

LD 泵浦环形单频 Nd : YVO₄ 激光器的频率调谐特性研究

张 靖 王润林 马红亮 张宽收 谢常德 彭堃堃

(山西大学光电研究所, 教育部量子光学重点实验室, 太原 030006)

摘 要 利用激光谐振腔内标准具的选模调谐特性和激光晶体自身标准具作用, 通过调节插入标准具和激光晶体的倾斜度及微调谐振腔长度, 在 LD 泵浦 Nd : YVO₄ 单频激光器上实现了精确调谐, 最大可调谐范围约 100GHz.

关键词 环形单频激光器; 可调谐激光器

0 引言

以半导体激光器(LD)为泵浦源的全固体化单频激光器, 广泛应用于光谱、相干通信、激光雷达、引力波探测、二次谐波产生、参量振荡及压缩态场产生等领域. 当前由 1064nm 激光倍频获得的 532nm 波长, 经碘分子稳频构成的全固体化激光稳频系统已成为一种重要的光频标准¹, 因此具有低的频率噪音、窄线宽和一定调谐范围的输出波长为 1064nm 的全固体化单频激光器成为极具应用前景的激光源. 目前获得单频可调谐 1064nm 输出的方法很多, 采用单块 Nd : YAG 非平面腔结构, 通过控制晶体的温度获得最大可调谐范围约²100GHz, 采用 Nd : YVO₄ 薄片腔结构, 在 130K 的温度变化中获得最大调谐范围约³207GHz, 这些激光器结构紧凑, 受外界干扰小, 频率稳定, 但在腔内不能插入其它光学元件, 并且很难做到大功率输出.

文献 4 指出, 在激光腔内插入标准具可以完成选模调谐. 我们设计并研制了 LD 泵浦 Nd : YVO₄ 单频激光器⁵, 获得高达 320mW 的 1064nm 单频输出. 本文主要讨论通过在激光谐振腔内插入一标准具, 进行选模调谐. 在我们的系统中, 激光晶体自身也有标准具作用. 通过调

节标准具及 Nd : YVO₄ 晶体的倾斜角和谐振腔长, 完成频率调谐, 所获得的调谐范围约 100GHz.

1 实验装置

实验装置如图 1 所示. 激光器系统 1 和 2

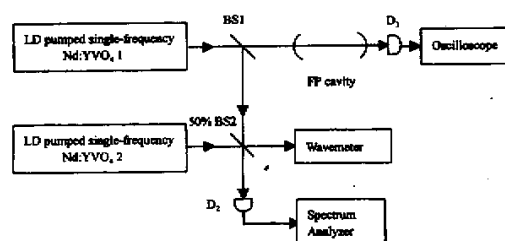


图 1 实验装置示意图

是采用我们自行研制和生产的 LD 泵浦全固体化单频环形 Nd : YVO₄ 激光器, 其结构如图 2 所示, 激光器 1 和 2 的泵浦源分别为 1W 和 2W 的 LD 激光器, Nd : YVO₄ 晶体的掺钕浓度为 0.5at%, 尺寸为 3 × 3 × 5mm, 前后表面镀有 1064nm/809nm 双减反膜, 腔内放置的 TGG 晶体和 λ/2 波片前后表面都对 1064nm 减反, λ/2 波片和 TGG 晶体组成光学单向器, Nd : YVO₄

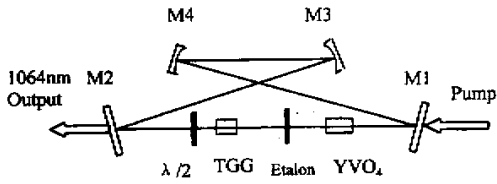


图 2 Nd:YVO₄ 环形激光器结构图

Fig. 2 Configuration of Nd:YVO₄ ring laser

是各向异性晶体,输出为偏振光,通过单向器强迫激光单向运转实现单频输出.腔内插入一倾斜度可调的标准具(Etalon)作为频率调谐元件.激光器 1 在泵浦功率为 0.9W 时单频红外输出 170mW,激光器 2 在泵浦功率为 1.8W 时单频红外输出 320mW.

