuration. The working principle of the twisted-mode cavity laser was analyzed theoretically, and the energy distribution of the standing wave field was obtained. A two-cavity dual-frequency Nd:YAG laser based on twisted-mode cavity was designed. The polarization splitting prism was used as the polarization element to enable the two standing wave cavities to operate in a single longitudinal mode oscillation. The orthogonal linear polarization 1 064 nm dual-frequency laser output was obtained, which means that the spatial hole burning effect was effectively suppressed. Experimental results demonstrate that at a pump power of 2 W, the straight sub-cavity delivers an output power of 5.76 mW, while the L-shaped sub-cavity produces 1.97 mW. Both sub-cavities achieve orthogonally linearly polarized single-longitudinal-mode laser outputs at 1 064 nm, effectively suppressing spatial hole-burning effects. These findings conclusively validate that the twisted-mode cavity configuration exhibits remarkable advantages in enabling coaxial dual-frequency laser output.

Key words: twisted-mode cavity; single longitudinal mode; dual-frequency laser; spatial hole burning effect

引言

为了实现具有正交线偏振特性的固体激光器单纵模双频激光输出, 通常采用双折射滤光片、法

布里-珀罗标准具、短腔设计、扭摆腔模法及环形行波腔设计等^[1]。其中, 由于扭摆腔模法具有结构简单、调节方便且插入损耗小的优点, 更适合结构

收稿日期: 2024-12-27; 修回日期: 2025-01-26

基金项目: 吉林省科技厅国际合作项目 (20220402021GH)

第一作者: 高万雨, E-mail: 859261574@qq.com

通信作者: 高兰兰, E-mail: 865781943@qq.com

紧凑且高效率的单纵模固体激光器^[2]。1965年, SIEGMAN A E等^[3]首次提出扭摆腔模的概念, 自此扭摆腔技术得到了迅速发展^[4-16]。例如, 2022年, 西北大学魏哲等^[17]采用扭摆模结构, 通过改变两个波片间的夹角, 实现了单纵模激光的分裂, 生成了两个相互正交线偏振的纵模, 最终得到了频差可调谐的双频激光器。2024年, MITTEN D等^[18]采用扭摆腔结构和腔内倍频技术实现了高功率激光输出。由于扭摆腔结构在实现单纵模双频激光输出方面具有显著优势, 因此, 本文将对其工作原理进行深入分析, 并基于此设计了一种双腔双频 Nd:YAG 激光系统。

首先, 对扭摆腔工作原理进行了分析, 得到了增益介质中光场能量可沿谐振腔轴向均匀分布的结果; 其次, 采用偏振分光棱镜作为偏振元件, 设计了具有扭摆腔结构的双腔双频 Nd:YAG 激光系统, 使激光在两个谐振腔中均能以单纵模方式振荡。结果表明, 基于扭摆腔结构的双腔双频激光器能够有效抑制空间烧孔效应, 实现正交线偏振的 1 064 nm 激光输出。

1 扭摆腔工作原理

扭摆腔的工作原理是通过在激光晶体两侧放置一对快轴方向相互垂直的 1/4 波片, 并使波片的快轴与偏振片的偏振方向成 45°角, 从而构成扭摆腔。接下来, 通过理论推导对其光场的电场强度动态变化过程进行分析。图 1 为扭摆腔结构单频 Nd:YAG 激光系统。

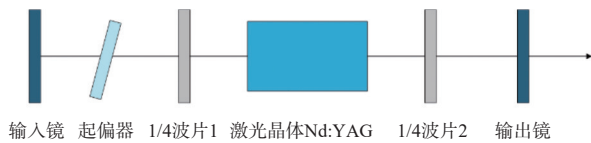


图 1 扭摆腔单频结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of single frequency structure of twisted-mode cavity

扭摆腔在工作过程中光偏振态变化情况如下, 其中 z 轴为设定的光传输方向, x 轴方向与纸面平行, y 轴方向与纸面垂直。入射光经偏振片变成竖直偏振光, 由琼斯矩阵对该过程进行计算可得:

$$\mathbf{E}_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} * \mathbf{E} e^{-ikz} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{E} e^{-ikz} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $k=2\pi/\lambda$, λ 为振荡激光的波长; $\mathbf{E}$ 为入射光的

