

# 基于钕钆双掺氟化钙晶体的调谐和双波长锁模激光器

杨颖<sup>1</sup>, 宗梦雨<sup>1</sup>, 赵梦菲<sup>1</sup>, 孙硕<sup>1</sup>, 吴永静<sup>1</sup>, 彭倩倩<sup>1\*</sup>, 刘杰<sup>1,2</sup>, 苏良碧<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 山东师范大学物理与电子科学学院, 山东 济南 250014;

<sup>2</sup> 山东省光学与光子器件技术重点实验室, 山东 济南 250014;

<sup>3</sup> 中国科学院上海硅酸盐研究所, 上海 201899

**摘要** Nd,Gd:CaF<sub>2</sub>是一种无序结构晶体,具有光谱宽、热导率高、透射范围大、声子能量低等优势。利用0.5%Nd,8%Gd:CaF<sub>2</sub>晶体作为激光增益介质(百分数为原子数分数),实现了LD抽运的调谐激光输出,激光调谐波长范围为1045.7~1074.2 nm;将半导体可饱和吸收镜作为锁模元件,最终实现了双波长锁模激光输出,锁模激光器的中心波长分别位于1065.45 nm和1066.48 nm。锁模激光器的最大平均输出功率约为394 mW,最小脉冲宽度约为8.37 ps。

**关键词** 激光器;无序结构晶体;调谐激光;双波长;锁模激光器;二极管抽运激光器

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0701004

## Tunable and Dual-Wavelength Mode-Locked Laser Based on Nd/Gd Co-Doped Calcium Fluoride Crystal

Yang Ying<sup>1</sup>, Zong Mengyu<sup>1</sup>, Zhao Mengfei<sup>1</sup>, Sun Shuo<sup>1</sup>, Wu Yongjing<sup>1</sup>, Peng Qianqian<sup>1\*</sup>, Liu Jie<sup>1,2</sup>, Su Liangbi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> College of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Jinan, Shandong 250014, China;

<sup>2</sup> Shandong Provincial Key Laboratory of Optics and Photonic Device, Jinan, Shandong 250014, China;

<sup>3</sup> Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201899, China

**Abstract** Nd, Gd:CaF<sub>2</sub> is a disordered crystal, and has advantages of broadband spectrum, high thermal conductivity, wide transmission range, and low phonon energy. Using a 0.5%Nd, 8%Gd:CaF<sub>2</sub> disordered crystal as laser-gain medium, in which 0.5% and 8% are both atomic fractions, a diode-pumped tunable laser is realized for the first time herein, to the best of our knowledge. A continuous tuning range of approximately 28.5 nm (1045.7-1074.2 nm) is obtained. Using a semiconductor saturable absorber mirror as mode locker, a dual-wavelength mode-locked laser is demonstrated. The central wavelengths of the mode-locked laser are 1065.45 nm and 1066.48 nm. The maximum output power of the mode-locked laser is approximately 394 mW, and the minimum pulse width is 8.37 ps.

**Key words** lasers; disordered structure crystal; tunable laser; dual-wavelength; mode-locked laser; diode-pumped laser

**OCIS codes** 140.4050; 140.3580; 140.3518; 140.3480

## 1 引 言

超短脉冲激光在受控核聚变、等离子体物理学、化学、生物、光通信等领域有重要的应用。随着半导体二极管(LD)抽运光源的不断发展,基于LD直接抽运实现效率高、成本低的小型全固态超快激光运

转,是当前超快固体激光技术领域的研究热点之一<sup>[1-3]</sup>。锁模激光技术是获得超短脉冲激光的重要手段之一。目前除了固体激光器以外,利用光纤和二维材料产生的多波长锁模激光器已广泛应用于光纤传感、光通信、光信号处理、生物医学等领域<sup>[4-6]</sup>。双波长脉冲激光技术<sup>[7]</sup>为光谱精确分析、光

收稿日期: 2019-01-08; 修回日期: 2019-03-09; 录用日期: 2019-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(61475089)、山东师范大学本科生科研基金(2018BKSKYJJ46)

