

引用本文: 王艾军, 胡淼, 程澍果, 等. 可调谐腔长的 Nd:YVO₄ 自锁模激光器[J]. 光通信技术, 2024, 48(4): 15–20.

可调谐腔长的 Nd:YVO₄ 自锁模激光器

王艾军, 胡淼*, 程澍果, 许蒙蒙, 李浩珍, 毕美华, 周雪芳

(杭州电子科技大学 通信工程学院, 杭州 310018)

摘要: 针对自锁模激光器中标准具效应影响激光输出性能的问题, 设计了一种可调谐腔长的 Nd:YVO₄ 自锁模激光器。利用单端镀膜的晶体构成腔内标准具, 对激光进行选模。理论上分析了不同腔长下光谱的模式分布与其对应的时序图, 实验验证了 Nd:YVO₄ 晶体的荧光谱温度特性, 并分别分析了其激光光谱特性、锁模脉冲序列的时间轨迹以及频谱分布。理论与仿真结果表明: 当标准具的厚度与谐振腔长的光学长度之比为 b/q 的简分数时, 纵向模式间距可被修改为原来的 q 倍, 并输出 q 次谐波锁模激光; 当腔长为 12.2 mm, 调整标准具厚度与谐振腔长的光学长度之比为 $3/5$ 时, 获得了 41.4 GHz 的高重复频率脉冲激光输出; 当垂直方向半管为 6 578 mW 时, 平均输出功率超过 2.0 W, 对应的斜效率和光对光转化率分别为 31.2% 和 30.7%。

关键词: 自锁模激光器; Nd:YVO₄; 标准具效应; 纵模; 模式分布

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2024)04-0015-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.04.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Tunable cavity length Nd:YVO₄ self mode-locked laser

WANG Aijun, HU Miao*, CHENG Shuguo, XU Mengmeng, LI Haozhen, BI Meihua, ZHOU Xuefang

(School of Communication Engineering, Hangzhou University of Electronic Science and Technology, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at the issue of etalon effects in self-mode-locked lasers that affect laser output performance, a tunable-cavity-length Nd:YVO₄ self-mode-locked laser is designed. A single-end coated crystal is used to form an intra-cavity etalon for mode selection of the laser. The mode distribution of the spectrum and its corresponding timing diagram under different cavity lengths are theoretically analyzed. The fluorescence spectrum temperature characteristics of the Nd:YVO₄ crystal are experimentally verified, and its laser spectrum characteristics, the time trajectory of the mode-locked pulse sequence, and the spectrum distribution are analyzed respectively. The theoretical and simulation results show that when the ratio of the thickness of the etalon to the optical length of the resonant cavity is a simple fraction of b/q , the longitudinal mode spacing can be modified to q times the original, and a q -order harmonic mode-locked laser is output. When the cavity length is 12.2 mm, and the ratio of the thickness of the etalon to the optical length of the resonant cavity is adjusted to $3/5$, a high repetition frequency pulse laser output of 41.4 GHz is obtained. When the half-tube power in the vertical direction is 6 578 mW, the average output power exceeds 2.0 W, with the corresponding slope efficiency and light-to-light conversion rate of 31.2% and 30.7%, respectively.

Key words: self-mode-locked laser, Nd:YVO₄, etalon effect, longitudinal mode, pattern distribution

收稿日期: 2023-09-08。

基金项目: 国家自然科学基金项目(NO.61705055)资助。

作者简介: 王艾军(1998—), 男, 硕士研究生, 江苏省徐州市睢宁县人, 现就读于杭州电子科技大学通信工程学院通信工程专业(含宽带网络、移动通信等), 主要研究方向是固体激光器, 包括自锁模脉冲激光器和双波长固体激光器。

* 通信作者: 胡淼(1982—), 男, 博士, 教授, 主要从事视觉感知、激光雷达、光电对抗等领域的研究工作。



0 引言

重复频率高于 10 GHz 的脉冲激光器是许多应用的核心部件, 如激光测距^[1]、高信噪比测量^[2]、光交换^[3]、无线通信^[4]、量子通信^[5]、大容量光网络^[6]和宽模式间距超连续谱的产生^[7]等。高重复频率的激光脉冲激光器有多种, 如量子阱法布里-珀罗(F-P)半导体激光器^[8]、被动锁模外腔半导体激光器^[9]、被动锁模喇曼光纤激光器^[10]、自锁模激光器^[11]、谐波锁模掺铒光纤激光器^[12]和谐波锁模半导体激光器^[13]等。其中, 自锁模激光器具

