

液氧的小信号增益测试

石 喆^{1,2} 李 慧^{1,2} 刘金波² 周灿华² 蔡向龙^{1,2} 蔡红星¹ 刘万发² 郭敬为²

¹ 长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022
² 中国科学院大连化学物理研究所化学激光重点实验室, 辽宁 大连 116023

摘要 利用波长可调谐光学参量振荡器(OPO)测量了液氧在 1580 nm 波长附近的小信号增益,在 1579.9 nm 波长处获得了 0.12 cm^{-1} 的小信号增益,并获得了从 1579.2 nm 至 1580.8 nm 的小信号增益分布情况。正增益的获得表明液氧在小信号增益层面上满足作为一种高能激光工作介质的要求。还需要对实验条件进行全面的参数优化,以尽可能提高小信号增益。

关键词 激光光学; 小信号增益测试; 液氧; 增益分布

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0602004

Small Signal Gain Measurement of Liquid Oxygen

Shi Zhe^{1,2} Li Hui^{1,2} Liu Jinbo² Zhou Canhua² Cai Xianglong^{1,2} Cai Hongxing¹

Liu Wanfa² Guo Jingwei²

¹ School of Science, Changchun University of Science and Technology, Jilin, Changchun 130022, China
² Key Laboratory of Chemical Laser, Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Liaoning, Dalian 116023, China

Abstract The small signal gain of the liquid oxygen around 1580 nm is measured using a tunable optical parametric oscillator (OPO) system. A small signal gain of 0.12 cm^{-1} is obtained at the wavelength of 1579.9 nm. The profile of small signal gain from 1579.2 nm to 1580.8 nm is also presented. The high positive gain indicates that the liquid oxygen is a potential medium for high energy laser. A comprehensive parameter optimization must be done in order to improve the small signal gain.

Key words laser optics; small signal gain measurement; liquid oxygen; gain profile

OCIS codes 140.3070; 140.3380; 140.3460

1 引 言

液氧是一种非常有可能成为高能激光工作介质的物质。在 1064 nm 波长激光为抽运光时其输出激光波长为 1580 nm,是对人眼相对安全的波长,该波长有着良好的大气传输效果;此外液氧还具有吸收系数高等优点^[1]。把液氧作为一种潜在的高能连续激光工作物质的研究始于 20 世纪 70 年代,Portz 等^[2-3]在 1979 年和 1980 年研究了在 1064 nm 波长激光抽运条件下液氧各电子能级的寿命,电子能态

基态的第一振动激发态的振动-平动弛豫等。1981 年,Yamagishi 等^[4]在相同的实验背景下采用单光子计数技术观测到了不同波长的液氧荧光谱线^[4],但是关于液氧小信号增益的研究还未见报道。

研究增益的方法有在无探测光源条件下的衰减法和变耦合率法以及有探测光源条件下的放大法^[5]。本文主要介绍采用有探测光源的放大法,在抽运光为 1064 nm 波长激光条件下,对液氧在 1580 nm 处的小信号增益进行研究。

收稿日期: 2013-10-08; 收到修改稿日期: 2013-11-21

作者简介: 石 喆(1986—),男,硕士研究生,主要从事新型液体激光方面的研究。E-mail: laser532@126.com

导师简介: 郭敬为(1973—),男,博士,副研究员,主要从事激光与物质相互作用方面的研究。

E-mail: jingweigu@dicp.ac.cn(通信联系人)

2 实验部分

实验装置如图 1 所示,单模稳频的 Surelite EX Nd:YAG 激光器出射的 1064 nm 波长的激光被分束镜分为 2 束,一束作为液氧的抽运光,另一束作为 Laser Vision 光学参量振荡器(OPO)的抽运光。OPO 采用双光栅光腔,输出激光线宽为 0.15 cm^{-1} 。1064 nm 波长的激光经反射镜 M2 反射后与 OPO 发出的 1580 nm 激光在二向色镜(DC)处合束。合束后 1580 nm 波长激光的光斑位置在 1064 nm 波长激光光斑的中心处,两束光合束后入射至液氧池中。OPO 发出的 1580 nm 激光被分束镜分成 3 束,一束由光纤收集传输到波长计,以此来监测激光波长;另一束由光电探头 I 接收并由示波器记录,用以监测 1580 nm 波长激光的波形和强度,以此来消除探测光源的不稳定性和光路系统带来的误差,确保实验的准确性。第 3 束光与 1064 nm 波长激光合束后入射至液氧池中。由于 OPO 出射的 1580 nm 波长激光的强度远远大于实验所需的强度,因此在开始几次测量的结果显示小信号增益为平顶增益饱和分布。1580 nm 波长的激光其偏振态为水平偏振,加入衰减片使 1580 nm 波长的激光以掠入射的方式入射,通过 8 片衰减片后 1580 nm 波长激光衰减至纳焦级别,测得的实验结果为一个单峰分布的曲线。

