

## 二极管泵浦全固态紧凑型单频绿光激光器

李 姝,高兰兰,高志红,马 超  
(长春理工大学理学院,吉林 长春 130022)

**摘要:**报道了利用激光二极管(LD)端面泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub> + KTP 晶体组件,在没有插入任何选频元件情况下得到 532 nm 单频绿光输出的实验研究。论文从非线性晶体的光谱接受带宽、增益介质的增益带宽和非线性转换效率等方面综合分析,利用激光器在增益和非线性转换效率较大时,处于非线性晶体光谱接受带宽范围内的、与增益曲线中心频率相邻的其他纵模由于其与中心频率处振荡纵模的和频作用,增加其非线性损耗从而被抑制的原理,在 LD 工作电流为 900 mA 时得到 66 mW 波长为 532 nm 的单频绿光输出,稳定性为 0.99%。实验结果表明,该结构类型激光器提供了实现高稳定性、小功率、低成本单频激光器的一种有效方法。

**关键词:**激光器;单频;非线性光谱接受带宽;非线性损耗

**中图分类号:**TN248.1 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2012.07.006

## Diode pumped solid-state compact single-frequency green laser

LI Shu, GAO Lan-lan, GAO Zhi-hong, MA Chao

(College of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** An experimental research of laser diode (LD) end-pumped crystal component Nd:YVO<sub>4</sub> + KTP is reported. In the case of without inserting any frequency selector, the 532 nm single frequency laser output is obtained. Considering the nonlinear spectral bandwidth, gain bandwidth and nonlinear conversion efficiency, the nonlinear loss of the non-oscillating modes that in the range of nonlinear spectral bandwidth will be increased via the SFG (sum-frequency generation) process, which prevent them from oscillating. Based on this theory, with 900 mA LD working current, 66 mW single frequency 532 nm laser is obtained. Stability is better than 0.99%. The experimental results show that this structure type of laser provides an effective method for high stability and low-cost single frequency lasers.

**Key words:** lasers; single frequency; nonlinear spectral bandwidth; nonlinear loss

### 1 引言

LD 泵浦的全固体激光器具有效率高、结构紧凑、光束质量好、性能稳定、寿命长等优点,日益引起人们的广泛重视,被广泛应用于军事、工业、医疗等诸多领域。然而对于一般的 LD 泵浦的全固体激光器,输出功率会随时间发生大幅度无规则波动,这大大限制了激光器的某些应用,因此必须采取一些措施抑制输出光噪声,获得低噪声倍频光输出。消除激光器噪声最有效的方法就是使激光器实现单频运转。自 1985 年国际上首次报道了 LD 泵浦单频 Nd:YAG 激光器以来<sup>[1]</sup>,全固体单频激光器由于具有输出能量更集中、相干性更好,低噪声和优良的频

率特性等优点,在高灵敏度测量、精度光谱学、相干通讯、激光雷达、引力波深测、二次谐波产生、参量振荡、光学数据存储等领域有广泛的应用<sup>[2-3]</sup>,越来越受到人们的重视。

目前关于实现单频激光输出的报道主要集中于基于消除空间烧孔效应的扭摆模腔法<sup>[4-5]</sup>、行波腔法<sup>[6-11]</sup>、短程吸收法<sup>[2]</sup>;基于选频原理的双折射滤波片法<sup>[2,12-13]</sup>、插入标准具法<sup>[14]</sup>;增大纵模间隔的

