

1.35 GHz 线性调频 Nd:YVO₄ 激光器

徐新瑞, 樊荣伟, 陈兆东, 陈德应

(哈尔滨工业大学 可调谐(气体)激光技术国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 报道了 808 nm 连续半导体泵浦全固态 Nd:YVO₄ 线性调频激光器实验研究。利用优化谐振腔长度、腔内插入倾斜标准具, 采用温度控制、机械减震和隔绝外部环境等稳频操作, 实现了稳定的 1 064 nm 单频激光输出, 最大输出功率 140 mW。利用法柏干涉仪观察单频输出, 并利用刀口法测量得到的基模高斯光束质量 M^2 为 1.05。在谐振腔内插入 RTP 电光晶体并连接外部高压电源, 通过线性电光效应改变谐振腔长度以及改变标准具倾斜角度避免腔长调节过程中的模式跳频, 实现了 1.35 GHz 的稳定线性调频激光输出。编程控制高压电源给 RTP 晶体施加幅值为 2 200 V 的锯齿波形电压, 实现了频率 20 Hz, 平均输出功率为 85 mW 周期性的调频信号输出。

关键词: 线性调频; Nd:YVO₄; 单频激光; RTP 晶体

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1105001

1.35 GHz linearly tunable single-frequency Nd:YVO₄ laser

Xu Xinrui, Fan Rongwei, Chen Zhaodong, Chen Deying

(National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: The investigation on 808 nm CW laser-diode pumped all solid-state linearly tunable Nd:YVO₄ laser was conducted in this paper. By utilizing methods of short cavity, inclined thin etalon and frequency stabilization including gain medium temperature control, mechanical vibration damping of the laser base and aerial isolation of external turbulence and noises, single frequency laser output at 1 064 nm was achieved with a maximum output power of 140 mW. Frequency characteristics was monitored by a Fabry-Perot interferometer and beam density distribution was also scanned, beam quality M^2 was measured to be about 1.05 by knife technique. Electro-optical RTP crystal was fixed in the cavity and connected to a high power source, which allowed cavity length modulation by linear electro-optical effect. During the cavity length tuning process, mode hops were avoided by the real time angle tilting of the thin etalon. Frequency tuning range of the 1 064 nm laser reaches 1.35 GHz. Programed saw-tooth with a 2 200 V amplitude was further applied on the RTP and a 20 Hz periodical linear frequency tuning laser with an average power of 85 mW was obtained.

Key words: linearly tunable single frequency; Nd:YVO₄; single frequency laser; RTP crystal

收稿日期: 2016-03-05; 修订日期: 2016-04-03

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项资金(2012YQ040164)

作者简介: 徐新瑞(1988-), 男, 博士生, 主要从事固体激光器方面的研究。Email: xuxinruihit@163.com

导师简介: 陈德应(1965-), 男, 教授, 博士, 主要从事激光雷达方面的研究。Email: dychen@hit.edu.cn

0 引言

合成孔径激光雷达是相干探测体制,其信号源为调频已知的线性调频激光^[1],要求激光信号具有单纵模、频率稳定、高速调谐以及调频线宽范围大的特点^[2]。而合成孔径激光雷达的距离向分辨率与激光信号的调频带宽成反比,即激光信号源调频带宽越大,雷达分辨率越高,图像质量越高。但是目前的线性调频激光器在调频精度、调谐带宽和频率稳定性等方面依然不能满足高精度探测对激光光源的要求^[3-6],依然需要线性调频激光器的进一步研究。

调频激光的前提是激光器的单频稳定输出,腔内插入倾斜标准具法是获得单频输出的有效方法^[7]。而频率的线性调制可通过电光晶体的线性电光效应来实现的^[6],腔内插入电光晶体,改变施加在晶体两端的外加电场,晶体折射率改变导致谐振腔长度的变化来实现频率的调制。常用的电光晶体主要有 LiNbO₃ 和 RTP 等。其中 RTP 晶体以其电光系数和激光损伤阈值高、透过波段宽、不潮解、半波电压和电导率低、插入损耗低、耐高压等优点成为新一代广泛应用电光调制器主要元件^[8-9]。