激光器 1 输出激光由分束镜 BS₁ 分为两束,一束由扫描 F-P 共焦腔和探测器 D₁ 监视其模式并由示波器记录.监视腔由两个曲率半径 $r=50\text{mm}$,反射率 $R_{1.064}>99.5\%$ 的凹面镜组成,自由光谱范围为 1.5GHz,实测的精细度为 240.另一束与激光器 2 输出的激光经 50%分束镜 BS₂ 耦合拍频,50%分束镜输出的一束耦合光进入波长计,以测量两台激光器的输出波长,另一端口的输出光进入增益带宽为 0~500MHz 的探测器 D₂ (型号为 Analog Modules 713A),探测光电流送入频谱分析仪(型号 HP8890L)测量两台激光器输出激光的拍频信号.

3 实验结果及分析

由于激光器谐振腔内插入光学单向器,使激光在腔内单向运转消除了空间烧孔效应,即使在腔内不插入标准具情况下也能得到稳定的单频输出.扫描 F-P 腔的透射曲线如图 3 所示,由此可

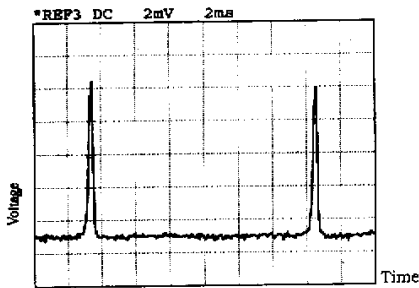


图 3 基波通过扫描 F-P 共焦腔的透射曲线

Fig. 3 The transmission of fundamental wave through the scanning F-P cavity

见激光器 1 输出激光的模式为单纵模.激光器 1 的腔长为 350nm,纵模间隔约为 850MHz,通过控

制谐振腔镜上的压电陶瓷来精确调谐激光器的频率,由于均匀加宽增益介质最邻近增益峰的模最先起振,随着压电陶瓷上的电压增加,激光输出频率从小到大周期性地变化,变化大小为激光器的一个纵模间隔.

为获得对激光器频率简单可靠的调谐,我们在腔内插入一标准具,通过改变标准具的倾斜角来改变激光器的输出频率.标准具的谐振条件为

$$M\lambda_r = 2ntc \cos(\arcsin[(\sin\theta)/n]) \quad (1)$$

M 为整数, λ_r 、 n 、 t 、 θ 分别为标准具的谐振波长、标准具的折射率、厚度及倾斜角.在近垂直入射时($\theta \approx 0$),式(1)可级数展开近似为

$$\nu_R = (Mc/2nt)(1 + \theta^2/2n^2) \quad (2)$$

ν_R 是标准具的共振频率, c 为光速.对式(2)的 θ 求导得到激光器频率随标准具倾斜角的调谐速率

$$\delta\nu_R/\delta\theta = \nu_R\theta/n^2 \quad (3)$$

从式(3)看出激光频率的调谐速率随标准具倾斜角而线性增加.当标准具倾斜角逐渐增大时激光输出频率增大,直到标准具的下一个纵模出现,激光频率又返回到初始频率处,这样激光输出频率随标准具倾斜角从小到大周期性变化,变化大小为标准具的一个纵模间隔.实验中我们选用 1mm 厚的熔融石英玻璃作为标准具,其自由光谱范围为 100GHz.标准具固定在可微调倾斜角的固定支架上,利用标准具表面微弱反射的腔内激光,在距标准具 400mm 处测量反射光斑在垂直方向的移动距离并用以推算旋转角.图 4 给出不同倾斜角所对应的激光输出频率,小黑方块为实验数据,实线是由实验数据拟合出的频率调谐曲线,虚线为理论曲线.标准具在它的自由光谱区 100GHz 内调谐时总会出现跳模现象并非连续可调.实验中发现激光频率随标准具的旋转角成阶跃性变化,它们阶跃间隔均约为 13GHz.我们在分析激光频率随标准具的旋转角成跳跃性变化的起因时发现,调节 $\lambda/2$ 波片和 TGG 晶体倾斜角对激光频率几乎不产生影响,但调节 Nd:YVO₄ 晶体倾斜角激光频率发生变化.我们使用的 Nd:YVO₄ 晶体尺寸为 (3×3×5)mm,折射率³ $n=2.165$,计算表明它的自由光谱范围约为 13GHz,与实验测得对激光介质增益产生周期性调制的周期 13GHz 一致.当标准具粗调激光器到每一阶跃频率处,调节 Nd:YVO₄ 晶体倾斜角,激光频率都可被连续调谐一个纵模间隔 13GHz.我们换用了几家不同公司生产的 Nd:YVO₂ 晶体,都镀

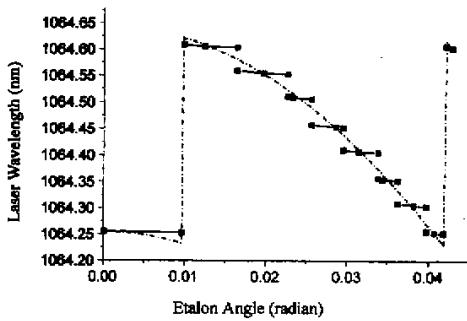


图 4 不同标准具倾斜角所对应的激光输出波长. 小黑方块为实验数据, 虚线为理论曲线

Fig. 4 The laser output wavelength versus the etalon angle. The dark squares are the experimental values and dash dot line is the theoretical curve
有对 1064nm 的减反膜, 发现在腔内都有标准具效应.

