

Nd:YVO₄ 自锁模皮秒激光器

袁瑞霞^{1,2}, 彭继迎^{1,2}, 李祚涵^{1,2}, 郑义^{1,2}, 务益杰^{1,2}

- (1. 北京交通大学理学院激光研究所, 北京 100044;
2. 教育部发光与光信息技术重点实验室, 北京 100044)

摘要: 设计并研究了 Nd:YVO₄ 自锁模皮秒激光器, 探究了激光器的最佳锁模条件。观察并分析了自锁模皮秒激光器准周期锁模、倍周期锁模状态, 研究并测量了结构紧凑的直腔自锁模激光器的输出特性。谐振腔为凹平直腔, Nd:YVO₄ 晶体作为激光增益介质和克尔介质, 在未加其他锁模元件的情况下, 实现了 1064 nm 高效率连续锁模脉冲激光输出。晶体距输入镜 16 mm、腔长为 90 mm 时, 对 1064 nm 透过率分别为 10%、20%、30% 和 50% 的四种输出镜下激光器的输出特性进行了对比分析。对激光器进行优化设计, 输出镜透过率为 10%, 泵浦功率为 8 W 时, 激光器输出功率为 2.76 W, 斜效率高达 43.2%, 锁模脉冲重复频率为 1.43 GHz, 激光器实现了高效、稳定的连续锁模。

关键词: 自锁模; 克尔效应; 连续锁模; 皮秒

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0305001

Nd:YVO₄ self-mode-locked picosecond laser

Yuan Ruixia^{1,2}, Peng Jiying^{1,2}, Li Zuohan^{1,2}, Zheng Yi^{1,2}, Wu Yijie^{1,2}

- (1. Institute of Laser, School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Key Laboratory of Luminescence and Optical Information, Ministry of Education, Beijing 100044, China)

Abstract: The Nd:YVO₄ self-mode-locked picosecond laser was designed and studied, and also the best conditions of the mode-locked lasers were explored. The period-doubling self-mode-locked pulses and the quasi-periodic self-mode-locked pulses in the picosecond laser were observed and analyzed, and the output characteristics of the self-mode-locked laser with straight cavity in compact structure was studied and measured. The resonant cavity was concave flat chamber, under the condition of no other clamping device, the Nd:YVO₄ crystal as a laser gain medium and Kerr medium, and the high efficiency continuous mode-locked 1064 nm laser pulses were outputted. The Nd:YVO₄ laser crystal is 16 mm from the input mirror, and the cavity length is 90 mm. The four kinds transmittance in 1064 nm of output mirror are 10%, 20%, 30% and 50%, respectively, meanwhile the output characteristics of the laser were analyzed in comparison with different output mirrors. By optimizing the design, when the transmittance in 1064 nm of output mirror is 10%, the output power of the laser is 2.76 W at 8 W incident pump power, and the slope efficiency is up to 43.2%, the repetition rate of mode-locked laser is 1.43 GHz, the laser achieves a high powered and stable continuous wavelength mode-locked.

Key words: self-mode-lock; Kerr-effect; CW-mode-lock; picosecond

收稿日期: 2015-07-11; 修订日期: 2015-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(61108021); 中央高校基本科研基金(2013JBM091)

作者简介: 袁瑞霞(1991-), 女, 硕士生, 主要从事全固态皮秒自锁模激光器方面的研究工作。Email: 13121621@bjtu.edu.cn

导师简介: 彭继迎(1980-), 男, 副教授, 博士, 主要从事全固态皮秒锁模激光器方面的研究工作。Email: pengjiying@163.com

0 引言

高质量、高稳定性的皮秒锁模激光器可用于受控核聚变、高精度激光卫星测距、医疗诊断、激光雷达与大气探测、激光精细微加工、激光内雕等领域,具有巨大的经济效益。自锁模激光器不需要外加的锁模元件,利用增益介质本身的克尔效应引发光束自聚焦,自聚焦效应与腔内硬光阑或软光阑结合,形成类饱和吸收体,对脉冲的前后沿起压缩作用,实现锁模。自锁模激光器相较于电光、声光主动锁模或 SESAM 被动锁模激光器而言,不需要外加的锁模元件,可实现小型化,并且成本更为低廉。近几年自锁模皮秒激光器的相关研究竞相展开^[1-4]。Nd:YVO₄ 晶体作为良好的激光晶体,具有较宽的吸收带宽和较大的受激发射截面(25×10⁻¹⁹ cm² @ 1 064 nm)^[5],特别适用于激光二极管(LD)端面泵浦的全固态激光器,并且其具有较大的三阶非线性系数。1 064 nm 波长发射时,Nd:YVO₄ 晶体增益带宽 Δν_g 为 0.96 nm^[5],在无需群速度色散补偿(GVD)的情况下,可以实现皮秒量级的自锁模。2008 年 Y.F.Chen 小组用激光二极管泵浦 Nd:YVO₄ 激光晶体,实现了自锁模皮秒脉冲输出,最大泵浦功率为 2.5 W,输出为 0.8 W,效率为 32%^[1]。但未见其在高功率泵浦下自锁模运转情况的报道。