**作者简介:**李 姝(1986-),女,硕士研究生,主要从事全固体单频激光技术及非线性频率变换技术方面的研究。E-mail:lvxiah@163.com

**收稿日期:**2011-11-08

短腔法<sup>[15-16]</sup>等,这些方法从理论上都比较成熟。本文则从非线性晶体的光谱接收带宽,激光晶体的增益带宽和非线性转换效率等角度综合分析,利用增益和非线性转换效率较大时,处于非线性光谱接受带宽范围内的纵模会通过和频作用增加相邻纵模的非线性损耗,从而抑制了相邻纵模的振荡,使激光器实现单频输出的原理,采用通光几何长度为 2.5 mm 的 Nd:YVO<sub>4</sub> + KTP 晶体组件,在 LD 输入电流为 900 mA 时,得到 66 mW 的单频绿光输出,功率稳定性为 0.99%。该结构激光器与之前报道的单频激光器相比,没有在谐振腔内增加任何光学选频元件,降低了插入损耗,大大降低了调节难度,而且结构简单紧凑,性能稳定可靠,是实现几十毫瓦级单频激光器的有效方法。

## 2 实验装置及结果

实验装置如图 1 所示,泵浦源为最大输出功率为 1 W 的 LD,泵浦光经过透镜聚焦到胶合晶体上。胶合晶体是激光晶体(Nd:YVO<sub>4</sub>)和非线性倍频晶体 KTP 通过紫外胶胶合形式制成的晶体组件<sup>[17]</sup>,激光晶体 Nd:YVO<sub>4</sub> 厚为 0.5 mm,掺杂浓度为 2 atm%,左端面镀 808 nm 增透膜,1064 nm 和 532 nm 的高反膜;非线性晶体 KTP 的规格为 1 mm × 1.5 mm × 2 mm,右端面镀 1064 nm 的高反膜和 532 nm 的增透膜。LD 和胶合晶体放置在半导体制冷器(TEC)上进行严格控温,以确保激光器稳定运行。

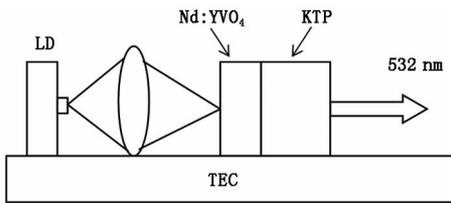


图 1 实验装置

Fig. 1 experimental setup

实验通过调节胶合晶体的角度,在 LD 输入电流为 900 mA 时,得到 66 mW 的 532 nm 单频绿光输出。通过改变 LD 的注入电流,观察到 532 nm 绿光的纵模情况分为四个阶段:第一阶段 360 mA (阈值电流) ~ 495 mA,激光器单纵模输出;第二阶段 495 ~ 660 mA,激光器多纵模输出;第三阶段 660 ~ 912 mA,激光器单纵模输出;第四阶段 912 ~ 990 mA,激光器多纵模输出。图 2 为测得的 532 nm 输出功率随 LD 工作电流变化的  $P-I$  曲线图,可以看出随着 LD 工作电流的增加,532 nm 激光的输出功率呈现二次曲线增加。图 3(a) 为激光器单频输出时用标准具测得的干涉条纹,为一套圆环,表示单

纵模;图 3(b) 为激光器多纵模输出时用标准具测得的干涉条纹,为多套圆环,表示多纵模运转。

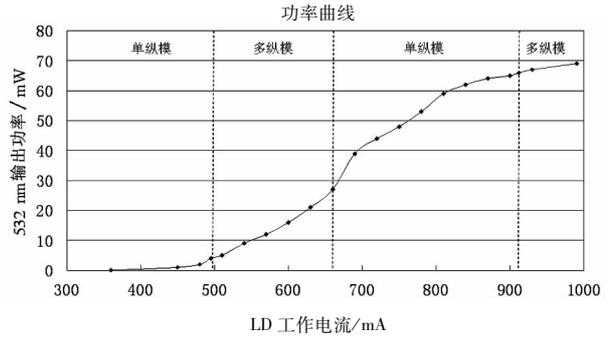
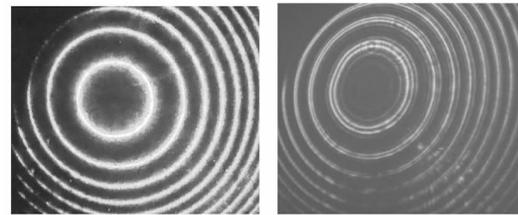