电场矢量; $\mathbf{E}_0$ 为通过偏振片后的输出光电场矢量。由式(1)分析可得, 入射光通过偏振片后, 出射光电场仅在一个固定平面上振动, 电矢量不存在旋转, 且仅 y 方向上的分量存在振动, 而在 x 方向上的分量则无变化, 即成为竖直偏振光。

竖直偏振光经第一个 1/4 波片后, 变成左旋圆偏振光, 由琼斯矩阵对该过程进行计算可得:

$$\mathbf{E}_1 = \mathbf{A}_{QWP} * \mathbf{E} * \mathbf{E}_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \mathbf{E} e^{-ikz} \begin{bmatrix} -i \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \mathbf{E} e^{-i(kz+\frac{\pi}{2})} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{A}_{QWP}$ 为 1/4 波片的琼斯矩阵; $\mathbf{E}_1$ 为光通过第一个 1/4 波片后的电场矢量。由式(2)分析可得, 第一步得到的竖直偏振光在通过第一个 1/4 波片后, 出射光电矢量随时间旋转, 在 y 方向相对于 x 方向具有 $\pi/2$ 的相位差。当面向光波传播方向时, 电场矢量呈逆时针旋转, 形成了左旋圆偏振光。左旋圆偏振光再经第二个 1/4 波片后, 变成水平线偏振光, 由琼斯矩阵对该过程进行计算可得:

$$\mathbf{E}_2 = \mathbf{A}_{QWP} * \mathbf{E} * \mathbf{E}_1 = \mathbf{E} e^{-i(kz+\frac{\pi}{2})} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, $\mathbf{E}_2$ 为光通过第二个 1/4 波片后的电场矢量。由式(3)分析可得, 第二步得到的左旋圆偏振光在通过第二个 1/4 波片后, 出射光电场仅在一个平面内振动, 电矢量无旋转, 且仅 x 方向上的分量存在振动, y 方向不存在振动, 即成为水平线偏振光。

水平线偏振光反射后再经第二个 1/4 波片变成右旋圆偏振光, 由琼斯矩阵对该过程进行计算可得:

$$\mathbf{E}_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} \mathbf{E} e^{-i(2kl-kz-\frac{\pi}{2})} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{E}_3$ 为光在反射后再次通过第二个 1/4 波片的电场矢量; l 表示为谐振腔的光学长度。由式(4)分析可得, 第一步得到的竖直偏振光在通过 1/4 波片后, 出射光电矢量随时间旋转, 在 y 方向相对于 x 方向具有 $-\pi/2$ 的相位差。当面向光波传播方向时, 电场矢量呈顺时针旋转, 形成了右旋圆偏振光。

将式(2)与式(4)得到的左旋圆偏振光与右旋圆偏振光进行叠加, 由琼斯矩阵对该过程进行计算可得:

$$\mathbf{E}_4 = \frac{1}{\sqrt{2}} \mathbf{E} \begin{bmatrix} e^{-i(kz+\frac{\pi}{2})} + e^{-i(2kl-kz-\frac{\pi}{2})} \\ e^{-ikz} + e^{-i(2kl-kz-\pi)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, $\mathbf{E}_4$ 为左旋与右旋圆偏振光叠加后的电场矢

量。由式(5)分析可得,第二步得到的左旋圆偏振光与第四步得到的右旋圆偏振光叠加后,出射光电场在 x 方向与 y 方向上的分量均存在振动,且叠加后的光为方向确定的线偏振光,其相位关系是固定的。

将式(5)叠加后的左旋圆偏振光与右旋圆偏振光的 x 方向和 y 方向的电场分量作平方处理并相加可得到增益介质中的光场分布,即:

$$I = E_{4x}^2 + E_{4y}^2 = 4E^2 e^{-2ikl} \quad (6)$$

式中 I 为光强。式(6)中不包含 z ,即与 z 无关。因此在激光增益介质中的驻波场能量是均匀分布的,可以有效抑制空间烧孔和模式竞争,保证Nd:YAG激光器的单纵模运转。