在液氧池后放置 1580 nm 的带通滤波片(BPF),1064 nm 的高反镜(HR)和 1270 nm 的高通滤波片,确保非信号光被滤除掉,通过滤波片的信号光由光电探头 II 接收并由示波器记录。

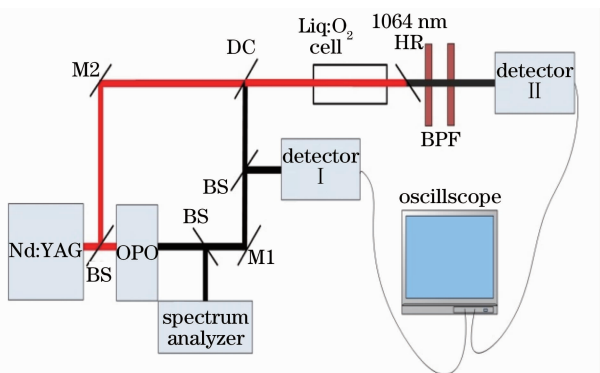


图 1 小信号增益测试装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of small signal gain measurement system

采用放大法时沿光程方向增益介质的小信号增益系数 $G(\text{cm}^{-1})$ 定义为

$$G = \frac{\ln(I/I_0)}{L}, \quad (1)$$

式中 L 为激光介质增益区长度, I_0 为经过增益介质

无抽运光情况下时的光强, I 为经过增益介质放大后的出射光强^[5]。

实验中,先开启 Nd:YAG 激光器,1064 nm 波长激光二倍频后抽运 OPO 产生 1580 nm 波长的激光,通过控制软件调节 OPO 的输出波长,输出波长控制在 1579.2~1580.8 nm 范围内,OPO 的出射光分别由波长计和光电探头 I 监测,以此来确保出射波长的准确性和实验的准确性。光电探头 II 探测经过液氧池后每个波长的光对应的光强 I 。并传输至示波器记录,在此过程中,无 1064 nm 波长的激光入射到液氧池中。随后重复上述步骤,此时 1064 nm 波长的激光与 OPO 出射的光在 DC 处合束后一起入射到液氧池中心处,抽运光 1064 nm 波长的激光在入射至液氧池前强度为 7.53 mJ,光斑直径为 9 mm,经过两个镜片后入射至液氧池中。由于镜片对入射光的损耗,如设置液氧池中的 1064 nm 波长激光强度约为 6.37 mJ,同样由光电探头 II 探测经过液氧池后每个波长对应的光强 I 并传输至示波器记录。

3 实验结果与讨论

抽运光、探测光和放大光的波形如图 2 所示。为了使图 2 中的信息更直观,采用了归一化处理,并将 1064 nm 光波形曲线上移了 0.2 个单位。

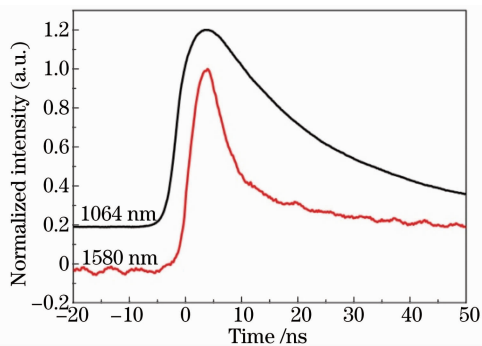


图 2 抽运光与探测光归一化后的波形图

Fig.2 Normalized pump and probe light waveform

从图 2 中可以看出,抽运光与探测光在时间上同步,抽运光波形如图 2 中上方曲线所示,探测光和放大光经过归一化之后,波形一致,如图 2 中下方曲线所示。

归一化后 I 与 I_0 随波长变化规律如图 3 所示。从图 3 可以看出在 1579.5~1580.1 nm 之间 I 强于 I_0 。为减小读数误差,每个波长对应的 I 与 I_0 用示波器记录 500 个脉冲信号,每组数据分别测量 4 次,然后取平均值。