激光二极管(laser diode, LD)泵浦全固态激光器具有效率高、稳定性好、使用寿命长、体积小等特点。常用的固体激光器增益介质以 Nd:YAG 和 Nd:YVO₄ 等的应用最为广泛。Nd:YVO₄ 晶体相对于 Nd:YAG,具有更大的吸收截面和泵浦吸收截面,吸收谱线宽,温度变化对吸收系数影响小,输出 π 方向线性偏振激光,且吸收峰与 LD 泵浦输出激光波长匹配良好等特点,成为中高功率激光器广泛使用的激光晶体。

利用 808 nm LD 泵浦 Nd:YVO₄ 晶体,在谐振腔内插入特定厚度和反射率的标准具,通过优化谐振腔长度和调整标准具倾斜角度,采用温度控制、机械减震和隔绝外部环境等稳频方法,实现了最大输出功率为 140 mW 的 1 064 nm 线性偏振的单频输出,单频激光输出性能稳定,30 min 内的频率变化不超过 5%,输出功率的变化则不超过 1%,光束的强度分布成基模高斯形式。在腔内插入 RTP 电光晶体,调节谐振腔长度和标准具倾斜角度,并使电光晶体电场方向与线偏振激光偏振方向保持一致,实现了 1.35 GHz 的 1 064 nm 线性调频激光输出。

1 单频激光输出实验

1.1 理论分析

采用短谐振腔和腔内插入倾斜标准具实现单纵模的选择。激光器可实现的振荡频率的数量是由增益介质的有效增益线宽 $\Delta\nu_E$ 和谐振腔的纵模间隔 $\Delta\nu_q$ 共同决定的。纵模之间的频率间隔满足

$$\Delta\nu_q = \frac{c}{2L} \quad (1)$$

式中: c 为真空中光速; L 为谐振腔的总的光学长度。缩短腔长 L ,增加频率间隔,则达到阈值输出,落在有效增益线宽内的纵模数量就会减少。腔长进一步缩短,增加纵模间隔,实现有效的单纵模输出。

不同于微片激光器,固体激光器腔长的缩短受制于腔内光学元件的尺寸。由公式(1),光学长度为 10 cm 的谐振腔的纵模间隔为 1.5 GHz,常用的激光晶体的增益线宽都在百 GHz 以上,如果不采用选频措施,腔长 10 cm 的 Nd:YVO₄ 激光器是不可能实现单模稳定的激光输出的。为了保证获得单频激光输出,在腔内插入倾斜标准具,压窄激光增益线宽,实现单模输出。

由于多光束干涉效应,通过标准具的光束的每一个透射波分量的波函数只有满足相邻相位之间的光程差是波长的整数倍的光波才能无损耗(不考虑吸收损耗)的通过。其他频率的光因为损耗无法达到输出阈值而被抑制。标准具对增益线宽的压窄效应主要决定于标准具的厚度 d 和精细度 F 。标准具的透过率率曲线极大值之间的距离,为标准具的自由光谱区(FSR) $\Delta\nu_F$,精细度 F 即标准具两个相邻透过率峰值与峰值宽度的比值,两者的比值决定了标准具透射带宽 $\delta\nu$ 的大小:

$$\delta\nu = \frac{\Delta\nu_F}{F} = \frac{c(1-R)}{2\pi nd\sqrt{R}} \quad (2)$$

式中: R 为标准具每个透射端面的反射率。

结合激光晶体的增益线宽、谐振腔的纵模间隔,选择特定厚度和反射率的镀膜标准具可实现单频激光输出输出。

1.2 实验装置

图 1 为 LD 泵浦 Nd:YVO₄ 单频激光器输出实验装置示意图,泵浦源光纤耦合输出 LD 激光器(BWT KS3-11311-412)的最大输出功率为 30 W,室温下的