\* E-mail: pengqq@sdu.edu.cn

码分多址、光学仪器测试、差分吸收激光雷达,特别是太赫兹波的产生奠定了基础<sup>[8]</sup>。混合掺杂无序晶体作为锁模激光器的重要元件之一,具有宽光谱、高热导率且适合 LD 抽运等特点,受到人们的重点关注。

在 1 μm 波段,适合 LD 抽运的锁模超快激光材料中,通过向高热导率的晶体基质中掺杂 Nd<sup>3+</sup> 能够获得无序结构晶体,实现 LD 抽运的宽光谱高功率超短脉冲激光输出<sup>[9]</sup>。CaF<sub>2</sub> 晶体具有高热导率(热传导系数与 YAG 相当)、宽透射范围、低声子能量等优势<sup>[10]</sup>,近年来中国科学院上海硅酸盐研究所的研究人员通过共掺 Y<sup>3+</sup> 和 Nd<sup>3+</sup> 获得局域配位结构,在国际上首次生长出光谱性能可调控的大尺寸 Nd,Y:CaF<sub>2</sub> 晶体,并与上海交通大学合作获得了锁模脉宽为 103 fs 的超短脉冲激光<sup>[11-12]</sup>,这给全固态 LD 抽运超快激光晶体及器件的研究带来了新的发展机遇。目前,已经实现了 LD 抽运 Nd<sup>3+</sup> 和 La<sup>3+</sup>/Gd<sup>3+</sup> 共掺杂的氟化物晶体的连续和锁模激光运转<sup>[13-25]</sup>,多波长锁模激光器的研究依然需要进一步的探索。

本文研究了温度梯度法生长的 0.5%Nd,8%Gd:CaF<sub>2</sub> 晶体的连续调谐激光特性(百分数为原子数分数),使用双折射滤光片(BF)作为波长调节元件,获得了 1045.7~1074.2 nm 的连续调谐范围的激光输出。将所生长的晶体应用于锁模激光器中,实现了 LD 抽运该晶体的双波长锁模激光输出,最大平均输出功率为 394 mW,双峰差频约为 0.27 THz。

## 2 LD 抽运 0.5%Nd,8%Gd:CaF<sub>2</sub> 调谐激光特性研究

采用 V 型谐振腔来研究晶体的波长调谐性能,实验装置如图 1 所示。由于晶体在 792 nm 附近的吸收谱线较宽,因此在实验中采用中心波长为 792 nm 的半导体激光器作为抽运源,其耦合输出光纤的芯径为 105 μm,数值孔径为 0.22,抽运光经过

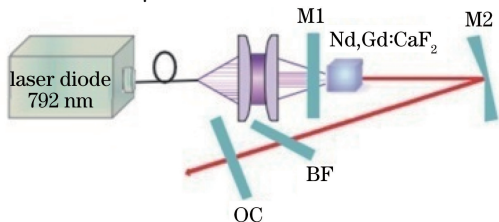


图 1 0.5%Nd,8%Gd:CaF<sub>2</sub> 晶体调谐激光谐振腔  
Fig. 1 0.5%Nd, 8%Gd:CaF<sub>2</sub> crystal tuned laser cavity

聚焦耦合比为 1:2 的耦合聚焦系统注入到激光晶体中。将 0.5%Nd,8%Gd:CaF<sub>2</sub> 晶体切割成尺寸为 3 mm×3 mm×5 mm 的样品,并对通光面进行抛光,晶体暂时未镀膜。为了有效散热以减小晶体的热效应,将晶体用铝箔紧密包裹后装入水冷架中,水冷温度设定为 14 °C。平面镜 M1 镀 792 nm 的高透膜和 1030~1080 nm 波段的高反膜。M2 是曲率半径为 200 mm 的凹镜,镀 1030~1080 nm 波段的高反膜,耦合输出镜(OC)的透过率为 5%。将晶体靠近平面镜 M1 放置并略微倾斜以避免法布里-珀罗标准具效应。

