

2 μm 固体激光器的注入锁定

王振国 鞠有伦 李玉峰 吴春婷 王月珠

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 为了获得满足 2 μm 相干多普勒激光雷达使用的激光光源,进行了注入锁定固体激光器的实验研究。种子激光器采用双端镀膜腔的 Tm, Ho:YLF 微片晶体,在低温液氮环境下,获得单纵模稳频激光输出。从激光器采用有利于单纵模运转的环形腔结构,并利用熔融石英声光调 Q 获得脉冲输出。通过注入锁定,实验获得激光输出波长为 2.067 μm ,在重复频率大于 20 Hz 时,激光器的最终单脉冲输出能量 2 mJ,脉冲宽度为 146 ns。实验论证了注入锁定系统激光器作为雷达光源的可行性,并理论分析了种子注入时环形腔内的初始光场分布。

关键词 激光技术;单纵模;种子注入; Tm, Ho:YLF 晶体

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A

Injection-Locking 2 μm Solid-State Laser

Wang Zhenguo Ju Youlun Li Yufeng Wu Chunting Wang Yuezhu

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology,
Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract Injection-locking solid-state laser is studied to obtain the laser light for 2 μm coherent doppler lidar. Tm, Ho:YLF microchip crystal with both ends coated is used for the master laser. In order to obtain pulse laser, the structure of slave laser is toroidal and an infrared fused silica is used as acousto-optic Q-switch. The master laser as a seed is injected into the slave laser. Via injection-locked and amplification, the single longitudinal-mode and frequency-stabilization pulse 2 μm laser is obtained. A Q-switch output energy is 2 mJ at 20 Hz with a pulse width of 146 ns, and 4 mJ with a pulse width of 86 ns. The wavelength of the output is 2.067 μm . The feasibility is demonstrated that the injection-locking laser is used for 2 μm coherent doppler lidar. The initial optical field in the ring laser is discussed.

Key words laser technique; single-frequency; seed-injection; Tm, Ho:YLF crystal

1 引 言

大气风场是气候学研究的重要参量之一,大气中风速的测量对研究全球气候变化,提高数值天气预报的精度,监测机场气流,优化飞机、轮船航行路线具有举足轻重的作用,局部地区风场特征在火箭发射、航天飞机的起飞和着陆以及军事等方面都具有重要的意义^[1]。相干多普勒测风雷达是大气风场测量的有效手段,它是利用运动物体的多普勒频移效应,获得目标的径向速度分量^[2]。以 2 μm 固体激光器作为发射机的相干多普勒雷达 (Coherent Doppler lidar, CDL) 和差分吸收雷达 (Differential absorption lidar, DIAL) 是激光雷达研究的重点

之一^[3~9]。2 μm 固体激光器具有比气体激光器更小的体积和更低廉的成本^[10];并且 2 μm 固体激光器在增益介质的选择上具有很大的空间,激活离子多为 Tm^{3+} , Ho^{3+} , 或者 Tm^{3+} , Ho^{3+} 共掺杂,常用基质有 YLF, LuLF, GdVO_4 , YAG, LuAG 等;同时,它具有优异的大气传输特性以及处于人眼安全窗口 ($>1.4 \mu\text{m}$)。因此,2 μm 固体激光器成为相干多普勒测风雷达的首选光源。

相干多普勒激光雷达要求激光光源的输出既满足单纵模、窄线宽、高频率稳定度 ($>10^{-9}$),又要求有足够的单脉冲能量 ($>1 \text{ mJ}$) 和脉冲宽度 ($>100 \text{ ns}$)。这样的要求用单独的激光器几乎不可能达到。我们