2 扭摆腔结构激光器

图2所示为基于扭摆腔结构的双腔双频激光器结构。半导体激光二极管(laser diode array, LDA)的中心波长为808 nm,其最大输出功率为25.58 W。LDA出射的泵浦光经耦合透镜通过输入镜(AR@808 nm; HR@1 064 nm)后,聚焦到Nd:YAG晶体(左端面:AR@808 nm, $T>95\%$; AR@1 064 nm, $T>99.8\%$;右端面:AR@1 064 nm, $T>99.8\%$;尺寸为3 mm×3 mm×2 mm,其中通光的有效长度为2 mm,掺杂原子浓度为1.1%, T 为透射率)。在Nd:YAG激光晶体的两侧端面分别放置了两个快轴垂直排列的1/4波片,即QWP₁(AR@1 064 nm, $T>98\%$)和QWP₂(AR@1 064 nm, $T>98\%$),在QWP₂的右方放置偏振分光棱镜PBS₁,且QWP₁的快轴与偏振分光棱镜PBS₁(对P光, $T=95\%$;对S光, $R=99.9\%$, R 为反射率)的P偏振光、S偏振光的透射轴之间的角度均为45°。输出镜OC₂和OC₁的参数均是直径4 mm, HR@1 064 nm; $R>99\%$ 。经由OC₁、OC₂输出的激光再分别由反射镜M₁、M₂(HR@1 064 nm)汇聚到PBS₂(对P偏振光, $T=95\%$;对S偏振光, $R=99.9\%$)中进行合束,最终实现1 064 nm的正交偏振双频激光同轴输出。

由图2可知,QWP₁、QWP₂和PBS₁构成扭摆腔结构,QWP₁的左侧介质膜与OC₂形成了一个直线型的驻波谐振腔,而与OC₁则形成了一个L型的驻波谐振腔。为了更容易观察两路同时振荡时各自纵模的情况,设计了两个不同腔长的光路,直腔腔长为75 mm,L腔腔长为90 mm,双腔双频激光器的直腔和L腔共用Nd:YAG激光晶体与扭摆腔结构。

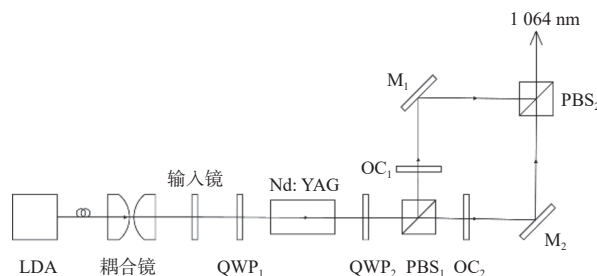


图2 基于扭摆腔的双腔双频激光器结构

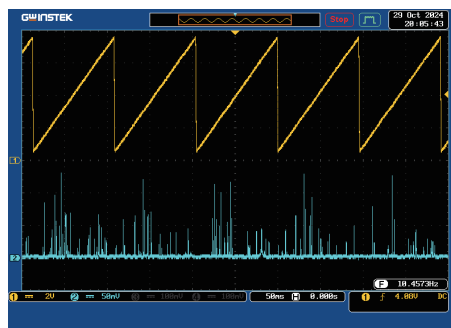
Fig. 2 Dual-cavity dual-frequency laser structure based on twisted-mode cavity