图 2 532 nm 输出功率随 LD 工作电流变化的  $P-I$  曲线图

Fig. 2 532 nm output power vs. LD working current



(a) 单纵模

(b) 多纵模

(a) single longitudinal mode (b) multi-longitudinal mode

图 3 532 nm 激光输出的干涉条纹图

Fig. 3 interference fringes of 532 nm laser output

## 3 实验结果讨论

假设谐振腔内只有一个模式振荡( $i$  模),对于均匀加宽的增益介质来说,在稳态条件下,振荡模式的净增益等于零,其他没有起振的模式净增益小于零,因此可以推导出如下方程:

$$\frac{G_i}{2g_0(\tilde{\lambda}_i, 1)l} = \frac{1}{1 + \frac{2S(\tilde{\lambda}_i)}{S_0(\tilde{\lambda}_i, 1)}} - \alpha(\tilde{\lambda}_i) - 2\varepsilon(\tilde{\lambda}_i, \tilde{\lambda}_i, \gamma) \frac{S(\tilde{\lambda}_i)}{S_0(\tilde{\lambda}_i, 1)} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{G_j}{2g_0(\lambda_j, \Delta\lambda_g)l} = \frac{1}{1 + \frac{2S(\lambda_j)}{S_0(\lambda_j, \Delta\lambda_g)}} - \alpha(\tilde{\lambda}_j) - 4\varepsilon(\tilde{\lambda}_i, \tilde{\lambda}_j, \gamma) \frac{S(\tilde{\lambda}_i)}{S_0(\tilde{\lambda}_i, 1)} < 0 \quad (2)$$

激光器单纵模运转时必须同时满足这两个方程。根据 Smith 的定义<sup>[18]</sup>,  $\alpha, \varepsilon$  分别表示归一化的线性损耗和非线性损耗:

$$\alpha = \alpha(\tilde{\lambda}) = \frac{L}{2g_0(\tilde{\lambda}, 1)l} \equiv \alpha_0 f(\tilde{\lambda}, 1) \quad (3)$$

$$\varepsilon = \varepsilon(\tilde{\lambda}_i, \tilde{\lambda}_j, \gamma) = \frac{K(\tilde{\lambda}_i, \tilde{\lambda}_j, \gamma)S_0(\tilde{\lambda}_i, 1)}{4g_0(\tilde{\lambda}_j, 1)l}$$

$$\equiv \varepsilon_0 f(\tilde{\lambda}_i, 1) f(\tilde{\lambda}_j, 1) h(\tilde{\lambda}_i, \tilde{\lambda}_j, \gamma) \quad (4)$$

式中,  $L$  为腔内往返的线性损耗;  $G$  为净增益;  $S_0$  为饱和功率密度;  $g_0$  为小信号增益系数;  $S(\tilde{\lambda}_i)$  为基频光功率密度, 式(1)中  $2\varepsilon(\tilde{\lambda}_i, \tilde{\lambda}_i, \gamma) \frac{S(\tilde{\lambda}_i)}{S_0(\tilde{\lambda}_i, 1)}$  表示

倍频项, 式(2)中  $4\varepsilon(\tilde{\lambda}_i, \tilde{\lambda}_j, \gamma) \frac{S(\tilde{\lambda}_i)}{S_0(\tilde{\lambda}_i, 1)}$  表示和频

项。所以, 对于没有振荡的模式来说, 与振荡模式的和频是造成其非线性损耗的主要原因。该结构激光器随着 LD 工作电流的增大 532 nm 激光输出的纵模状况出现四个阶段:

(1) 在第一阶段的区域内激光器单频输出, 根据小信号增益系数的公式<sup>[19]</sup>  $g_0 = \eta_Q \eta_S \eta_B P_{ab} / I_S V$ , 可知通过连续增加泵浦功率可以增大小信号增益系数。当 LD 工作电流比较小时, 处于增益曲线中心的波长  $\lambda_0$  处的纵模首先达到阈值条件, 起振。而在阈值附近时, 小信号增益很小, 由公式(3)可知线性损耗占主导, 只有中心波长处的纵模满足起振条件, 因此在此区域为单频输出。

(2) 在第二阶段的区域内激光器出现多纵模。这是因为随着增益的增大, 相邻纵模的增益也会增大, 而此时非线性转换效率比较小, 因此振荡纵模与相邻纵模的和频作用也会很弱, 因此由于和频作用导致相邻纵模的损耗不足以克服增益, 因而 532 nm 激光出现多纵模振荡。

(3) 在第三阶段, 激光器再次工作在单频状态。这也是该结构单频激光器的关键点所在。具体分析如下:

随着增益的继续增加, 普通激光器会出现更多的纵模起振, 而不会出现单频状态。基频光和倍频光功率都会增加。而对于非线性晶体光谱接受带宽内所有起振或没起振的纵模, 由公式(2)可知基频光功率  $S(\tilde{\lambda}_i)$  的增加同时会通过和频过程  $4\varepsilon(\tilde{\lambda}_i, \tilde{\lambda}_j, \gamma) \frac{S(\tilde{\lambda}_i)}{S_0(\tilde{\lambda}_i, 1)}$  加强对它们的非线性损耗, 从而抑

制这些相邻纵模的起振。但是一般情况下, 因为每个非线性晶体的光谱接受带宽  $\Delta\lambda_M$  都是有限的。在增益或非线性转换效率较大的时候, 非线性损耗占主要位置, 在这种情况下, 那些没有包含在非线性相位匹配范围内的纵模就不会通过和频作用增加非线性损耗, 就可能因为损耗小而增益大使净增益成为正值而起振, 出现多纵模振荡。

对于确定的非线性晶体来说, 缩短非线性晶体

的长度可增大它的非线性光谱接受带宽。因此本实验中使用的非线性晶体 KTP 的长度非常短, 只有 2 mm, 由此可计算出它的非线性光谱接受宽度为 2.8 nm。而 Nd:YVO<sub>4</sub> 的增益带宽只有 0.8 nm, 因此增益带宽内所有可能起振的纵模都包含在非线性带宽范围内。在第三阶段, 由于泵浦功率已远远高于激光器阈值, 非线性转换效率已经比较高, 中心波长以外的那些纵模由于被包含在非线性接收带宽内就会通过和频作用增加其非线性损耗, 而此时的增益还不足以克服它们的非线性损耗, 因此相邻纵模的振荡被抑制了, 激光器单频运转。此外, 由于总腔长只有 2.5 mm 长, 纵模间隔比较大, 使增益带宽内的纵模数减少, 为激光器单频运转也提供了有利的条件。

(4) 在第四阶段, 随着 LD 工作电流的再次增加, 相邻纵模的增益也随着增加, 但是由于非线性晶体的长度只有 2 mm, 非线性转换效率会受到限制, 此时相邻纵模的增益已经增加到足以克服和频造成的非线性损耗的程度, 相邻纵模因净增益大于零而起振, 激光器出现多纵模运转。

从上述分析可以推测, 在一定范围内, 如果选用比较长的非线性晶体(没有了非线性转换效率的限制), 激光器单频运转的区间应该会增大。而且, 从非线性晶体的角度接收宽度出发, 如果采用分离元件, 可以通过微调非线性晶体的放置角度实现激光器的单频输出。另外, 若采用光谱接收带宽更宽, 角度接收范围更大的非线性晶体, 如: LBO 晶体, 激光器出现单频运转的几率会更大。但是由于 LBO 晶体的有效非线性系数比较小, 激光器的输出功率会比较低。而且 LBO 晶体的价格也比较贵。这也是目前激光晶体组件为什么都选用 KTP 的原因。