作者简介: 王振国 (1982—),男,黑龙江人,博士研究生,主要从事固体激光器方面的研究。

E-mail: wangzhenguo_82@163.com

导师简介: 鞠有伦 (1967—),男,教授,博士生导师,主要从事固体激光器、光学参量振荡器等方面的研究。

E-mail: juyl@hit.edu.cn

采用种子注入放大系统,该系统包含一个主激光器(种子激光器)和一个从激光器(振荡级),主激光器可以获得单纵模、窄线宽、高频率稳定性的输出,从激光器具有足够的增益和腔长,容易得到足够的单脉冲能量和脉冲宽度。种子光经由耦合系统注入到从激光器谐振腔中,通过模式匹配以及闭环控制实现频率锁定,使得最终输出激光同时具有主激光器和从激光器的特点,从而满足多普勒相干测风雷达系统对雷达光源的要求。

2 理论分析

种子注入主振荡功率放大器(Master oscillator power amplifier, MOPA)的雷达光源在结构上可分为两个模块:主激光器(种子光)和从激光器(脉冲激光器)。连接两个部分的种子注入系统是其中的关键部分,否则主激光器和从激光器之间只能进行简单的激光放大。我们必须通过种子注入并实现锁定,用具有良好的空间特性和光谱特性的主激光器去控制一个具有较高能量的从激光器,并保持其高能量特性,使得最终激光输出同时具有良好的空间特性、光谱特性以及高能量,从而满足多普勒相干测风雷达系统对雷达光源的要求。

注入锁频的物理实质,是注入放大级谐振腔中的种子光模式与腔内本征模(自然模)之间的模竞争。种子注入光场的建立是从经典理论出发,将光考虑成光频电磁波场,它满足麦克斯韦方程组,各向同性均匀介质内光频场分布则满足矢量波动方程

$$\Delta^2 \mathbf{E} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} + \mu_0 \sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{P}}{\partial t^2}, \quad (1)$$

以 Tm, Ho: YLF 晶体为增益介质的激光器的输出为线偏振光,在假定介质的极化方向一致的情况下,可以将(1)式改写为标量方程。

本系统中的种子光和振荡光都是基横模运转,可以不考虑腔内的电场高阶模的影响。Fox 和 Li 已指出在垂直于激光轴的方向上场强的变化与光学波长相比是缓慢的。即 $\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} \gg \frac{\partial^2 E}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 E}{\partial y^2}$, 因此可以忽略光场在 x, y 方向上的导数,即近似认为光场只沿 z 轴变化,在 x, y 方向光强不变。于是腔内光场波动方程为

$$\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - \mu_0 \sigma \frac{\partial E}{\partial t} = \mu_0 \frac{\partial^2 P}{\partial t^2}, \quad (2)$$

(2) 式在形式上与经典的强迫阻尼振荡方程类同,右端项与电极化强度 P 有关,相当于驱动源,实际上表征了增益介质对光波场的增益作用。左端第

三项电场 E 对时间 t 的一阶微分则相当于阻尼作用。虽然腔内激光介质的电导率 $\sigma = 0$, 在(2)式中理解为光波场在腔内的吸收、衍射等损耗,对激光起阻尼衰减作用。

若种子信号从输出镜处注入,则如图 1 所示。图中 M_1 为输出镜, M_2 为全反镜。

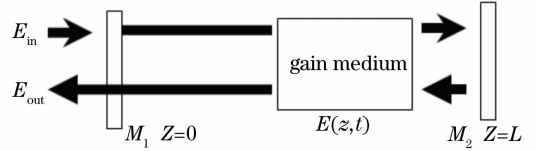


图 1 种子光注入示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the injection seeding
腔内光场复振幅为

$$\dot{E}(z, t) = \dot{E}_c(z, t) + \dot{E}_{mj}(z, t), \quad (3)$$

式中 $\dot{E}_{mj}(z, t)$ 为腔内无增益介质 [$\dot{P}(z, t) = 0$] 时, 种子激光在腔内形成的初始分布; $\dot{E}_c(z, t)$ 是以腔内初始光场分布(注入种子或者自发辐射噪声的初始场分布)为条件, 由于增益介质的受激辐射而产生的激光场分布。并利用在 M_1 处的边界条件, 可以得到在种子注入情况下腔内光场的波动方程表达式为