在校准光路实现连续激光最优化运转后,使用石英 BF 作为腔内波长调谐的元件。将 BF 以布儒斯特角插入 M2 和 OC 之间,以抑制反射损失并确保其可调谐的稳定性。通过在平面内旋转 BF 的角度,获得从 1045.7 nm 到 1074.2 nm(约 28.5 nm)的连续调谐范围,平均输出功率在波长为 1064.0 nm 附近达到最大,如图 2 所示。可以看到:随着波长的增加,输出功率缓慢增长,在波长为 1064.0 nm 附近达到峰值;随着波长的红移,输出功率急速下降,调谐曲线呈不对称分布。通过与晶体的荧光谱线进行对比,发现调谐曲线与荧光谱线吻合。在整个实验过程中,没有观察到激光晶体的损坏,且调谐曲线较为平滑,为下一步进行超快激光的研究提供参考。

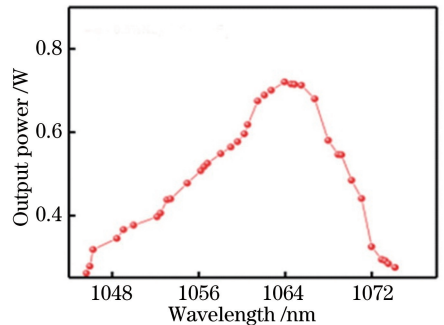


图 2 0.5%Nd,8%Gd:CaF<sub>2</sub> 晶体的波长调谐范围曲线  
Fig. 2 Wavelength tuning range curve of 0.5%Nd, 8%Gd:CaF<sub>2</sub> crystal

## 3 LD 抽运 0.5%Nd,8%Gd:CaF<sub>2</sub> 双波长锁模激光特性研究

### 3.1 实验装置

合理的腔参数是实现稳定高质量激光输出的关键。基于高斯光束传播 ABCD 变换矩阵理论对腔内模式匹配问题进行分析,设计了一个 1.85 m 长的五镜 W 型谐振腔结构,计算得到晶体和半导体可饱

和吸收镜 (SESAM) 处的光斑半径分别为  $95\ \mu\text{m}$  和  $45\ \mu\text{m}$ , 实验装置如图 3 所示。

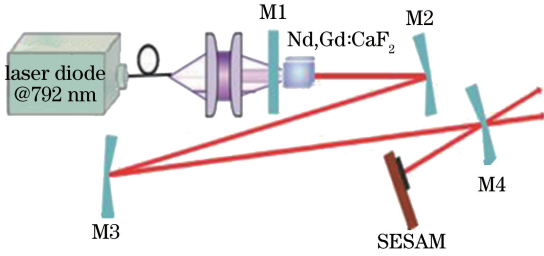


图 3 W 型五镜固态激光器折叠腔装置图

Fig. 3 Folding cavity device diagram of W type five-mirror solid-state laser

实验中采用与调谐实验相同的抽运源和光束聚焦系统。平面镜 M1 为输入镜, 抽运光入射面镀有  $808\ \text{nm}$  的增透膜, 腔内侧面镀有  $1064\ \text{nm}$  的高反射膜。腔镜 M2 和 M3 均为平凹镜, 曲率半径分别为  $200\ \text{mm}$  和  $800\ \text{mm}$ , 两面均镀有对  $1030\sim 1080\ \mu\text{m}$  的高反射膜和  $980\ \text{nm}$  的高透射膜。平凹镜 M4 为输出镜, 其曲率半径为  $80\ \text{mm}$ , 对  $1030\sim 1080\ \mu\text{m}$  波段的激光的透过率约为  $1\%$ 。将德国 Batop 公司生产的 SESAM 作为锁模元件, 其中心波长位于  $1040\ \text{nm}$  附近, 调制深度约为  $0.6\%$ , 弛豫时间为  $500\ \text{fs}$ 。

首先在 SESAM 位置放置平面全反镜, 获得连续激光输出。调节耦合聚焦系统及各腔镜, 使得连续激光为基横模输出并且功率达到最大; 然后将平面全反镜换成 SESAM, 调节腔镜角度, 出现调 Q 锁模现象, 继续调节直至稳定的连续锁模出现。