王艾军, 胡森, 程澍果, 等: 可调谐腔长的 Nd:YVO₄ 自锁模激光器

有腔损耗低、结构紧凑、频率稳定性高和光谱线宽狭窄等优点, 已经成为光学科学、精密测量、通信技术和生命科学等领域中不可或缺的器件。理论上, 要实现高重复频率的自锁模激光脉冲, 需要对激光腔长进行优化或选择合适的腔长, 但由于短腔长的固体激光器可能难以实现高功率输出, 因此在实践中需要找到合适的折衷方案。文献[14-17]通过引入 F-P 效应, 将激光器的模式间距调整为 F-P 腔自锁光谱范围的整数倍, 实现激光脉冲基频到高重复频率的转换。然而, 这些文献采用的方法是在增益介质泵浦面和输入镜面之间形成标准具, 导致谐振腔的腔长较长, 其输出性能不如采用增益介质镀膜形成的标准具。因此, 本文设计一种可调谐腔长的 Nd:YVO₄ 自锁模激光器, 提高激光器的输出性能。

1 理论分析

本文采用一块单端镀膜(HR@1 064 nm)的 Nd:YVO₄ 增益介质晶体和一块平面镜来构建激光谐振腔。由于这块晶体未经楔角处理, 其后端面的部分反射会在晶体内部产生所谓的“标准具效应”, 从而在谐振腔内形成了一个腔内标准具。根据标准具理论, 标准具的相邻透射峰波长间隔 $\Delta\lambda_d$ 、谐振腔的初始纵模波长间隔 $\Delta\lambda_s$ 分别如式(1)、式(2)所示。

$$\Delta\lambda_d = \frac{\lambda_0^2}{2L_{\text{cry}}} \quad (1)$$

$$\Delta\lambda_s = \frac{\lambda_0^2}{2L_{\text{opt}}} \quad (2)$$

其中, λ_0 为中心波长, L_{cry}^* 、 L_{opt} 分别为增益介质、谐振腔的光学长度。用式(2)除以式(1), 可以得到如下关系式:

$$\frac{b}{q} = \frac{\Delta\lambda_s}{\Delta\lambda_d} = \frac{L_{\text{cry}}^*}{L_{\text{opt}}} \quad (3)$$

从式(3)可以看出, 两者的波长间隔比为 b/q , 这一比值与两者的光学长度之比相同。光学长度为 L_{cry}^* 的标准具光谱透射函数^[18]可以表示为

$$T_{\text{FP}}(\lambda) = \frac{(1-r_1)(1-r_2)}{(1-\sqrt{r_1 r_2})^2 + 4\sqrt{r_1 r_2} \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda} L_{\text{cry}}^*\right)} \quad (4)$$

其中, r_1 、 r_2 分别表示标准具前后 2 个端面的反射率, λ 是振荡纵模的波长。由于光谱的纵模线形呈类正弦函数分布^[19], 因此激光谐振腔中振荡纵模的光谱函数可以类似地表示为

$$I_{\text{cav}}(\lambda) = \frac{(1-r_1)(1-R_{\text{oc}})}{(1-\sqrt{r_1 R_{\text{oc}}})^2 + 4\sqrt{r_1 R_{\text{oc}}} \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda} L_{\text{opt}}\right)} e^{-\frac{(\lambda-\lambda_0)^2}{2\Gamma^2}} \quad (5)$$

其中, Γ 是高斯型包络的光谱线宽, R_{oc} 是输出镜的反射率。

将式(4)和式(5)直接相乘, 即得到自锁模脉冲通过标准具选模作用后的光谱 $I(\lambda)$ 为

$$I(\lambda) = T_{\text{FP}}(\lambda) I_{\text{cav}}(\lambda) \quad (6)$$

标准具选择自锁模激光器波长示意图如图 1 所示。单个透射峰线宽为 Γ_d , 透射峰间隔为 $\Delta\lambda_d$, 则激光器初始纵模经过这种周期性的透射曲线后, 在透射率高的地方被保留, 在透射率低的地方被抑制, 最终在光谱中显示的纵模可能将不再以初始振荡纵模间隔 $\Delta\lambda_s$ 等间隔分布。在调整谐振腔腔长时, 保持透射峰间隔 $\Delta\lambda_d$ 不变, 被抑制的纵模数量将随初始振荡纵模间隔 $\Delta\lambda_s$ 的变化而相应变化。腔长越短, 纵模间隔越大, 被抑制的纵模数量越少。当透射峰间隔 $\Delta\lambda_d$ 和初始振荡纵模间隔 $\Delta\lambda_s$ 成一定比例时, 相邻振荡纵模的间隔会被等比例修改。例如, 当 $\Delta\lambda_d:\Delta\lambda_s=2:1$ 时, 表示振荡纵模间隔被修改为原来的 2 倍。