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} - \frac{1}{2} g(z, t) + \frac{\sigma}{2\epsilon_0 c} + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \right) \dot{E}_c(z, t) = \frac{1}{2} g(z, t) \dot{E}_{mj}(z, t). \quad (4)$$

可以看出, 注入信号与增益的乘积作为驱动源在方程的右端, 保证了激光振荡的维持。若不考虑噪声, 腔内电场的初始振荡状态完全受注入种子在腔内形成的初始光场的影响。

3 实验装置

实验装置如图 2 所示。种子激光器采用低温液氮制冷下的 Tm, Ho: YLF 微片结构, 主激光器的微

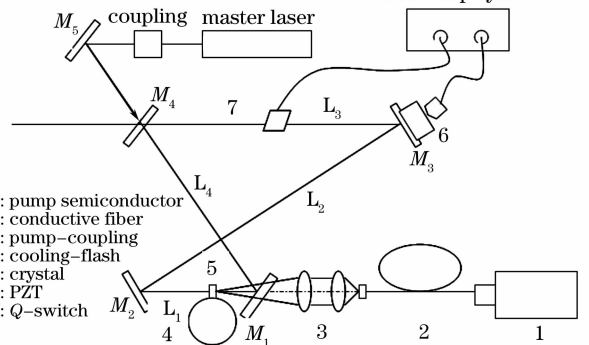


图 2 种子注入锁定实验装置示意图

Fig. 2 Schematic of injection seeded and locked

片结构起到了法布里-珀罗(F-P)选纵模的作用,加上双端镀膜使它本身就构成了一个腔,避免了空气扰动对激光输出频率的影响。此外,液氮制冷保证了对增益介质以及腔长的精确控温,从而保证了激光器的频率稳定性以及输出线宽。从激光器采用四镜8字环形腔。环形腔是行波腔,可以有效地消除空间烧孔效应,并且在得到长脉宽的同时又能保证激光器的体积不至于过大,适合于工程上的应用。环形腔由3个2 μm 全反镜和1个输出镜组成,单纵模的种子光从环形腔输出镜的一个方向注入,利用峰值检测法通过闭环控制系统控制压电陶瓷(PZT),使主激光器与从激光器的谐振频率相匹配,并控制熔融石英声光Q开关的状态,从而获得巨脉冲输出^[10]。虽然主激光器中的微片晶体和从激光器中的块状晶体是同一毛坯切割的Tm,Ho:YLF晶体,但为了使二者的波长更好地匹配,环形腔中的增益介质也采用低温液氮制冷方式。

实验采用光纤耦合输出的半导体激光器端面抽运,耦合光纤芯径为400 μm ,数值孔径NA为0.22。半导体激光器的最大输出功率为30 W,中心波长为792 nm,温漂为0.3 nm/ $^{\circ}\text{C}$,通过温度调节使其处于Tm,Ho:YLF晶体的吸收峰。端面抽运很容易实现抽运光和振荡激光模式的匹配,并在低功率下具有较高的抽取效率。抽运耦合系统采用传统的双透镜结构,耦合比例为1:1.5,使抽运腰斑半径与通过ABCD矩阵计算得到的腔内激光腰斑相匹配。由3个2 μm 全反镜和一个输出镜构成四镜8字环形腔,经计算将晶体放置在腔内激光腰斑处,以尽量减少热效应带来的影响。抽运经由2 μm 全反镜 M_1 聚焦在晶体上,腔内激光传播过程为 $M_1-M_2-M_3-M_4-M_1$,这样就形成了封闭的光路,其中 M_1,M_2 为平镜, M_3 为凹镜,均镀有2 μm 全反膜, M_4 为输出镜。主激光器与从激光器之间必须放置光学隔离器,为了避免从激光器的反向输出损坏主激光器器件以及对主激光器输出模式频率等的影响。