### 3.2 结果与讨论

在仔细调节 SESAM 和各个腔镜的位置及角度后, 逐渐增加抽运功率, 锁模脉冲激光输出的变化趋势将由调 Q 锁模逐渐过渡到连续锁模, 一般会经历连续运转 (CW)、调 Q 锁模 (QML) 和连续锁模 (CWML) 3 个状态, 如图 4 所示。当晶体吸收抽运功率超过  $0.348\ \text{W}$  时, 激光器输出连续激光; 继续增加吸收抽运功率至  $0.857\ \text{W}$  时, 不稳定的调 Q 锁模模式启动; 当吸收抽运功率超过  $2.2\ \text{W}$  时, 连续波锁模趋势出现, 并随着吸收抽运功率的增加逐渐保持稳定。当晶体的吸收抽运功率达到  $3.09\ \text{W}$  时, 最大平均输出功率为  $394\ \text{mW}$ , 斜率效率  $\eta=14.1\%$ 。

使用型号为 Avaspec-3648 (USB2.0) 的光谱仪测量了锁模激光的光谱, 结果如图 5 所示。可以看到, 该光谱具有双波长, 两发射峰的中心波长分别位于  $1065.45\ \text{nm}$  和  $1066.48\ \text{nm}$ , 光强比约为  $1:1$ , 计

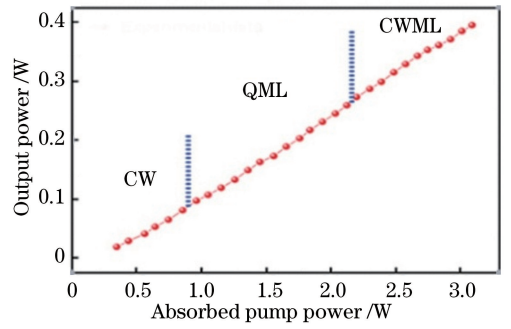


图 4  $0.5\% \text{Nd}, 8\% \text{Gd}:\text{CaF}_2$  晶体的锁模激光输出功率的变化趋势

Fig. 4 Trend of mode-locked laser output power of  $0.5\% \text{Nd}, 8\% \text{Gd}:\text{CaF}_2$  crystal

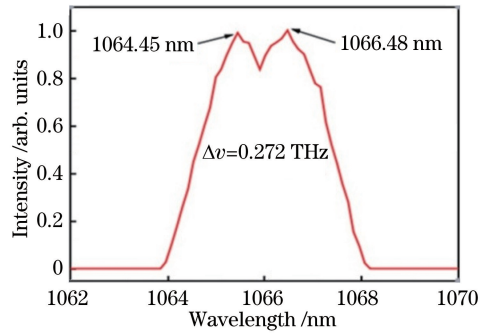


图 5  $0.5\% \text{Nd}, 8\% \text{Gd}:\text{CaF}_2$  锁模激光器的光谱图

Fig. 5 Spectrum of  $0.5\% \text{Nd}, 8\% \text{Gd}:\text{CaF}_2$  mode-locked laser

算得到双波长激光的中心差频约为  $0.27\ \text{THz}$ 。

当激光器处于稳定锁模运行状态时, 由快速光电二极管 (New Focus 1611, 上升时间为  $400\ \text{ps}$ ) 接收光信号, 并由带宽为  $1\ \text{GHz}$  的数字示波器 (Tektronix DPO4104, USA) 记录脉冲序列, 结果如图 6 所示。实际测量的谐振腔长度为  $1.85\ \text{m}$ , 锁模脉冲重复频率为  $80.87\ \text{MHz}$ , 根据锁模重复频率理论公式  $f=c/2L$  ( $c$  为光速,  $L$  为谐振腔的长度) 可以得到腔长的理论值。在测量误差允许范围内, 腔长的理论值与实际测量结果一致。在  $20\ \mu\text{s}$  的时间尺度下, 锁模脉冲序列整齐平稳。在  $10.0\ \text{ns}$  的时间尺度下, 可以得到稳定的脉冲序列, 双波长脉冲在时间上重叠。由此可以看出脉冲序列被完全调制, 具有良好的脉冲稳定性。为了表征输出激光的稳定性, 使用 FSC 频谱分析仪 (Rohde&Schwarz 公司) 在  $10\ \text{kHz}$  的分辨率带宽下测量了锁模信号的信噪比。如图 7 所示, 中心频率位于  $80.9\ \text{MHz}$  附近, 当分辨率带宽为  $10\ \text{kHz}$  时, 测得相应的信噪比 (SNR) 超过  $32\ \text{dB}$ , 连续锁模激光相对纯净, 表明其输出激光具有较高的稳定性。