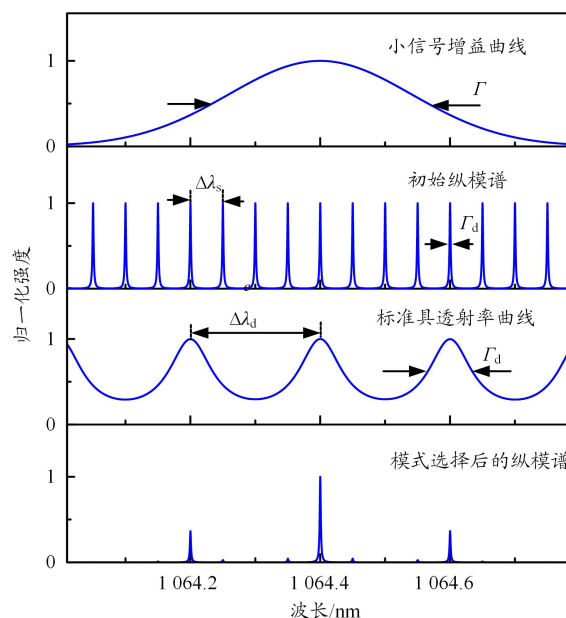


图 1 标准具选择自锁模激光器波长示意图

为了更好地展示标准具效应选模的变化, 本文仿真了不同的标准具与谐振腔光学长度之比的初始振荡纵模和选模后的光谱图。仿真参数如下: Nd:YVO₄ 自锁模激光器增益介质 $L_{\text{cry}}=5$ mm, $\lambda_0=1\ 064.4$ nm、 $r_1=0.99$ 、 $r_2=0.01$ 、 $R_{\text{oc}}=0.95$ 、 $\Gamma=0.01$ nm。

当 L_{opt} 分别为 21.6、20、18 mm 时, 初始振荡纵模

的模间距分别为 0.026、0.028、0.03 nm。增益介质作为标准具, 其折射率 $n=2.16$, $L_{\text{cry}}^*=nL_{\text{cry}}=10.8\text{ mm}$ 。将 L_{cry}^* 和 3 种光腔长 L_{opt} 代入式(3), 可得到 b/q 分别为 $1/2$ 、 $27/50$ 、 $3/5$ 。当 $b/q=1/2$ 时, 选模后的模间距为 0.052 nm, 恰为初始间隔的 2 倍, 且光谱出现良好的高斯分布, 其时序图显示为脉冲间距 $T_d=72.46\text{ ps}$ 的 2 次谐波锁模。当 $b/q=27/50$ 时, 选模后的模间距并不是等间隔分布, 出现 2 种不同的间距 $\Delta\lambda_{s1}$ 和 $\Delta\lambda_{s2}$, 分别为 0.056 nm 和 0.3 nm; 光谱没有呈高斯分布, 其时序图显示为 $T_d=66.67\text{ ps}$ 的多脉冲锁模。当 $b/q=3/5$ 时, 选模后的模式以 0.15 nm 等间距分布, 恰为初始间隔的 5 倍, 光谱同样呈现较好的高斯分布, 其时序图显示为 $T_d=24.15\text{ ps}$ 的 5 次谐波锁模。

根据数值仿真结果可以发现, 当 b/q 接近于简分数时, 标准具可以等间隔地抑制初始振荡纵模, 激光光谱中的纵模间距为原始的 q 倍, 选模后能够获得 q 次谐波锁模脉冲序列。当 b/q 不接近简分数时, 标准具无法等间隔地抑制初始振荡纵模, 激光光谱纵模呈现不规则分布, 选模后将形成多脉冲锁模。

2 实验与分析

2.1 自锁模激光器实验

可调谐腔长的 Nd:YVO₄ 自锁模激光器的实验装置示意图如图 2 所示。实验中, 本文将光纤和激光二极管进行耦合, 作为激光器的泵浦源。泵浦源的各项参数如下: 泵浦波长为 808 nm, 尾纤芯径为 100 μm 、数值孔径(NA)为 0.22, 泵浦源的输出功率量程为 40 W。使用焦距为 28 mm、耦合效率为 85% 的聚焦镜(非球面透镜)将经过准直器准直后的泵浦光束重新成像到增益介质内部, 其中聚焦镜被安置在推进器镜架上, 镜架上的旋钮可实现前后左右移动, 能够更好地控制泵浦光束汇聚方向。增益介质是一块尺寸为 3 mm×3 mm×5 mm、垂直于光轴的跃迁截面切割、折射率 n 为 2.16、Nd³⁺ 离子掺杂浓度为 0.5% 的 Nd:YVO₄ 晶体。晶体的一个端面作为泵浦面, 镀有对激光波长(1 064 nm)反射率