研究自锁模激光器的锁模运转特性,探讨最佳锁模条件,对于控制良好质量的自锁模脉冲输出具有重要意义。在飞秒领域,有研究者对钛宝石自锁模激光器中飞秒锁模脉冲序列的连续锁模和准周期、倍周期状态进行分析^[6-7],而皮秒自锁模的准周期与倍周期运转还未见有报道。对于近两年引起关注的全固态皮秒自锁模激光器,探讨其输出特性,分析研究皮秒自锁模激光器中的准周期与倍周期锁模现象对实现良好的锁模运转具有十分重要的现实意义。

文中实验设计并研究了 Nd:YVO₄ 自锁模皮秒激光器,探究了激光器的最佳锁模条件,分析了结构紧凑的直腔自锁模激光器的输出特性。采用凹平直腔,Nd:YVO₄ 晶体作为激光增益介质和克尔介质,在未加其他锁模元件的情况下,实现了 1 064 nm 连续锁模脉冲激光输出。观察并分析了自锁模皮秒激光器准周期锁模、倍周期锁模状态。对激光器进行优

化设计,在 8 W 泵浦下实现了 2.76 W 的高效、稳定连续锁模输出,斜效率高达 43.2%,锁模脉冲重复频率为 1.43 GHz。

1 实验装置与设计

1.1 理论分析

只考虑脉冲光束在时间上的分布,能够实现自锁模的激光介质的折射率满足 $n=n_0+n_2I(t)$,其中 n_0 为与光强无关的折射率, n_2 为非线性折射系数, $I(t)$ 为脉冲光强,由于光强是高斯分布,当晶体中的光强度高至某一数值时,三阶非线性克尔效应将引发晶体内部的自相位调制。光脉冲经过厚度为 L 的克尔介质后,将产生一个附加位相 $\Delta\varphi$:

$$\Delta\varphi(t)=\frac{2\pi n_2 L}{\lambda} I(t) \quad (1)$$

式中: L 为厚度; λ 为光脉冲波长。

附加位相将产生随时间变化的频率 $\omega=-\frac{d\varphi}{dt}$,因此,频移为:

$$\Delta\omega(t)=\frac{d(\Delta\varphi(t))}{dt}=-\frac{2\pi n_2 L}{\lambda} \frac{dI(t)}{dt} \quad (2)$$

频移 $\Delta\omega$ 是时间 t 的函数,表明在脉冲的不同时间部位将对应着不同的频率成分。克尔效应对脉冲时间上的影响导致自相位调制,当光束中心部分的光强较强时,中心部分的折射率变化较边缘部分的变化大,因此,光束在中心比边缘的传播速度慢,结果是介质中传播的光束波面越来越畸变,这种畸变好像是光束通过正透镜一样,光线本身呈现自聚焦现象。自聚焦现象结合腔内光阑将引发激光腔内的非线性损耗调制实现自锁模运转。另外,在自锁模激光器中激光晶体的热透镜效应是影响激光器效率与稳定性的一个重要因素,由温度梯度引发的热透镜焦距

$$f_{T0}=\frac{\pi K_c \omega_p^2}{P_{ph} dn/dT} \left(\frac{1}{1-\exp(-\alpha l)} \right) \quad (3)$$

式中: K_c 为激光介质的热传导率; ω_p 为泵浦光束光斑半径; P_{ph} 为泵浦功率中的致热部分; dn/dT 为介质折射率的热变化梯度; α 为激光介质的吸收系数; l 为激光介质的长度。

热透镜引发的畸变光阑和增益光阑共同影响腔内光束分布。对于不加光阑的克尔透镜锁模激光器来说,晶体上的非均匀分布的振荡光斑构成与光强

分布有关的增益光阑。这就相当于在晶体位置处形成了一个软光阑，与克尔介质结合形成类饱和吸收体，激光器可以实现自锁模。腔内振荡光束的光斑尺寸比泵浦光的光斑尺寸略大时，脉冲的中心由于强的自聚焦几乎全部进入泵浦光内被放大，而两边弱的自聚焦只有部分进入泵浦光内被放大，故脉冲中心的放大倍数大于两边的放大倍数（脉冲被压窄），因此激光晶体上的振荡光光斑半径要略大于泵浦光光斑半径。