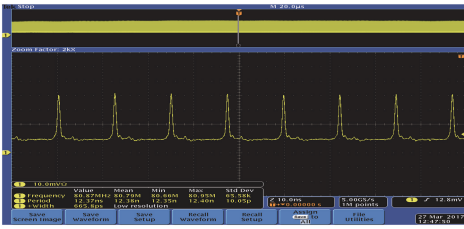


图 6 不同时间尺度下的脉冲序列

Fig. 6 Pulse sequences at different time scales

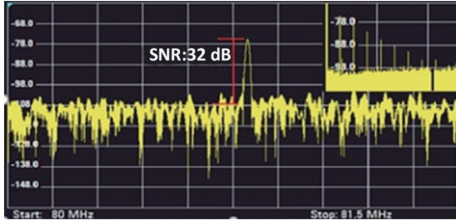


图 7 锁模激光的频谱示意图

Fig. 7 Frequency spectrum of mode-locked laser

为了清楚地知道输出光束的模式,实验中测量了激光器处于稳定锁模运行状态下的输出激光的光束质量,如图 8(a)所示。光束质量因子  $M^2$  的计算公式  $M^2 = \frac{R \times \theta}{R_0 \times \theta_0}$  ( $R$  为实际光束的束腰半径,  $R_0$  为基模高斯光束的束腰半径,  $\theta$  为实际光束的远场发散角,  $\theta_0$  为基模高斯光束的远场发散角)。通过  $M^2$  因子分析仪测得  $M_x^2 = 2.103$ ,  $M_y^2 = 1.956$ 。从图 8(b)所示的光束横向剖面可以看到,激光光束为基横模。

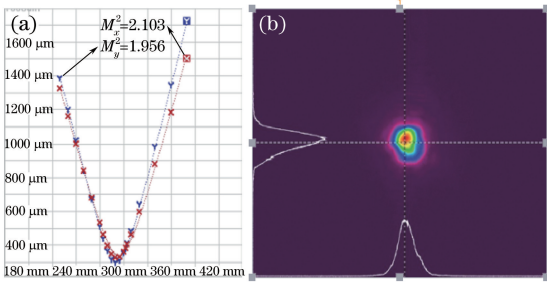


图 8 锁模激光光束的特性参数测量。

(a) 光束质量; (b) 空间光束剖面图

Fig. 8 Measurement of characteristic parameters of mode-locked laser beam. (a) Beam quality; (b) profile of spatial beam

使用商用自相关仪 (Femtochrome Research Inc. FR-103XL) 记录了  $0.5\% \text{Nd}, 8\% \text{Gd}:\text{CaF}_2$  被动锁模激光器的自相关轨迹,测得的锁模脉冲自相关曲线如图 9 所示,采用高斯拟合得到其脉冲宽度为 8.37 ps。通过自相关扫描,进一步证实一个周期内只有一个锁模脉冲振荡。锁模激光输出的强度调制可以表示为:  $I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(2\pi\nu\tau)$ , 其中

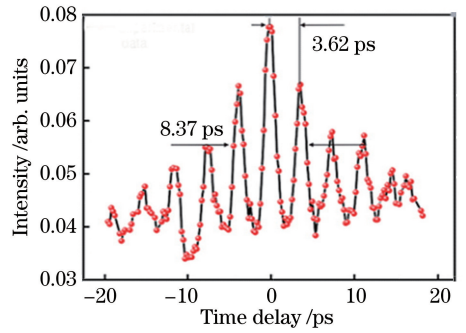


图 9  $0.5\% \text{Nd}, 8\% \text{Gd}:\text{CaF}_2$  双波长锁模脉冲自相关轨迹

Fig. 9 Autocorrelation trajectory of  $0.5\% \text{Nd}, 8\% \text{Gd}:\text{CaF}_2$  dual-wavelength mode-locked pulse