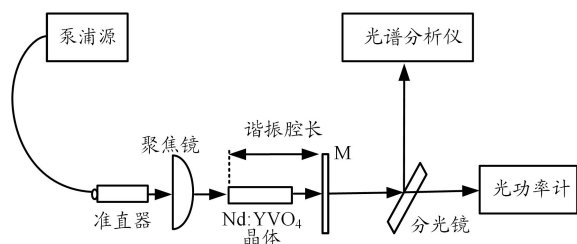
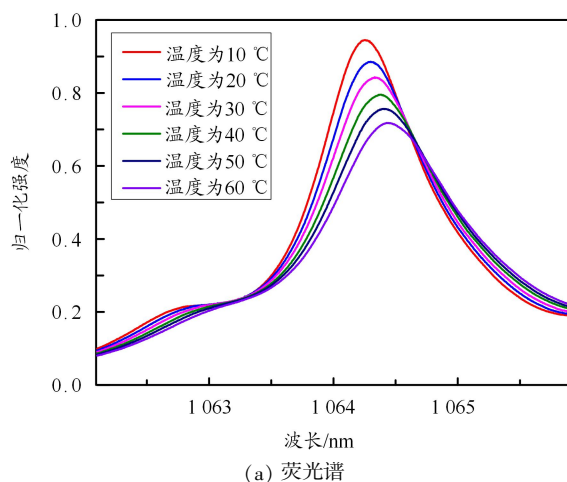


图2 可调谐腔长的 Nd:YVO₄ 自锁模激光器实验装置示意图

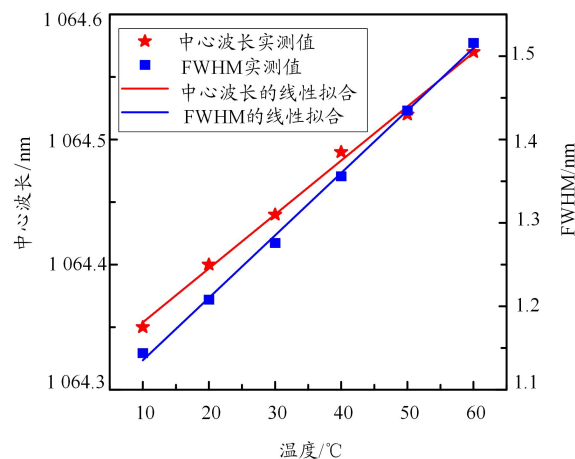
大于 99.8% 的高反膜和对泵浦波长(808 nm)的增透膜, 因此可用作谐振腔的输入镜。另一个端面则镀有针对波长 808 nm 和 1 064 nm 的增透膜。该晶体被厚度为 0.1 mm 的铝箔包裹, 并放置在带有循环水系统的水冷铜块中, 以确保激光器的稳定散热和工作。散热器温度由热电冷却器(TEC)控制, 测量精度为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 温度控制在 $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近。输出镜 M 为平面镜, 其前端面涂有针对波长 808 nm 和 1 064 nm 的高反膜, 反射率设置为 95%。总腔长为不定值, 通过调谐输出镜 M 和晶体的距离来观察输出激光的脉冲形态。实验选用量程为 100 pW~200 W 的光功率计(Thorlabs, PM100A)测量激光器的平均输出功率, 并使用分辨率为 0.01 nm 的光谱分析仪(Advantest, Q8384)记录锁模脉冲光谱。

2.2 Nd:YVO₄ 晶体荧光光谱温度特性分析

当温度为 10~60 $^{\circ}\text{C}$ 时, Nd:YVO₄ 晶体的荧光光谱如图 3(a)所示。可以看出, 随着温度的升高, 中心波长逐渐红移, 荧光强度逐渐降低, 半峰全宽(FWHM)逐渐展宽。中心波长和 FWHM 与温度的变化关系图如图 3(b)



(a) 荧光谱



(b) 中心波长和 FWHM 与温度的变化关系图

图3 当温度为 10~60 $^{\circ}\text{C}$ 时, Nd:YVO₄ 晶体的光谱温度特性

王艾军, 胡森, 程澍果, 等: 可调谐腔长的 Nd:YVO₄ 自锁模激光器

所示。可以看出,随着温度的升高,对应的中心波长从 1 064.35 nm 红移至 1 064.57 nm,FWHM 从 1.144 nm 展宽至 1.516 nm。经计算,可得中心波长的红移速率约为 0.005 nm/℃,FWHM 的展宽速率约为 0.007 nm/℃。因此,为了避免激光器在锁模运作时受晶体热效应的影响,实验采用温控系统将晶体温度控制在水冷系统的 21 ℃ 状态下。