4 实验结果与分析

微片结构种子激光器的基横模单纵模、频率稳定的输出功率为6 mW,并用光纤延迟自拍法对其稳定性进行了测量,得到短期稳定度为2.6 kHz/ μs 。经由耦合系统将种子激光注入到从激光器中,在从激光器小功率连续运转时,观察到了模式牵引现象,即环形腔的振荡模式在种子光注入时,与种子模相邻的纵模频率会向种子模跳跃。通过调节耦合系统,

使主激光器与从激光器进行良好的模式匹配。图3为注入时种子光的模式图,测量所用共聚焦法布里-珀罗标准具的自由光谱区(FSR)为3.75 GHz。

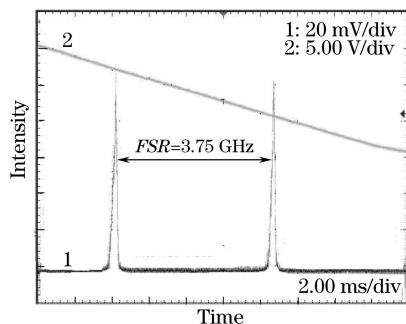


图3 Tm,Ho:YLF微片的单纵模输出图

Fig. 3 Longitudinal mode output of the Tm,Ho:YLF microchip laser

在保持种子注入的情况下,频率未锁定与实现频率锁定时,从激光器的输出有很大变化。作为从激光器的环形腔,在频率未锁定到频率锁定的瞬间,由初始的双向输出变为单向输出。自由运转行波腔的腔内振荡是在自发辐射噪声的初始激光场中建立起来的,腔内双向振荡激光的增益相当,表现为双向输出,但在种子注入并实现频率锁定时,当种子光能量(与自发辐射噪声相比)足够高的时候,腔内振荡激光是在种子光场下建立起来的,增益介质的受激辐射光具有与种子光相同的频率、传播方向、偏振态以及相位,从而实现单向输出。在重复频率23 Hz下获得了2 mJ能量的脉冲输出,输出脉宽为146 ns。当输出能量为4.20 mJ,1.08 mJ,0.52 mJ,输出脉宽相应为86 ns,215 ns,297 ns。与此同时,从激光器的脉冲输出也发生了很大变化,主要体现在脉冲宽度、脉冲上升沿、脉冲稳定性以及脉冲建立时间缩短等方面。这些变化在图4(a)和(b)的对比中可以很明显地观察到,脉冲宽度缩短了20 ns,脉冲上升时间缩短近30 ns,而且脉冲形状也更加对称,并用能量计与示波器进行脉冲序列抓拍,可以计算得到脉冲能量稳定性由未锁定下88.7%上升到98.9%,稳定性增加了10%以上。脉冲建立时间缩短了近500 ns。

根据理论分析,注入锁定时,激光器谐振腔是以种子光形成初始场,这要比自发辐射噪声光场强得多,从而脉冲建立时间变短。当上能级粒子数积累到一定程度时调Q元件打开,振荡光得以建立,但在强种子光场下的受激辐射要比在相干性很差的自发辐射噪声中快得多,并且向下跃迁的速度也要快很多,故而脉冲上升沿会变陡,同时脉冲宽度变窄。