若晶体上的泵浦光斑半径为 ω_p ，软光阑半径近似为 ω_s ，自聚焦与光阑结合引发的损耗有如下描述^[3]：

$$\gamma_a = \exp(-2\frac{\omega_p^2}{\omega^2}) - 4\frac{\omega_p^2}{\omega^2} \exp(-2\frac{\omega_p^2}{\omega^2}) \frac{1}{\omega} \frac{\partial \omega}{\partial P} P \quad (4)$$

式中： ω 为腔内激光光斑半径； P 为腔内光束功率。

对于不同透过率的输出镜也相当于引入不同的损耗。由公式(3)、(4)可看出自锁模的自启动与运转情况依赖于光强分布。综合以上两点，激光与泵浦光斑比以及透过率引入的损耗都将对自锁模激光器的稳定运转产生影响。

实验利用 MATLAB 仿真， $ABCD$ 传输矩阵计算腔内光束分布，设计了满足自锁模自启动与运转条件的凹平直腔。对比研究了不同透过率输出镜的锁模特性。

1.2 实验装置

Nd:YVO₄ 自锁模激光器实验装置如图 1 所示。泵浦源采用带光纤耦合的激光二极管阵列(LDA)，泵浦光中心波长为 808 nm，其输出功率可调，最大输出功率为 60 W，耦合光纤芯径为 200 μm ，数值孔径为 0.22。由 LDA 输出的泵浦光经焦距分别为 50.8 mm 和 75 mm 的两个平凸透镜准直聚焦到 Nd:YVO₄ 晶体上，准直聚焦系统的效率为 93%。泵浦光经准直聚焦系统后的聚焦光斑半径约为 150 μm 。Nd:YVO₄ 晶体作为激光增益介质和克尔介质，两端均有 1° 切角，以抑制 F-P 效应。Nd:YVO₄ 晶体为 a 切割，Nd³⁺ 掺杂原子数分数为 0.2%，晶体两端面均镀有 808 nm 增透膜(>99%)和 1 064 nm 增透膜(>99.8%)，晶体尺寸为 3 mm×3 mm×10 mm，用铝箔包裹置于紫铜块中。铜块置于水冷台上，通过循环水系统对紫铜块进行冷却，温度控制在 20 °C。谐振腔为凹平直

腔，输入端镜 M₁ 为平凹透镜，曲率半径为 100 mm，前后表面均镀有 808 nm 的增透膜(>98%)，后端面镀有 1 064 nm 的高反膜 (>99.8%)，输出镜 M₂ 为平面镜。晶体靠近输入镜，腔长从 35 mm 开始逐步增加，记录了腔长为 35、50、60、80 mm 的自锁模波形。晶体距输入镜 16 mm、腔长为 90 mm 时，对 1 064 nm 透过率分别为 10%、20%、30%和 50%的四种输出镜下激光器的输出特性进行了对比分析，6 W 泵浦功率时，运转在 TEM₀₀ 状态的激光器均实现了常规连续锁模运转。

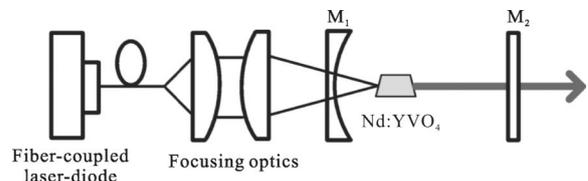


图 1 Nd:YVO₄ 自锁模激光器实验装置图

Fig.1 Experimental setup of self-mode-locked Nd:YVO₄ laser

2 实验结果分析与讨论

实验中改变晶体在腔内的位置和腔长，探究了泵浦光斑与激光光斑尺寸之比对自锁模效果的影响。晶体靠近输入镜，腔长 $L=35$ mm，晶体上振荡光光斑约为 140 μm ，激光器没有实现稳定连续锁模。 $L=50$ mm，晶体上振荡光光斑约为 168 μm ，比 $L=35$ mm 时效果好一些，但是锁模波形不太稳定。 $L=60$ mm，晶体上振荡光光斑约为 200 μm ，实现稳定连续锁模，示波器显示脉宽在 200 多皮秒。 $L=80$ mm，稳定连续锁模，比 $L=60$ mm 时要稳定。考虑到激光器的效率，对利用泵浦光充当软光阑的激光器来说，泵浦光与振荡光斑尺寸之比在 1:1~1:2 之间，更易实现自锁模。不同透过率输出镜的对比分析实验，最终采用的腔型为晶体距输入镜 16 mm，腔长为 90 mm 的凹平直腔。四种输出镜下激光器平均输出功率曲线如图 2 所示。 T 表示输出镜对 1 064 nm 波长激光的透过率， $T=10\%$ 、泵浦功率为 8 W 时，激光器输出功率可达 2.76 W，激光器的斜效率为 43.2%。图 3 为实验中 Nd:YVO₄ 晶体热透镜焦距随泵浦功率的变化曲线。