2.3 激光输出功率的测量与分析

本文通过调谐泵浦功率,测量了不同谐振腔长 ($l_{\text{cav}}=12.2$ 、15.8、21.2 mm) 的激光器平均输出功率,得到自锁模 Nd:YVO₄ 激光器的平均输出功率与泵浦功率的关系如图 4 所示。可以看出,在泵浦功率为 6 578 mW 的条件下,当 $l_{\text{cav}}=12.2$ mm 时,测得平均输出功率为 2 018 mW,对应的斜效率为 31.2%,光对光转化效率为 30.7%;当 l_{cav} 增加到 15.8 mm 时,平均输出功率降至 1 911 mW,对应的斜效率为 30.8%,光对光转化效率为 29.1%;进一步增加 l_{cav} 至 21.2 mm 时,平均输出功率继续下降至 1 534 mW,对应的斜效率降至 24.6%,光对光转化效率为 23.3%。这一结果表明,随着 l_{cav} 的增加,泵浦光束与激光模式之间的匹配效率逐渐降低。此外,随着 l_{cav} 的增加,激光器的斜效率和光对光转化效率均呈现下降趋势,这主要是由于 l_{cav} 的增加导致腔内损耗的增加。具体如言,当 l_{cav} 从 12.2 mm 增加到 21.2 mm 时,长度变化了 9 mm,导致激光器的斜效率下降了 6.6%,光对光转化率下降了 7.4%。相比之下,在 JIN Y 等人^[7]的研究中,尽管自锁模 Nd:YVO₄ 激光器的 l_{cav} 从 50 mm 增加到 90 mm,但其斜效率仅下降了 2.2%,光对光转化率下降了 3%。这显示出长腔锁模激光器的输出功率特性对腔长变化的敏感度相对较低。

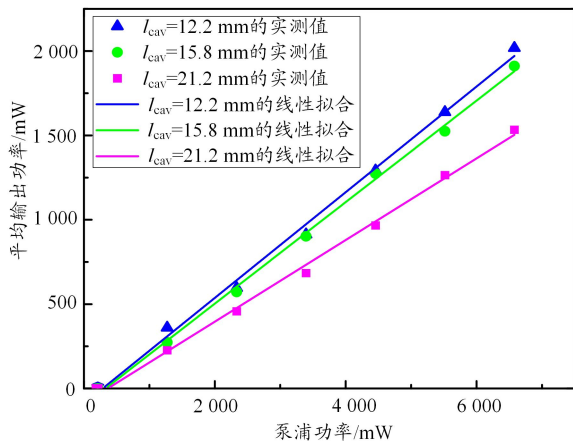


图 4 不同 l_{cav} 情况下的泵浦功率与平均输出功率关系图

2.4 激光光谱的测量与分析

在泵浦功率 $P_{\text{in}}=3\ 395$ mW, l_{cav} 分别为 12.2、15.8、21.2 mm 的条件下,实验测得的锁模激光信号光谱图如图 5 所示。

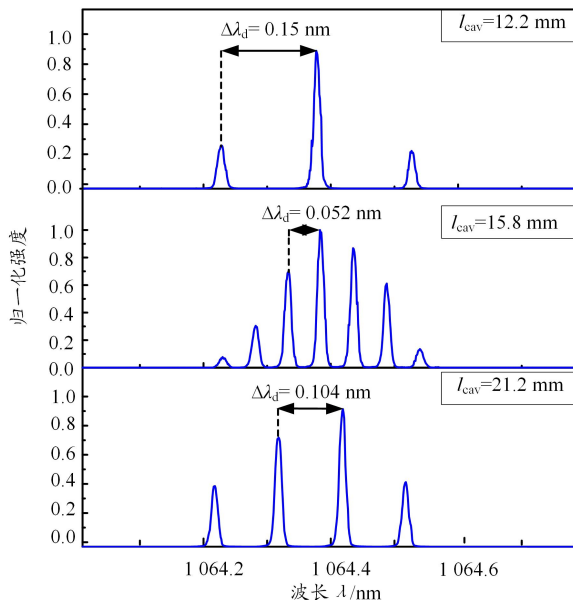


图 5 在 3 395 mW 的泵浦功率下实验测得的锁模激光光谱图

1) 当 $l_{\text{cav}}=12.2$ mm 时,光学腔长为 18 mm,标准具与 l_{cav} 的光学长度之比为 3/5。可以看出,激光光谱呈现出 3 个振荡纵模,这些纵模的包络以 1 064.4 nm 为中心,呈现出对称的高斯型分布。进一步测量发现,各纵模之间的波长间隔为 0.15 nm,而通过理论计算得知原本相邻纵模的波长间隔为 0.03 nm。这意味着实验所得的纵模波长间隔是理论值的 5 倍,同时也是标准具透射峰间隔的 3 倍。

2) 当 $l_{\text{cav}}=15.8$ mm 时,前端镀膜增益介质在谐振腔内构成了一个标准具,其光学长度与 l_{cav} 的比值为 1/2。可以看出,激光光谱呈现出 7 个振荡纵模,这些模式的包络呈良好的高斯分布,此时可计算出增益介质(长度为 5 mm)的光学长度和光学腔长分别为 10.8 mm 和 21.6 mm。理论上,纵模波长间隔应为 0.026 nm,而标准具的相邻透射峰间隔为 0.052 nm,相邻纵模波长间隔恰好是理论值的 2 倍,且与标准具的透射峰间隔相吻合。这表明每 2 个振荡纵模中仅有 1 个振荡纵模能够通过标准具的透射峰,而另一个则因不符合透射频率范围而被损耗。这一过程使得最终的相邻纵模波长间隔增大,充分展示了标准具在选模中的重要作用。