中心波长为 808 nm, 光纤数值孔径为 0.22, 经 1:1 准直聚焦系统后光斑半径大约为 400 μm 。谐振腔的光学长度为 100 mm。Nd:YVO₄ 晶体为 0.3at.% 掺杂, *a* 轴切割, 尺寸为 3 mm×3 mm×3 mm, 晶体一端镀 1 064 nm 全反和 808 nm 高透膜, 充当谐振腔的平面输入镜, 另一端面镀 1 064 nm 高透过率薄膜, 平面输出镜表面镀有对 1 064 nm 透过率 $T=15\%$ 的介质薄膜。标准具尺寸为 $\phi 12.7\text{mm}\times 3\text{mm}$, 标准具两端面镀有 1 064 nm 反射率为 67% 的介质薄膜, 并固定在可以旋转角度的旋转台上。实验过程中标准具的倾斜角度始终控制在 1° 以内, 既可避免标准具与激光晶体形成复合腔, 又不会产生过多损耗。输出激光经格兰棱镜和功率计 (Laser Power/Energy Meter 1104622, Coherent Inc.) 测量验证为线性度良好的线偏振激光。扫描法珀干涉仪 (SA210-Series, Thorlabs Inc.) 自由光谱范围为 10 GHz, 分辨率 > 67 MHz, 将输出激光的单频信号转化为电信号输入到示波器 (InfiniiVision DSO3034A, Agilent Inc.) 中, 可实时观察激光器的单频输出特性等。

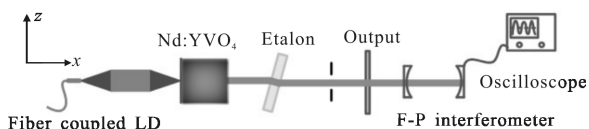


图 1 LD 泵浦单频 Nd:YVO₄ 激光器实验装置图

Fig.1 Experimental setup of LD pumped single-frequency Nd:YVO₄ laser

晶体的一端用作输入镜, 一定程度上消除了空间烧孔的影响。同时将激光晶体安装在热沉底座上, 循环水冷保持水温在 25 $^{\circ}\text{C}$ 。为了避免温度因素引起的标准具和电光晶体的折射率变化造成的单频激光频率输出的浮动, 将整个实验系统保持在一定温度下, 避免了外界温度变化引起的激光频率的漂移。将实验系统放置在整块金属容器中, 并将金属容器置于减震平台上, 十分有效地避免了机械振动的影响。为了减少激光器的多模输出, 在谐振腔内插入小孔光阑有效地避免了多横模的出现。

扫描法珀干涉仪的一个电压扫描周期内可以实现三个自由光谱区的移动, 如图 2 所示, 扫描电压为锯齿波电压, 在一个扫描周期内, 施加在法珀上的电压扫过法珀干涉仪的三个自由光谱区, 即单频输出条件下的示波器图像中一个周期内可以出现两到三

个单频信号, 对应两个单频信号之间的距离等效为法珀干涉仪的一个自由光谱区, 即 10 GHz。调节标准具角度, 可在示波器上实时观察激光输出的频率特性。图 2 所示为间距为 10 GHz 的 1 064 nm 单频激光输出测量结果, 单频性能良好, 单频输出的线宽在 10 MHz 量级, 经功率计测量得到的激光器最大输出功率为 140 mW, 30 min 时间内的频率不稳定性小于 5%, 功率不稳定性小于 1%。如图 3 所示为由 CCD (Mikrotron MC1362) 记录得到的激光光斑横向空间分布, 光强成基模高斯分布, 光束能量分布集中, 激光的 M^2 因子实测为 1.05。