$I_1$  和  $I_2$  分别为两个脉冲的强度,  $\nu$  为两个脉冲之间的差频。  $\tau$  为光学拍的频率间隔, 3.62 ps。因  $\nu \times \tau = 0.99$ , 1065.45 nm 和 1066.48 nm 双波长的差频为 0.27 THz。

本实验能够产生双波长同步锁模激光的原因主要是采用了  $0.5\% \text{Nd}, 8\% \text{Gd}:\text{CaF}_2$  无序晶体, 它的吸收截面在 790 nm 附近, 在室温下有 3 个荧光发射带, 其中较大的两个发射带分别位于 850~930 nm 和 1020~1120 nm 之间。荧光谱的这种多峰结构, 来源于晶体结构的无序性<sup>[13]</sup>。激光器锁模时在光谱带上两个发射截面被同时激发, 两个光束达到同步耦合, 因此得到了 1065.45 nm 和 1066.48 nm 的双波长同步锁模激光输出<sup>[25]</sup>。

## 4 结 论

研究了  $0.5\% \text{Nd}, 8\% \text{Gd}:\text{CaF}_2$  晶体的调谐性能, 获得了从 1045.7 nm 到 1074.2 nm 的约 28.5 nm 宽的连续调谐范围; 运用被动锁模技术实现了 LD 抽运双波长锁模激光输出, 双峰差频为 0.27 THz, 最大平均输出功率为 394 mW。实验结果证明,  $\text{Nd}, \text{Gd}:\text{CaF}_2$  晶体不仅具有较宽的连续可调谐范围, 而且也是生成双波长锁模脉冲的优良增益介质。通过进一步优化晶体, 补偿腔内色散, 改善激光器性能, 有望获得更高的输出功率和更大的差频<sup>[26]</sup>。

## 参 考 文 献

- [1] Keller U. Recent developments in compact ultrafast lasers[J]. Nature, 2003, 424(6950): 831-838.
- [2] Paulus G G, Grasbon F, Walther H, et al. Absolute-phase phenomena in photoionization with few-cycle laser pulses[J]. Nature, 2001, 414(6860): 182-184.
- [3] Rousse A, Rischel C, Fourmaux S, et al. Non-