#### 4 总 结

本文从理论上分析了非线性晶体的接受带宽对激光器单纵模的影响, 得出了通过增大非线性晶体光谱接受带宽, 使增益带宽中的纵模都包含在非线性光谱接受带宽范围内, 在增益或非线性转换效率较大的情况下, 通过相邻纵模与中心起振纵模和频的过程增加相邻纵模的非线性损耗, 从而抑制其振荡, 使激光器实现单纵模输出的结论。实验中采用通光几何长度为 2.5 mm 的 Nd:YVO<sub>4</sub> + KTP 晶体组件, 在 LD 输入电流为 900 mA 时, 得到 66 mW 的 532 nm 单频绿光输出。功率稳定性为 0.99%, 为实现小功率、低成本单频激光器提供了一种有效的方法。

#### 参考文献:

[1] Zhou Bingkun, Kane T J, Dixon J G, et al. Efficient fre-

- quency-stable laser-diode-pumped Nd:YAG laser [J]. Opt. Lett., 1985, 10 (2): 62-64.
- [2] Zheng Quan, Tan Huiming, Zhao Ling. Study of LD-pumped YVO<sub>4</sub>/KTP single-frequency green laser [J]. Laser & Infrared, 2011, 31 (4): 208-209. (in Chinese)  
郑权, 檀慧明, 赵岭. LD 泵浦全固体单频 YVO<sub>4</sub>/KTP 绿光激光器研究 [J]. 激光与红外, 2011, 31 (4): 208-209.
- [3] Geng Aicong, Xu Denghui, Li Xiong, et al. Reviews and prospects of all-solid-state green laser technology [J]. Laser & Infrared, 2011, 41 (1): 3-7. (in Chinese)  
耿爱丛, 徐登辉, 李熊, 等. 全固态绿激光技术的评述与展望 [J]. 激光与红外, 2011, 41 (1): 3-7.
- [4] Hao Erjuan, Li Te, Tan Huiming, et al. Methods of obtaining single-frequency of all-solid-state lasers intracavity frequency doubling in diode-pumped [J]. Laser Journal, 2006, 27 (2): 14-15. (in Chinese)  
郝二娟, 李特, 檀慧明, 等. LD 泵浦的全固态激光器的单频实现方法 [J]. 激光杂志, 2006, 27 (2): 14-15.
- [5] Hao Erjuan, Li Te, Tan Huiming, et al. Single-frequency laser at 473 nm by twisted-mode technique [J]. Laser & Infrared, 2009, 39 (9): 924-927. (in Chinese)  
郝二娟, 李特, 檀慧明, 等. 单频蓝光激光器的实现 [J]. 激光与红外, 2009, 39 (9): 924-927.
- [6] T J Kane, R L Byer. Monolithic, unidirectional single-mode Nd:YAG ring laser [J]. Opt. Lett., 1985, 10 (2): 65-67.
- [7] Hao Erjuan, Tan Huiming, Li Te, et al. Study of LD end pumped Q-switched single frequency laser [J]. Laser & Infrared, 2007, 37 (1): 41-43. (in Chinese)  
郝二娟, 檀慧明, 李特, 等. LD 端面泵浦单频调 Q 激光器的研制 [J]. 激光与红外, 2007, 37 (1): 41-43.
- [8] Gao Chunqing, Gao Mingwei, Lin Zhifeng, et al. LD pumped monolithic non-planar ring resonator single frequency lasers [J]. Chinese J. Lasers, 2009, 36 (7): 1704-1708. (in Chinese)  
高春清, 高明伟, 林志锋, 等. LD 抽运单块非平面环形腔单频激光器 [J]. 中国激光, 2009, 36 (7): 1704-1708.
- [9] Wang Xin, Yang Suhui, Sun Wenfeng, et al. Laser diode pumped high-slope-efficiency monolithic unidirectional single frequency ring laser [J]. Chinese J. Lasers, 2005, 32 (2): 149-152. (in Chinese)  
王欣, 杨苏辉, 孙文峰, 等. 激光二极管抽运单块高斜度效率环形腔单频固体激光器 [J]. 中国激光, 2005, 32 (2): 149-152.