3) 当 $l_{\text{cav}}=21.2$ mm 时,光学腔长变为 27 mm,标准具与 l_{cav} 的光学长度之比为 2/5。可以看出,激光光谱呈现出 4 个振荡纵模,其包络呈良好的高斯分布,各

纵模波长间隔为 0.104 nm, 而理论计算的纵模波长间隔应为 0.021 nm。因此, 实验测得的纵模波长间隔是理论值的 5 倍, 同时也是标准具透射峰间隔的 2 倍。这表明在每 5 个振荡纵模中, 仅有 1 个纵模能够成功透过标准具而被保留, 而其余 4 个纵模则因标准具的阻挡作用而损耗。

此外, 从图 5 还可看出, 当具有滤波作用的标准具的相邻透射峰间隔 $\Delta\lambda_d$ 从原来的 1 倍变为 2 倍和 3 倍时, 在有限的增益曲线范围内, 激光光谱中留下的振荡纵模越来越少, 从 7 个变为 4 个和 3 个。这表明振荡纵模与标准具透射峰的间隔有关, 间隔越大, 被抑制的振荡纵模越多, 留下的振荡纵模就越少。

2.5 锁模脉冲序列的时间轨迹分析

由于实验仪器的限制, 无法采用带宽为 12 GHz 的示波器 (Agilent, DSO81204A) 测量实验中 3 种短腔情况下的脉冲波形, 因此本文对激光光谱数据进行数值重构, 得到了 3 种谐振腔长 (分别对应标准具与 l_{cav} 的光学长度之比 3/5、1/2 和 2/5) 的 0.2 ns 脉冲序列时间轨迹图, 如图 6 所示。可以看出, 当 $l_{cav}=12.2$ mm 时, $T_d=24.15$ ps, 经计算, 对应的脉冲重复频率为 41.4 GHz, 恰好是原频率 (8.3 GHz) 的 5 倍。当 $l_{cav}=15.8$ mm 时, $T_d=72.46$ ps, 经计算, 对应的脉冲重复频率为 13.8 GHz, 恰好是原频率 (6.9 GHz) 的 2 倍, 也称为 2 次谐波锁模。当 $l_{cav}=21.2$ mm 时, $T_d=36.23$ ps, 经计算, 对应的脉冲重复频率为 27.6 GHz, 恰好是原频率 (5.5 GHz) 的 5 倍

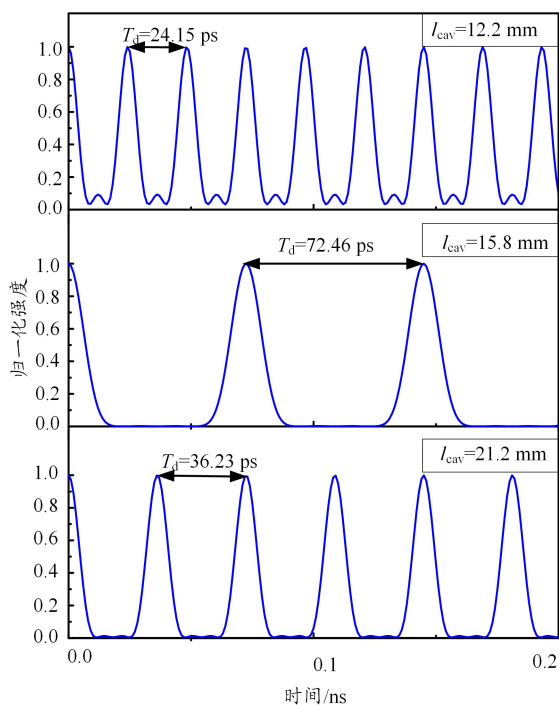


图 6 不同谐振腔长时激光光谱的 0.2 ns 脉冲序列时间轨迹

频, 即 5 次谐波锁模。同样的 5 次谐波锁模, 只要标准具与 l_{cav} 的光学长度之比恰好为某个数值的五分之一, 那么在 l_{cav} 更短的情况下, 就能获得更高的重复频率。

随着标准具相邻透射峰间隔从 1 倍变为 2 倍和 3 倍, 即从 0.052 nm 变为 0.104 nm 和 0.15 nm, 通过理论计算得出锁模脉冲序列的重频分别为 13.8、27.6、41.4 GHz, 恰好是标准具基频 (13.8 GHz) 的 1 倍、2 倍和 3 倍。