实验选用 InGaAs 光电探测器（响应时间 35 ps）探测激光脉冲，用 LeCroy 公司的 Wave pro 7300A 示

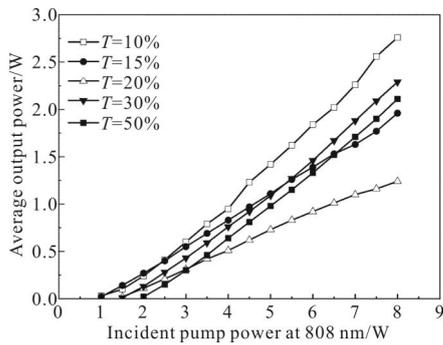


图 2 不同透过率输出镜下的激光输出平均功率曲线

Fig.2 Curves of the output power as a function of incident pump power of laser with different transmittances of output coupling mirror

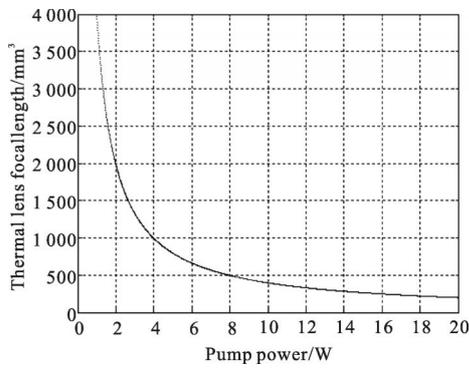
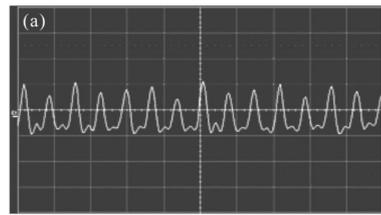


图 3 Nd:YVO₄ 晶体热透镜焦距随泵浦功率的变化曲线

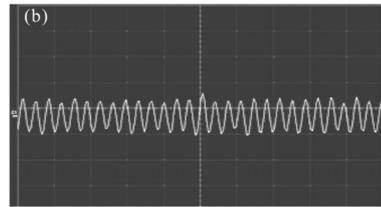
Fig.3 Curve of the thermal lens focal length in Nd:YVO₄ crystal along with the pump power

波器(带宽 3 GHz)记录脉冲波形。实验中谐振腔光学长度约为 105 mm,理论计算得到锁模脉冲的重复频率 $f \approx 1.4286$ GHz,实验测得的脉冲重复频率为 1.43 GHz,与理论计算数值相符。记录了泵浦功率为 6 W 时的激光脉冲波形。图 4(a)为准周期锁模脉冲,幅值高低呈周期性变化,重复频率在 1.43 GHz 附近;图 4(b)为倍周期锁模脉冲,幅值相等,重复频率为连续锁模的二倍,约为 2.86 GHz;图 4(c)为稳定的连续锁模脉冲,幅值相等,重复频率为 1.43 GHz。

自锁模激光器对腔镜调节要求十分严格^[1,4],实验中对于四种不同透过率的输出镜,运转在 TEM₀₀ 模式的激光器均实现了 1064 nm 连续锁模的稳定高效输出。实验发现当准周期锁模输出时,激光器并不是严格的 TEM₀₀ 模式。实际应用中总希望激光的横向光强分布越均匀越好,不希望出现高阶模,而造成光强分布不均匀的原因就是谐振腔的衍射效应,衍射会导致腔内损耗增加,出现准周期锁模。倍周期锁模是在腔内功率密度很高的情况下对应的二次谐波锁



(a) 准周期锁模
(a) Quasi-periodic mode-locking



(b) 倍周期锁模
(b) Period-doubled mode-locking



(c) 连续锁模
(c) Continuous wavelength mode-locking

图 4 T=10% 时的锁模波形

Fig.4 Mode-locked waveform of T=10%

模。除实验观察到的二倍周期锁模现象,在锁模激光器中,笔者认为锁模脉冲序列可能还有其他的稳定形式,如三倍周期、多倍周期锁模^[9-10]等,在采用 Z 型腔的锁模激光器中实现了三倍频锁模^[9]。