- [10] Chen Sanbin, Zhou Shouhuan, Zhao Hong, et al. High efficiency continuous-wave ring cavity single-frequency laser [J]. Chinese J. Lasers, 2010, 37 (9): 2309-2313. (in Chinese)  
陈三斌, 周寿桓, 赵鸿, 等. 高效率连续环形腔单频激光器 [J]. 中国激光, 2010, 37 (9): 2309-2313.
- [11] Zheng Yaohui, Lu Huadong, Li Fengqin, et al. All-solid-state high-efficiency high-power Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP laser of single-frequency operation [J]. Chinese J. Lasers, 2007, 34 (6): 739-742. (in Chinese)  
郑耀辉, 卢华东, 李凤琴, 等. 全固态高输出功率单频 Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP 激光器 [J]. 中国激光, 2007, 34 (6): 739-742.
- [12] Zhou Cheng, Ye Ziqing, Zheng Quan, et al. Diode-pumped single-frequency Nd:YVO<sub>4</sub> green laser [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2002, 23 (4): 250-252. (in Chinese)  
周城, 叶子青, 郑权, 等. LD 泵浦单频 Nd:YVO<sub>4</sub> 绿光激光器 [J]. 半导体光电, 2002, 23 (4): 250-252.
- [13] Xue Qinghua, Zheng Quan, Wang Junying, et al. Stable operation of 473 nm blue laser using a full-wave plate [J]. Chinese J. Lasers, 2004, 31 (8): 919-921. (in Chinese)  
薛庆华, 郑权, 王军营, 等. 用全波片实现 473nm 蓝光激光器的稳定运转 [J]. 中国激光, 2004, 31 (8): 919-921.
- [14] Zhang Jing, Lei Hongxiang, Wang Shaokai, et al. All-solid-state single-frequency and intracavity-frequency-doubled Nd:YVO<sub>4</sub> laser with fold-cavity [J]. Chinese J. Lasers, 2001, 28 (11): 971-973. (in Chinese)  
张靖, 雷宏香, 王少凯, 等. 可调谐全固化折叠腔单频倍频 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器 [J]. 中国激光, 2001, 28 (11): 971-973.
- [15] Wang Shuxiang, Chen Yunlin, Yan Caifan, et al. Survey of microchip lasers [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2007, 24 (4): 401-404. (in Chinese)  
王淑香, 陈云琳, 颜彩繁, 等. 微片激光器的最新研究进展 [J]. 量子电子学报, 2007, 24 (4): 401-404.
- [16] Chen Yan, Zhao Yang. LD-pumped Nd:YAG microchip lasers [J]. Optical Technology, 1997, (2): 4-7. (in Chinese)  
陈艳, 赵洋. LD 泵浦 Nd:YAG 微片激光器 [J]. 光学技术, 1997, (2): 4-7.
- [17] Gao Huanhuan, Gao Lanlan, Liu Hongbo, et al. Laser diode pumped continuous wave three-wavelength laser [J]. Chinese J. Lasers, 2010, 37 (7): 1683-1687. (in Chinese)  
高缓缓, 高兰兰, 刘宏博, 等. 激光二极管抽运连续三波长固体激光器 [J]. 中国激光, 2010, 37 (7): 1683-1687.
- [18] Richard G Smith. Theory of intracavity optical second-harmonic generation [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1970, 6 (4): 215-223.
- [19] Walter Koechner. Solid-state laser engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)  
W 克希耐尔. 固体激光工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.