2.6 锁模脉冲序列的频谱分析

不同谐振腔长情况下锁模脉冲序列频谱图如图 7 所示。当 $l_{cav}=12.2$ mm 时, 标准具与 l_{cav} 的光学长度之比

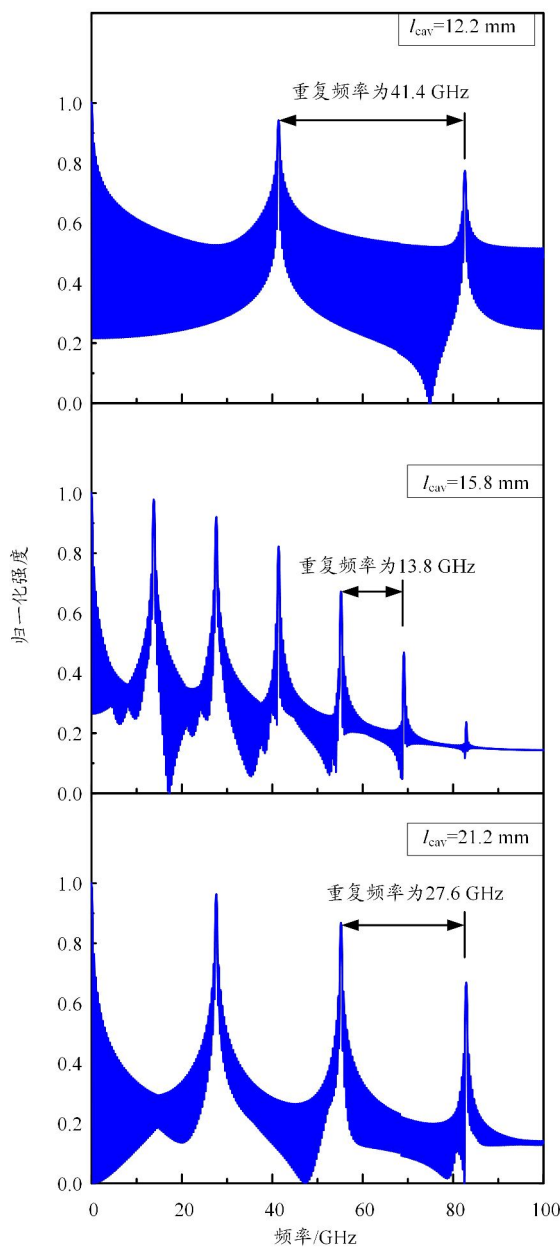


图 7 锁模脉冲序列的频谱

王艾军, 胡森, 程澍果, 等: 可调谐腔长的 Nd:YVO₄ 自锁模激光器

是 3/5。从图 7(a)可以看出, 锁模脉冲序列的重复频率为 41.4 GHz, 是原频率 (8.3 GHz) 的 5 倍, 实现了 5 次谐波锁模, 频率分量由 0.15 nm 等间隔分布的 3 个振荡纵模互相拍频产生。同理, 当 $l_{\text{cav}}=15.8$ mm 时, 因其光学长度刚好是标准具光学长度的 2 倍, 故实现了 2 次谐波锁模。从图 7(b)可以看出, 锁模脉冲序列的重复频率 13.8、27.6、41.4、55.2、69、82.8 GHz 分别对应于 $l_{\text{cav}}=15.8$ mm 时的原频率 (6.9 GHz) 的 2 倍、4 倍、6 倍、8 倍、10 倍和 12 倍, 也称为 2 次、4 次、6 次、8 次、10 次和 12 次谐波频率^[20], 频率分量由间隔为 0.052、0.104、0.156、0.208、0.26、0.312 nm 的纵模相互拍频产生。当 $l_{\text{cav}}=21.2$ mm 时, 其 2 倍的光学长度恰好等于 5 倍的标准具光学长度, 故实现了 5 次谐波锁模。从图 7(c)可以看出, 锁模脉冲序列的重复频率 27.6、55.2、82.8 GHz 分别为 $l_{\text{cav}}=21.2$ mm 时的原频率 (5.5 GHz) 的 5 次、10 次、15 次谐波频率, 频率分量由 0.104 nm 等间隔分布的 4 个振荡纵模相互拍频产生。

综上所述, l_{cav} 越短, 谐波锁模的阶次越高, 其谐波频率分量也越高。

3 结束语

本文对 Nd:YVO₄ 自锁模激光器中的标准具效应进行了实验研究, 使用镀有对激光波长为 1 064 nm 部分反射膜的晶体构成腔内标准具, 对振荡纵模进行选择。在理论上, 本文分析了标准具与 l_{cav} 的光学长度比值对锁模输出的影响。实验和理论结果表明: 当标准具厚度与谐振腔长的光学长度比例为一个简分数 b/q 时, 能够实现 q 次谐波锁模; 当 l_{cav} 短至 12.2 mm 时, 本文初步实现了以 1 064 nm 为中心波长的重复频率为 41.4 GHz 的 Nd:YVO₄ 自锁模操作; 在泵浦功率为 6 578 mW 时, 平均输出功率超过 2.0 W, 对应的斜效率和光对光转化率分别为 31.2% 和 30.7%。因此, 利用标准具效应可以在短腔情况下有效获得高重频、高功率的锁模脉冲。