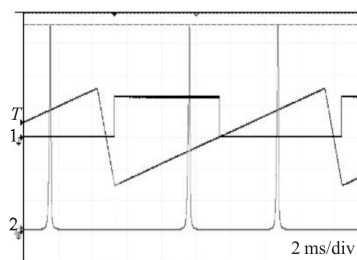


图 2 最大输出功率 140 mW 的单频输出测量

Fig.2 Single frequency output measurement at the maximum output power of 140 mW

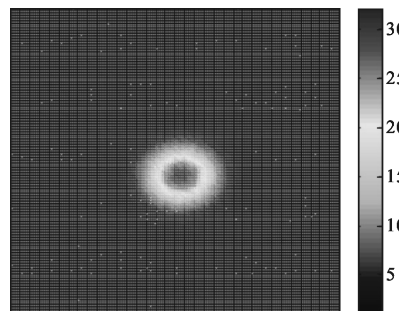


图 3 最大单频输出功率为 140 mW 时的光强度分布

Fig.3 Density distribution of single-frequency laser at the maximum output power of 140 mW

2 线性调频激光输出实验及分析

LD 泵浦线性调频 Nd:YVO₄ 激光器的实验装置如图 4 所示。RTP 晶体为正交晶系双轴晶体, 晶体为 *x* 方向切割, 消光比大、抗光损伤阈值高, 温度稳定性好。实验中激光偏振方向沿 *z* 轴, RTP 晶体 *z* 轴加电方向与激光偏振方向一致, 避免了双轴晶体的自然双折射效应。调节标准具的角度, 观察示波器单频

输出特性。激光器实现单频输出后,进而加电观察线性调频结果。

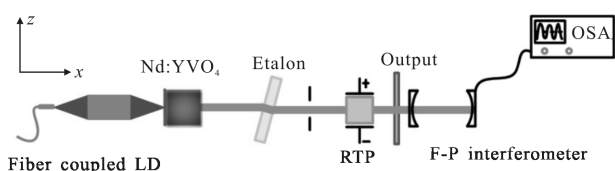


图 4 LD 泵浦线性调频 Nd:YVO₄ 激光器实验装置图
Fig.4 Experimental setup of LD pumped linear tunable single-frequency Nd:YVO₄ laser

采用折射率椭球模型分析 RTP 晶体的线性电光效应,沿 RTP 加电 z 主轴通过的线性偏振激光的折射率变化为:

$$\Delta n = n_z - n_{z0} = \frac{1}{2} n_{z0}^3 \gamma_{33} \frac{U}{d} \quad (3)$$

式中: n_{z0} 为 RTP 未加电时的 z 主轴折射率; γ_{33} 为 z 轴线性电光系数; U 为晶体两端电压; d 为晶体电极之间的距离。折射率的变化 Δn 与电压 U 成正比。

如图 5 所示,为 RTP 加电电压分别为 0 V 和 2 000 V 时的单频输出示波器测量结果。图中法相干涉仪的一个扫描周期内依然包含三个自由光谱区的范围,此时一个扫描电压内可以看到三个完全相同的单频输出。实验结果表明,随 RTP 晶体施加电压的变化,频率的变化成线性变化。电压每变化 500 V,频率变化约 0.24 GHz。电压从 0~2 000 V 的变化过程中,单频输出幅度逐渐降低,继续增加电压,最终实现了 1.35 GHz 调频输出。

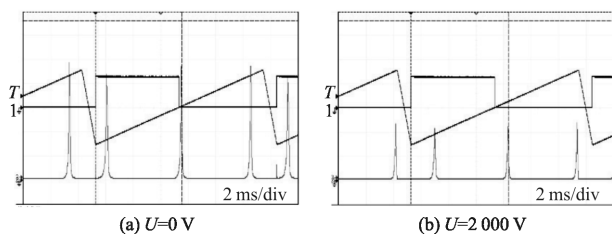


图 5 RTP 晶体线性调频实验加电电压为 0 V 和 2 200 V 的单频测量

Fig.5 Linear tunable single-frequency laser with RTP voltage at 0 V and 2 200 V

电压从零逐渐增加,由线性电光效应引起的折射率的变化逐渐增加,RTP 施加幅度为 2 200 V 的周期性锯齿波电压,可观察到周期性的线性调频激光

输出。如图 6 所示,RTP 晶体两端施加的频率为 20 Hz,幅值为 2 200 V 的锯齿波电压后,线性调频激光器的输出功率的周期性变化曲线。由图可知,功率的变化与激光器的频率变化规律一致,在同一周期内,电压增加,输出功率增大,反之,输出功率线性降低。平均输出功率为 85 mW,每个周期内功率变化幅度为 30 mW 左右,功率变化的稳定性在 18% 以内。功率浮动源于随电压的变化,腔内谐振激光的振荡频率由原本的增益中心位置逐渐向增益曲线中心偏离,增益降低,并导致输出单频功率的下降。