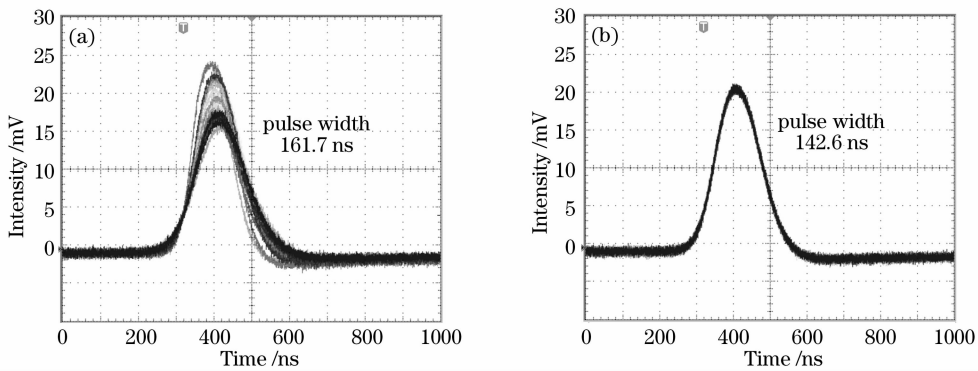


图 4 未实现(a)和实现(b)频率锁定时的脉冲输出

Fig. 4 Output-pulse when frequency-unlocked (a) and frequency-locked (b)

5 结 论

采用种子注入系统, Tm, Ho: YLF 微片获得单纵模、窄线宽、频率稳定的小功率激光输出, 并将其注入到腔长较长的从激光器中, 从激光器的增益介质也采用 Tm, Ho: YLF 晶体, 通过锁定放大方式, 获得激光输出波长为 $2.067 \mu\text{m}$, 在重复频率大于 20 Hz 时, 激光器的最终单脉冲输出能量为 2 mJ, 脉冲宽度为 146 ns。最终得到 $2 \mu\text{m}$ 的单纵模、稳频的巨脉冲输出, 从而满足多普勒相干测风雷达系统对雷达光源的要求。

参 考 文 献

- 1 Zhou Xiaolin, Sun Dongsong, Zhong Zhiqing *et al.*. Development of Doppler wind lidar[J]. *J. Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, **2**(3): 161~168
周小林, 孙东松, 钟志庆 等. 多普勒测风激光雷达研究进展[J]. *大气与环境光学学报*, 2007, **2**(3): 161~168
- 2 Shen Xiong. Technology and Application of Laser Doppler Velocimetry[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004
沈 熊. 激光多普勒测速技术及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004
- 3 Grady J. Koch, John P. Deyst, Mark E. Storm. Single-frequency lasing of monolithic Ho, Tm: YLF[J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(15): 1235~1237

- 4 Grady J. Koch, Amin N. Dharamsi, Colleen M. Fitzgerald *et al.*. Frequency stabilization of a Ho, Tm: YLF laser to absorption lines of carbon dioxide[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(21): 3664~3669
- 5 Grady J. Koch, Bruce W. Barnes, Mulugeta Petros *et al.*. Coherent differential absorption lidar measurements of CO₂[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(26): 5092~5099
- 6 Zhao Peitao, Zhang Yinchao, Hu Shunxing *et al.*. Design of beam-splitting optical path for differential absorption air pollution monitoring lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 957~961
赵培涛, 张寅超, 胡顺星 等. 差分吸收测污激光雷达光路分束设计[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 957~961
- 7 Grady J. Koch, Mulugeta Petros, Jirong Yu *et al.*. Precise wavelength control of a single-frequency pulsed Ho, Tm: YLF laser[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(9): 1718~1721
- 8 Upendra N. Singh, Jirong Yu, Mulugeta Petros *et al.*. Injection-seeded, room-temperature, diode-pumped Ho, Tm: YLF laser with output energy of 600 mJ at 10 Hz[C]. *OSA Trends in Optics and Photonics Series*, 1998, **19**: 194~196
- 9 Wang Yingqiang. Coherent Doppler lidar technology[J]. *Radar Science and Technology*, 2007, **5**(2): 100~104, 114
王迎强. 相干多普勒激光雷达技术[J]. *雷达科学与技术*, 2007, **5**(2): 100~104, 114
- 10 Wang Zhenguo, Ju Youlun, Wang Yuezhu. Injection-locked solid-state laser at $2 \mu\text{m}$ [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(8): 1031
王振国, 鞠有伦, 王月珠. 实现 $2 \mu\text{m}$ 固体激光器的注入锁定[J]. *中国激光*, 2007, **34**(8): 1031