由上述实验可以说明增益介质 Nd:YVO₄ 晶体在腔内也有标准具的作用, 虽然它两端面镀有对 1064nm 的减反膜, 但剩余反射率还较大. Nd:YVO₄ 晶体作为标准具它的自由光谱范围约为 13GHz, 正是其标准具效应对激光增益曲线产生周期性调制. 标准具和 Nd:YVO₄ 晶体透射曲线共同作用的激光增益曲线决定了标准具的调谐特性, Nd:YVO₄ 晶体透射曲线的线宽(约 4GHz)小于标准具的线宽(约 15GHz), 当从小到大旋转标准具倾斜角时, 标准具的纵模透射峰由低频向高频移动, 当它的纵模透射峰与 Nd:YVO₄ 晶体的某一纵模透射峰重合时, 该频率处增益最大而最先起振, 而当标准具的纵模透射峰逐渐偏离 Nd:YVO₄ 晶体的纵模透射峰较远时, 但还是 Nd:YVO₄ 晶体的该纵模透射峰附近的频率增益最大, 所以输出频率偏移较小, 但输出功率降低较多. 标准具的纵模透射峰继续向高频移动时, Nd:YVO₄ 晶体的下一个纵模频率处增益变为最大, 因此激光输出频率跳跃到 Nd:YVO₄ 晶体的下一个纵模频率. 图 5 给出图 4 实验测得激光输出频率所对应的输出功率, 小黑点为实验测得的在不同倾斜角处激光输出功率, 虚线是由实验数据拟合出的输出功率曲线. 我们从图 5 看出在某一频率处标准具调谐的频率范围较窄(小于 1.5GHz), 但功率变化较大, 因此激光器输出频率在它的一个纵模间隔内(850MHz)漂移时, 功率波动可能小于 10%. 在要获得激光器频率调谐的同时得到稳定的激光输

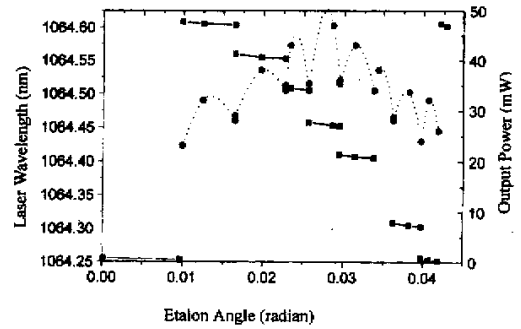


图 5 不同标准具倾斜角所对应的激光输出波长和功率. 小黑方块为实验测得的激光波长, 小圆点为激光输出功率, 泵浦功率为 300mW

Fig. 5 The experimental results of laser output wavelength and power versus the etalon angle. The dark squares are the measured wavelength and the dark circles are the output powers. Pump power is 300mW

输出功率, 必须使标准具的透射峰与 Nd:YVO₄ 晶体标准具的透射峰始终重合, 因此在调节标准具倾斜角的同时要调节 Nd:YVO₄ 晶体的倾斜角, 这样可同时获得激光频率调谐和输出功率稳定. 从图 4 还可看出正如方程 2 所示激光频率的调谐随标准具倾斜角的增大而二次非线性增加, 调谐速率随标准具倾斜角的增大而线性增加.

此外 Nd:YVO₄ 晶体的可调谐特性还表现在它的温度上, 虽然 Nd:YVO₄ 晶体控温在室温附近, 但改变激光器的泵浦功率时, 激光频率由大到小发生变化, 如图 6 所示. 这是由于一方面泵浦功率增大晶体热膨胀使厚度增大, 同时晶体折射率也增大, 因而导致晶体的标准具纵模向低频移动, 另一方面, 泵浦功率增大使增益区的温度升高, 导致晶体增益峰也向低频移动, 两者共同作用使激光输出频率随泵浦功率增大而向低频移动. 因此在实际使用中应考虑泵浦温升对光频率的影响.