- thermal melting in semiconductors measured at femtosecond resolution [J]. *Nature*, 2001, 410 (6824): 65-68.
- [4] Zhao R W, Li G R, Zhang B T, *et al.* Multi-wavelength bright-dark pulse pair fiber laser based on rhenium disulfide[J]. *Optics Express*, 2018, 26(5): 5819-5826.
- [5] Guo B. 2D noncarbon materials-based nonlinear optical devices for ultrafast photonics [Invited] [J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, 16(2): 020004.
- [6] Guo B. Recent advances in multi-wavelength ultrafast lasers based on nonlinear effects of 2D materials[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48 (1): 0103002.  
郭波. 基于二维材料非线性效应的多波长超快激光器研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(1): 0103002.
- [7] Li K X, Song Y R, Tian J R, *et al.* Analysis of bound-soliton states in a dual-wavelength mode-locked fiber laser based on Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(3): 1400209.
- [8] Feng C, Liu Z J, Cong Z H, *et al.* Investigation of continuous wave and pulsed laser performance based on Nd<sup>3+</sup>:Gd<sub>0.6</sub>Y<sub>1.4</sub>SiO<sub>5</sub> crystal [J]. *Laser Physics Letters*, 2015, 12(12): 125806.
- [9] Xie G Q, Tang D Y, Tan W D, *et al.* Subpicosecond pulse generation from a Nd : CLNGG disordered crystal laser[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(1): 103-105.
- [10] Su L B, Xu J. CaF<sub>2</sub> crystal material and application [M]. Beijing: Science Press, 2006.  
苏良碧, 徐军. 氟化钙晶体材料及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [11] Su B, Wang G, Li J, *et al.* Spectroscopic properties and CW laser operation of Nd, Y-codoped CaF<sub>2</sub> single crystals[J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10 (3): 035804.
- [12] Qin Z P, Xie G Q, Ma J, *et al.* Generation of 103 fs mode-locked pulses by a gain linewidth-variable Nd, Y:CaF<sub>2</sub> disordered crystal[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(7): 1737-1739.
- [13] He K N, Li D H, Wei Z Y. Research status of passively mode-locked laser based on Nd<sup>3+</sup>-doped disordered crystals[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(10): 1000001.  
何坤娜, 李德华, 魏志义. Nd<sup>3+</sup> 掺杂无序晶体被动锁模激光器的研究现状[J]. *中国激光*, 2016, 43 (10): 1000001.
- [14] Zhang F, Wu Y J, Liu J, *et al.* Mode locked Nd<sup>3+</sup> and Gd<sup>3+</sup> co-doped calcium fluoride crystal laser at dual gain lines [J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 100: 294-297.
- [15] Zhu J F, Zhang L J, Gao Z Y, *et al.* Diode-pumped femtosecond mode-locked Nd, Y-codoped CaF<sub>2</sub> laser [J]. *Laser Physics Letters*, 2015, 12(3): 035801.
- [16] Wei L, Han H N, Tian W L, *et al.* Efficient femtosecond mode-locked Nd, Y : SrF<sub>2</sub> laser [J]. *Applied Physics Express*, 2014, 7(9): 092704.
- [17] Li C, Cai W, Liu J, *et al.* Single-walled carbon nanotube saturable absorber for a diode-pumped passively mode-locked Nd, Y : SrF<sub>2</sub> laser [J]. *Optics Communications*, 2016, 372: 76-79.
- [18] Zhu J F, Wei L, Tian W L, *et al.* Generation of sub-100 fs pulses from mode-locked Nd, Y : SrF<sub>2</sub> laser with enhancing SPM [J]. *Laser Physics Letters*, 2016, 13(5): 055804.
- [19] Li C, Zhang F, Liu J, *et al.* Continuous-wave and mode-locked operation of a diode-pumped Nd, La : CaF<sub>2</sub> laser [J]. *Optical Materials Express*, 2015, 5 (9): 1972-1978.
- [20] Wang H B, Zhu J F, Gao Z Y, *et al.* Femtosecond mode-locked Nd, La : CaF<sub>2</sub> disordered crystal laser [J]. *Optical Materials Express*, 2016, 6(7): 2184-2189.
- [21] Kubecek V, Vlk M, Jelinek M, *et al.* Femtosecond operation of diode-pumped Nd, La : CaF<sub>2</sub> and Nd, La : SrF<sub>2</sub> lasers [C] // Laser Applications Conference, October 1-5, 2017, Nagoya, Aichi, Japan. Washington, D.C. : OSA, 2017: JTh2A. 14.
- [22] Zhang F, Liu J J, Liu J, *et al.* Efficient continuous-wave and 739 fs mode-locked laser on a novel Nd<sup>3+</sup>, La<sup>3+</sup> co-doped SrF<sub>2</sub> disordered crystal [J]. *Laser Physics Letters*, 2016, 13(9): 095802.
- [23] Qin Z P, Qiao Z, Xie G Q, *et al.* Femtosecond and dual-wavelength picosecond operations of Nd, La : SrF<sub>2</sub> disordered crystal laser [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(2): 1502007.
- [24] Zhang F, Fan X W, Liu J, *et al.* Dual-wavelength mode-locked operation on a novel Nd<sup>3+</sup>, Gd<sup>3+</sup> : SrF<sub>2</sub> crystal laser[J]. *Optical Materials Express*, 2016, 6 (5): 1513-1519
- [25] Hao Q Q, Pang S Y, Liu J, *et al.* Tunable and passively Q-switched laser operation of Nd, Lu:CaF<sub>2</sub> disordered crystal [J]. *Applied Optics*, 2018, 57 (22): 6491-6495.
- [26] Zhou Y, Jiao M X, Lian T H, *et al.* Design and experimental investigation of passively Q-switched two-cavity dual-frequency Nd:YAG laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(12): 1201008.  
周叶, 焦明星, 连天虹, 等. 被动调Q 双腔双频 Nd:YAG 激光器设计及实验[J]. *中国激光*, 2018, 45 (12): 1201008.