3 实验结果及分析

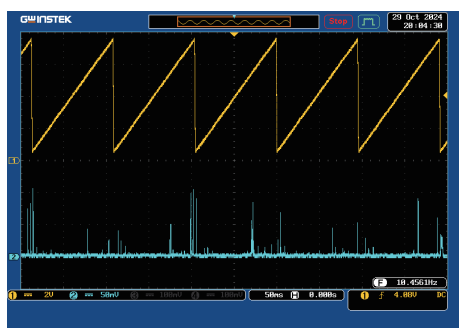
3.1 单腔单频激光振荡特性

在图2所示的双腔双频激光器结构示意图中,将挡光板分别放置在OC₁和OC₂后,可以抑制L腔或直腔的激光振荡,从而使两个谐振腔能够单独起振,进而观察其输出情况。实验中,采用的F-P扫描干涉仪型号为SA 200-8B(Thorlabs),自由光谱范围为1.5 GHz。在谐振腔内放置了两个1/4波片,确保第一个1/4波片的快轴与第一个偏振分光棱镜的P光和S光的透光轴均形成45°夹角,但第二个1/4波片的快轴方向与第一个1/4波片的快轴方向平行放置,此时,未构成扭摆腔结构。将输出光接入F-P扫描干涉仪,在示波器上观察腔内激光振荡情况如图3所示,可以看到两个腔均为多个纵模振荡。

旋转第二个1/4波片的放置角度,使其快轴方向与第一个1/4波片快轴方向垂直,并确保第一个1/4波片的快轴与第一个偏振分光棱镜的P光、S光的透光轴均形成45°夹角。此时分别观察谐振腔的纵模情况,结果如图4所示,两个谐振腔分别实现了单纵模振荡输出。说明扭摆腔可以有效削弱空间烧孔效应,使激光器实现单纵模输出。

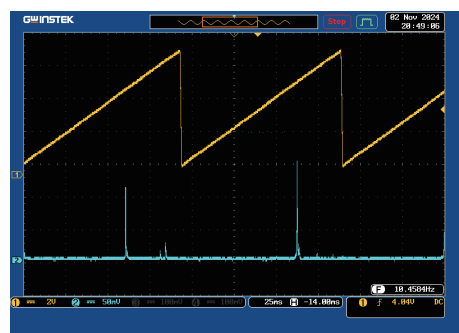


(a) L腔

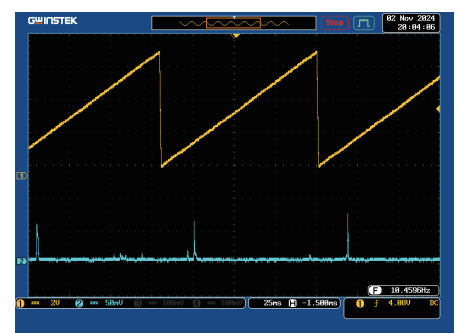


(b) 直腔

图3 无扭摆腔结构谐振腔输出光的纵模图
Fig.3 Longitudinal mode diagram of output light of a resonator with a twisted-mode cavity structure



(a) 直腔单纵模输出图



(b) L腔单纵模输出图

图4 扭摆腔结构下的直腔/L腔输出光的波形图

Fig.4 Waveform diagram of output light of straight cavity and L cavity in twisted-mode cavity structure

3.2 双腔双频输出特性

图5为直腔和L腔产生的单纵模激光通过偏振分光棱镜耦合后的纵模输出情况。两个谐振腔均以单纵模形式振荡且存在一定的频差,实现了基于扭摆腔结构的双腔双频激光单纵模的同轴输出。

3.3 功率特性

将功率计(PM100D Thorlabs)的探测头分别放置在直腔、L腔输出镜后,通过改变泵浦源的输入功率分别测量直腔和L腔的输出功率。如图6所示为利用Origin软件绘制的泵浦源输入功率与直

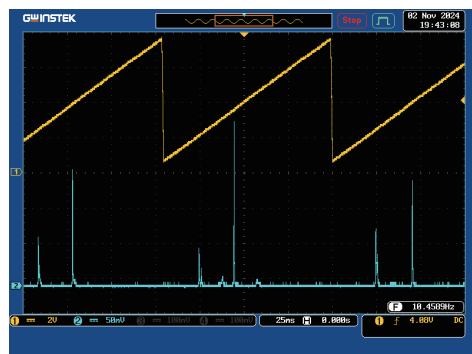


图5 扭摆腔结构下的双腔双频单纵模输出特性

Fig.5 Output characteristics of double cavity double frequency single longitudinal mode under twisted-mode cavity structure