实验中,准周期锁模在激光器采用四种透过率输出镜时均出现,而倍周期现象在输出镜 T=50% 时未出现。因此当输出镜引入的损耗过大时,谐振腔内功率密度较小,便不足以产生倍周期锁模脉冲。

在不加光阑的克尔透镜锁模激光器中,输出光十分依赖激光晶体中的激光光斑尺寸与强度。实验系统中,激光器的损耗、泵浦源强度与光斑大小,腔内功率密度、光束分布、谐振腔镜角度等的改变都会引入变换,激光输出脉冲的锁模形态及稳定性与谐振腔的长度、腔内损耗以及谐振腔镜的倾斜度等关系紧密。同种腔型下,发现不同透过率的输出镜对于产生自锁模的阈值有一定影响,对自锁模稳定性也有所影响。结果证明透过率为 10% 与 20% 相对于透过率为 30% 和 50% 时得到的连续锁模脉冲序列更为

稳定。综合考虑输出波形稳定性与激光器效率两方面的因素,该实验条件下,输出镜的最佳透过率为10%。结构紧凑的直腔自锁模激光器的输出特性有待进一步的研究和分析。

3 结论

研究了Nd:YVO₄自锁模皮秒激光器,观察并分析了皮秒自锁模激光器的准周期锁模、倍周期锁模现象,Nd:YVO₄晶体作为激光增益介质和克尔介质,实现了高效稳定的连续锁模运转。实验发现:激光器的损耗、泵浦源强度与光斑大小、腔内功率密度、光束分布、谐振腔镜角度等的改变都会影响自锁模的稳定运转。在晶体距输入镜16 mm,腔长为90 mm的凹平直腔的实验条件下,通过对比分析激光器采用不同输出镜时的输出特性,得出输出镜的最佳透过率为10%。获得的一些规律性实验结果对该领域的研究具有一定指导意义。对激光器进行优化设计,实现了稳定的连续锁模输出,输出镜透过率为10%、泵浦功率为8 W时,激光器输出功率为2.76 W,实现了目前已知最高的输出功率,斜效率高达43.2%,锁模脉冲重复频率为1.43 GHz。

参考文献:

- [1] Liang H C, Chen R C C, Huang Y J, et al. Compact efficient multi-GHz Kerr-lens mode-locked diode-pumped Nd: YVO₄ laser[J]. *Optics Express*, 2008, 16(25): 21149–21154.
- [2] Chen W, Li Y, Zhang G, et al. Spontaneous picosecond pulse generation in a diode-pumped Nd:YAP laser[J]. *Optics Express*, 2013, 21(21): 25091–25098.
- [3] Tung J C, Wu T Y, Liang H C, et al. Precise measurement of the thermo-optical coefficients of various Nd-doped vanadates with an intracavity self-mode-locked scheme [J]. *Laser Physics*, 2014, 24(3): 035804.
- [4] Liu H, Huang J, Tang F, et al. Generation of 3.8-GHz picosecond pulses from a diode-pumped self-mode-locked Yb: YAG thin disk laser [J]. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 2014, 26(4): 418–420.
- [5] Sato Y, Taira T. Comparative study on the spectroscopic properties of Nd: GdVO₄ and Nd:YVO₄ with hybrid process [J]. *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 2005, 11(3): 613–620.
- [6] Sucha G, Bolton S R, Weiss S, et al. Period doubling and quasi-periodicity in additive-pulse mode-locked lasers [J]. *Optics Letters*, 1995, 20(17): 1794–1796.
- [7] Kalashnikov V L, Poloyko I G, Mikhailov V P, et al. Regular, quasi-periodic, and chaotic behavior in continuous-wave solid-state Kerr-lens mode-locked lasers [J]. *JOSA B*, 1997, 14(10): 2691–2695.
- [8] Herrmann J. Theory of Kerr-lens mode locking: role of self-focusing and radially varying gain[J]. *JOSA B*, 1994, 11(3): 498–512.
- [9] Li Z H, Peng J Y, Zheng Y. Self-mode-locked Nd: GdVO₄ laser with long cavity[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2015, 3(126): 337–339.
- [10] Wu T W, Tsou C H, Tang C Y, et al. A high-power harmonically self-mode-locked Nd:YVO₄ 1.34 μm laser with repetition rate up to 32.1 GHz [J]. *Laser Physics*, 2014, 24(4): 045803.