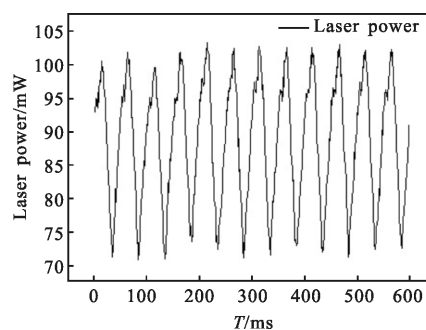


图 6 RTP 晶体周期性加电的线性调频输出功率变化
Fig.6 Curve of linear tunable single-frequency laser with periodical RTP voltage

3 结 论

利用 LD 激光器泵浦 Nd:YVO₄ 晶体,通过优化激光器谐振腔长度,并在谐振腔内插入特定厚度和反射率的法柏标准具,实现了线偏振的 1 064 nm 稳定单频输出,最大输出功率为 140 mW。在谐振腔内插入 RTP 晶体,并使晶体的加电方向 z 主轴与激光的偏振方向保持一致,创新性地避免了自然双折射对调频性能的影响,利用 RTP 电光晶体的线性电光效应,实现了单频激光器的线性调频输出,调频范围 1.35 GHz。给 RTP 施加周期性的锯齿波扫描电压,获得了周期性的调频功率变化曲线。所有实验结果都与理论分析一致。进一步的分析表明,选择合适厚度和反射率的标准具可以实现更大范围的线性调频输出,减小标准具的反射率可以降低标准具的反射损耗,减小激光器的输出阈值,提高输出功率。

参考文献:

[1] Holman K W, Kocher D G, Kaushik S. MIT/LL

- development of broadband linear frequency chirp for high resolution ladar[C]//Proceedings of the Defense and Security Symposium, International Society for Optics and Photonics, 2007, 6572: 65720J.
- [2] Scholle K, Heumann E, Huber G. Single mode Tm and Tm, Ho:LuAG lasers for LIDAR applications [J]. *Laser Physics Letters*, 2004, 1(6): 285.
- [3] Tsang W, Olsson N, Linke R, et al. 1.5 μm wavelength GaInAsP lasers: single-frequency operation and wideband frequency tuning [J]. *Electronics Letters*, 1983, 19(11): 415–417.
- [4] Tsang W, Olsson N, Logan R. High-speed direct single-frequency modulation with large tuning rate and frequency excursion in cleaved-coupled-cavity semiconductor lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 1983, 42(8): 650–652.
- [5] Zhang X, Ju Y, Wang Y. Diode-end-pumped room temperature Tm,Ho:YLF lasers [J]. *Opt Express*, 2005, 13(11): 4056–4063.
- [6] Zheng Y, Lu H, Li Y, et al. Broadband and rapid tuning of an all-solid-state single-frequency Nd:YVO₄ laser[J]. *Applied Physics B*, 2008, 90(3–4): 485–488.
- [7] Zhang X, Zhang S, Xiao N, et al. Diode-end-pumped continuously tunable single frequency Tm, Ho:LLF laser at 2.06 μm [J]. *Appl Opt*, 2014, 53(8): 1488–1492.
- [8] Wagner F, Hildenbrand A, Natoli J Y, et al. Laser damage resistance of RbTiOPO₄: evidence of polarization dependent anisotropy [J]. *Opt Express*, 2007, 15(21): 13849–13857.
- [9] Duan Y, Zhu H, Ye Y, et al. Efficient RTP-based OPO intracavity pumped by an acousto-optic Q-switched Nd:YVO₄ laser [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(5): 1314–1317.