参考文献:

- [1] FENG J, DEGANG X U, WANG Y, et al. Compact low-energy high-repetition rate laser-induced breakdown spectroscopy for lead element detection[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(1): 114002-1-114002-7.
- [2] BARTEL S, DEKORS Y, KUR Z. Femtosecond Ti: sapphire ring laser with a 2-GHz repetition rate and its application in time-resolved spectroscopy[J]. Optics Letters, 1999, 24(14): 996-998.
- [3] MILLER D A B. Optics for low-energy communication inside digital processors: quantum detectors, sources, and modulators as efficient im-

dance converters[J]. Optics Letters, 1989, 14(2): 146-148.

- [4] FEDERICI J, MOELLER L. Review of terahertz and subterahertz wireless communications[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 107(11): 1-22.
- [5] SILBERHORN C, LAM P K, WEISS O, et al. Generation of continuous variable einstein-podolsky-rosen entanglement via the kerr nonlinearity in an optical fiber[J]. Physical Review Letters, 2001, 86(19): 4267-4270.
- [6] HU H, MULVAD H C H, PEUCHERET C, et al. 10 GHz pulse source for 640 Gbit/s OTDM based on phase modulator and self-phase modulation[J]. Optics Express, 2011, 19(26): B343-9-1-B343-9-7.
- [7] ALBRECHT, BARTELS, DIRK, et al. 10-GHz self-referenced optical frequency comb[J]. Science (New York), 2009, 326(5953): 681-681.
- [8] SATO K. Optical pulse generation using Fabry-Pe/spl acute/rot lasers under continuous-wave operation[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2003, 9(5): 1288-1293.
- [9] GOSSET C, MERGHEM K, MARTINEZ A, et al. Subpicosecond pulse generation at 134 GHz and low radiofrequency spectral linewidth in quantum dash-based Fabry-Perot lasers emitting at 1.5 μm [J]. Electronics Letters, 2006, 42(2): 1-2.
- [10] SCHRDER J, COEN S, VANHOLSBECK F, et al. Passively mode-locked Raman fiber laser with 100 GHz repetition rate[J]. Optics Letters, 2006, 31(23): 3489-3491.
- [11] JIN Y W, XU M M, HU M, et al. High-repetition pulsed Nd:YVO₄ laser based on the multilongitudinal-mode beat note[J]. Optics Engineering, 2021, 60(6): 066106-1-066106-9.
- [12] YOSHIDA E, NAKAZAWA M. 80-200 GHz erbium doped fibre laser using a rational harmonic mode-locking technique[J]. Electronics Letters, 1996, 32(15): 1370-1372.
- [13] LIU S, WANG H, SUN M, et al. AWG-based monolithic 4 $\times$ 12 GHz multichannel harmonically mode-locked laser[J]. Photonics Technology Letters IEEE, 2016, 28(3): 241-244.
- [14] DIDDAMS S A, VAHALA K, UDEM T. Optical frequency combs: coherently uniting the electromagnetic spectrum[J]. Science, 2020, 369(6501): 267-267.
- [15] SUNG C L, LEE C Y, CHO H H, et al. Theoretical and experimental studies for high-repetition-rate disordered crystal lasers with harmonic self-mode locking[J]. Optics Express, 2016, 24(4): 3832-3838.
- [16] WANG S, WANG Y, FENG G, et al. Harmonically mode-locked Yb: CALGO laser pumped by a single-mode 1.2 W laser diode[J]. Optics Express, 2018, 26(2): 1521-1529.
- [17] JIN Y, HU M, XU M, et al. Exploiting the etalon effect to manipulate the pulse characteristics of a self-mode-locked Nd:YVO₄ laser with a flexible cavity length[J]. Optics Communications, 2022, 517: 128331-1-128331-7.
- [18] YIANNPOULOS K, VYRSOKINOS K, KEHAYAS E, et al. Rate multiplication by double-passing Fabry-Perot filtering [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(9): 1294-1296.
- [19] SCHFER C, THEOBALD C, WALLENSTEIN R, et al. Effects of spatial hole burning in 888 nm pumped, passively mode-locked high-power Nd:YVO₄ lasers[J]. Applied Physics B, 2011, 102(3): 523-528.
- [20] CHEN Y F, HUANG Y J, CHIANG P Y, et al. Controlling number of lasing modes for designing short-cavity self-mode-locked Nd-doped vanadate lasers[J]. Applied Physics B, 2011, 103(4): 841-846.