腔、L腔输出功率变化的曲线。实验测得直腔和L腔的阈值泵浦功率均约为0.2 W,当泵浦功率均为2 W时,测得直腔和L腔的输出功率分别为5.76 mW和1.97 mW。可知,直腔的输出功率优于L腔输出功率。这主要是由于直腔腔长(75 mm)较L腔腔长(90 mm)短,激光在直腔内的振荡过程中损耗少。激光器转换效率低的主要原因是模式不匹配(振荡光斑半径为0.1 mm,泵浦光斑半径为0.2 mm,比值为1/2),对泵浦光利用效率低。在30 min内,直腔输出功率的标准差为114.66 μ W,稳定性为2%,L腔输出功率的标准差为19.96 μ W,稳定性为0.97%。

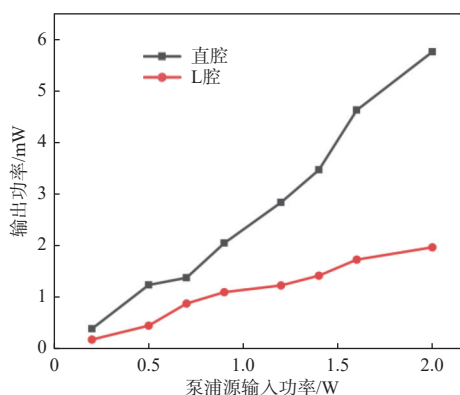


图6 直腔/L腔输出功率特性

Fig.6 Output power characteristics of straight cavity and L cavity

3.4 偏振特性

采用格兰-激光偏振棱镜对直腔和L腔输出的激光偏振特性进行检验。将棱镜分别置于两个谐振腔的输出镜后方,并在垂直于激光光轴的平面上旋转。通过Origin软件绘制了格兰棱镜旋转角度与激光透射率的关系,结果如图7所示。实验结

果表明,直腔和L腔单频激光的透射率随格兰棱镜旋转角度变化时分别遵循余弦和正弦规律,两者的变化周期均为 180° ,与马吕斯定律一致。这表明,直腔和L腔输出的 $1\,064\,\text{nm}$ 单频激光均为线性偏振光,且偏振方向相互正交,其中直腔输出为P偏振光,L腔输出为S偏振光。

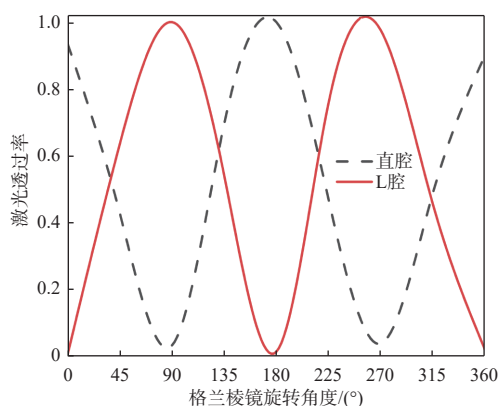


图7 激光透射率与格兰棱镜旋转角度的关系

Fig. 7 Relationship between laser transmittance and rotation angle of Gran prism

4 结论

本文通过分析扭摆腔工作原理,得到了其能够在激光增益介质中形成能量均匀分布的驻波场。在此基础上,设计了基于扭摆腔结构的双腔双频Nd:YAG激光器系统,使两个谐振腔同时以线偏振单纵模振荡输出。实现了 $1\,064\,\text{nm}$ 激光的单纵模输出,为后续相关研究提供参考。

参考文献:

- [1] 邢俊红,焦明星. 扭转模结构双腔双频 Nd:YAG 激光器[J]. 光子学报, 2015, 44(2): 142-147.
XING Junhong, JIAO Mingxing. Twisted-mode structure dual-cavity dual-frequency Nd:YAG laser[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(2): 142-147.
- [2] 朱浩,王博浩,陶家友,等. 扭转模腔法输出单纵模激光研究[J]. 湖南理工学院学报(自然科学版), 2021, 34(3): 13-17.
ZHU Hao, WANG Bohao, TAO Jiayou, et al. Research on single-longitudinal-mode laser output based on twisted-mode cavity method[J]. Journal of Hunan Institute of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 34(3): 13-17.
- [3] EVTUHOV V, SIEGMAN A E. Twisted-mode technique for obtaining axially uniform energy density in a laser cavity[J]. Applied Optics, 1965, 39(4): 142-143.
- [4] ADAMS C S, VORBERG J, MLYNEK J. Single-frequency operation of a diode-pumped lanthanum-neodymium hexaaluminate laser by using a twisted-mode cavity[J]. Optics Letters, 1993, 18(6): 420-422.
- [5] NAKAGAWA K, SHIMIZU Y, OHTSU M. High power diode-laser pumped twisted-mode Nd:YAG[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1994, 6(4): 499-501.
- [6] FANTRY O, OCHOA J. Tunable single-frequency Yb:YAG laser with 1 W output power using twisted-mode technique[J]. Photonics Technology Letters, 1995, 7: 1137-1138.
- [7] CHANG D I, GU M J, HERNIKOV S V, et al. Single-frequency erbium fiber laser using the twisted-mode technique[J]. Electronics Letters, 1996, 32(19): 1786-1787.
- [8] POLYNKIN P, POLYNKIN A, MANSURIPUR M, et al. Single-frequency laser oscillator with watt-level output power at $1.5\,\mu\text{m}$ by use of a twisted-mode technique[J]. Optics Letters, 2005, 30(20): 2745-2747.
- [9] HAO E, TAN H, LI T, et al. Single-frequency laser at $473\,\text{nm}$ by use of twisted-mode technique[J]. Optics Communications, 2007, 270: 327-331.
- [10] ZHANG Y, GAO C, GAO M, et al. A diode pumped tunable single-frequency Tm:YAG laser using twisted-mode technique[J]. Laser Physics Letters, 2010, 7(1): 17-20.
- [11] 李小丽,谈宜东,杨昌喜,等. 基于扭转模腔的全固态单纵模拉曼黄光激光器设计[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 162-167.
LI Xiaoli, TAN Yidong, YANG Changxi, et al. Design of an all-solid-state single-longitudinal-mode Raman yellow laser based on a twisted-mode cavity[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 162-167.
- [12] 李莉,鞠有伦,戴通宇,等. 基于扭转模腔的L形单纵模Tm, Ho:YAG激光器[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(8): 235-239.
LI Li, JU Youlun, DAI Tongyu, et al. L-shaped single-longitudinal-mode Tm, Ho:YAG laser based on twisted-mode cavity[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(8): 235-239.
- [13] 邢俊红,张訥洁,焦明星,等. 失谐扭转模腔双频Nd:YAG激光器[J]. 光子学报, 2018, 47(10): 7-13.
XING Junhong, ZHANG Nejie, JIAO Mingxing, et al. Detuned twisted-mode cavity dual-frequency Nd:YAG laser[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(10): 7-13.

- [14] SCHUHMANN K, KIRCH K, NEZ F, et al. Spatial hole burning in thin-disk lasers and twisted-mode operation[J]. *Applied optics*, 2018, 57(11): 2900-2908.
- [15] LUO S, CAI Z, XU H, et al. Direct oscillation at 640 nm in single longitudinal mode with a diode-pumped Pr:YLF solid-state laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 116: 112-116.
- [16] DAI T Y, WANG Y P, GUO S X, et al. Tunable twisted-mode Ho:YAG laser at continuous-wave and pulsed operation[J]. *Optics Express*, 2020, 28(21): 31775-31780.
- [17] 魏哲. 1 064 nm 双频 Nd:YAG 激光器及其放大特性研究[D]. 西安: 西北大学, 2022.
- WEI Zhe. Research on 1 064 nm dual-frequency Nd:YAG laser and its amplification characteristics[D]. Xi'an: Northwest University, 2022.
- [18] MITTEN D, KANEDA Y. Twisted-mode VECSEL with intracavity second harmonic generation.[J]. *Optics express*, 2024, 32(19): 33321-33329.