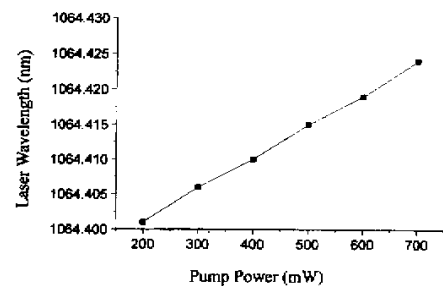


图 6 不同泵浦功率对应的激光输出波长

Fig. 6 The laser output wavelength versus the pump power

我们通过测定拍频信号显示激光频率的准确调谐性能. 图 7 给出了两台单频激光器的拍频信号, 在给定激光器 2 某一输出频率下, 我们首先通

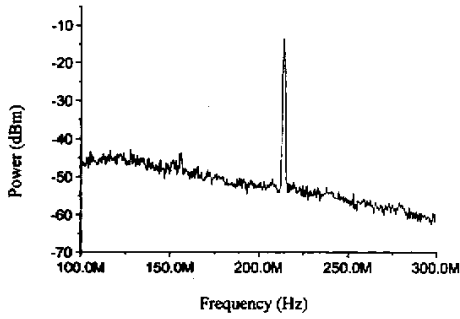


图 7 两台单频激光器 1 和 2 的拍频信号
Fig. 7 The beat note of two single-frequency lasers 1 and 2

过调节激光器 1 的标准具粗调激光频率, 使激光器 1 的输出频率接近于激光器 2, 然后调节 Nd : YVO₄ 晶体的倾斜角微调激光器 1 的输出频率, 最后通过腔镜上的压电陶瓷精确调节激光腔长达到精确调谐激光频率的目的, 这样激光器 1 的输出频率可迅速调谐到激光器 2 的输出频率上, 产生小于 500MHz 的拍频信号.

3 结论

我们在实验上研究了 LD 泵浦的 Nd : YVO₄ 单频环形激光器的频率调谐特性, 利用 Nd : YVO₄ 晶体自身的标准具作用, 通过调节标准具及 Nd : YVO₄ 晶体的倾斜角和谐振腔长, 可以精确调谐激光频率, 所获得的最大可调谐范围约 100GHz.

参考文献

- 1 Eickhoff M L, Hall J L. Optical frequency standard at 532nm. IEEE Trans Instrum Meas, 1995, 44(1): 155~158
- 2 Kane T J, Cheng E A P. Fast frequency tuning and phase locking of diode-pumped Nd : YAG ring laser. Opt Lett, 1988, 13: 970~972
- 3 Taira T, Mukai A, Nozawa Y, Kobayashi T. Single-mode oscillation of laser-diode-pumped Nd : YVO₄ microchip lasers. Opt Lett, 1991, 16(24): 1955~1957
- 4 Harrison J, Finch A, Flint J H, Moulton P F. Broad-band rapid tuning of a single-frequency diode-pumped neodymium laser. IEEE Quntum Electron, 1992, 28(4): 1123~1130
- 5 张靖, 张宽收, 王润林, 敦蕊香, 彭堃堃. 全固化单频 Nd : YVO₄ 环形激光器. 中国激光, 2000, 27(8): 694~696

INVESTIGATION OF FREQUENCY TUNING CHARACTERISTICS OF LD-PUMPED SINGLE-FREQUENCY RING Nd : YVO₄ LASERS

Zhang Jing, Wang Runlin, Ma Hongliang, Zhang Kuanshou, Xie Changde, Peng Kunchi

Institute of Opto-Electronic Research, Shanxi University, Key Laboratory for Quantum Optics,

Ministry of Education, Taiyuan 030006

Received date: 2000-09-10

Abstract Using the mode-selection property of the etalon inserted inside laser resonator and the laser rod, the precise frequency tuning of LD-pumped single-frequency ring Nd : YVO₄ laser has been demonstrated experimentally by means of adjusting the inclined angle of the etalon and laser rod as well as the length of resonator. The maximum tunable frequency range is about 100GHz.

Keywords Single-frequency ring laser; Tunable laser

Zhang Jing was born in Shanxi, 1974. He received the B. S. degree in Optics Technology from Huazhong University of Science and Technology (HUST), Wuhan, in 1995 and received Master degree from Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, in 1998. Now he is currently in the three year of Ph. D. program. His research interests in the technology of all-solid-state lasers, quantum optics and quantum information.