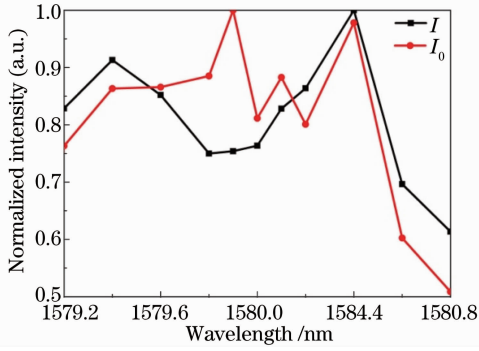


图3 归一化的探测、放大光强随波长的变化

Fig. 3 Normalized probe and amplified light intensity as a function of wavelength

利用图3中的数据根据(1)式得到的增益系数曲线如图4所示,三角形代表实验数据点,实线为实验数据的洛伦兹拟合曲线。

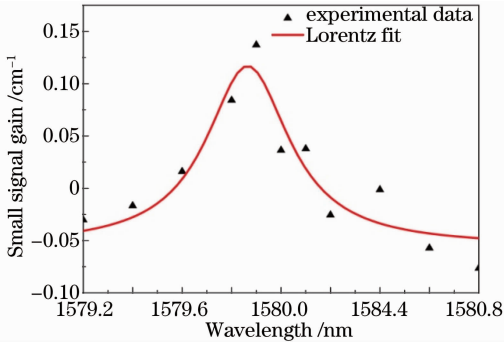


图4 液氧小信号增益测试结果

Fig. 4 Small signal gain measurement at different wavelengths

从图4可以看出小信号增益系数随波长的变化,在1579.5~1580.1 nm范围内其增益为正,并且在1579.9 nm处增益系数最大,约为0.13 cm⁻¹,拟合后其峰值约为0.12 cm⁻¹,半峰全宽为0.3 nm。

液氧的受激发射截面定义为^[6]

$$\sigma_{ul}(\nu) = \frac{A_{ul}\lambda^2}{8\pi n^2} g(\nu), \quad (2)$$

式中 A_{ul} 为爱因斯坦自发发射系数, τ_r 为 A_{ul} 的倒数, λ 为波长, n 为液氧在波长为 λ 时所对应的折射

率, $g(\nu)$ 为对应的线形函数。液氧中主要的加宽因素是由碰撞引起的加宽,考虑到液氧的温度非常低,氧分子的运动速度很低,因此由碰撞引起的加宽以及多普勒加宽的作用并不明显,因此高斯线形函数可以近似地写为^[6]

$$g(\nu) = \frac{2}{\Delta\nu} \left(\frac{\ln 2}{\pi} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

式中线宽 $\Delta\nu$ 可以写为

$$\Delta\nu = \left(\frac{c}{\lambda^2} \right) \Delta\lambda, \quad (4)$$

式中 c 为光速,将其带入(4)式中,整理得

$$\sigma_{ul}(\nu) = \frac{\lambda^3}{4c\pi n^2} \frac{1}{\Delta\lambda} \frac{1}{\tau_r} \left(\frac{\ln 2}{\pi} \right)^{1/2}. \quad (5)$$

在1580 nm波长处,液氧的折射率为1.22^[7],抽运光为单纵模的1064 nm激光,其线宽为0.003 cm⁻¹,1580 nm激光出光体系中上能级的辐射寿命为4 s,经计算在1580 nm波长处的受激发射截面为1.8×10⁻¹⁸ cm²。

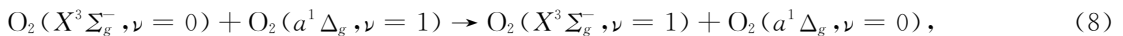
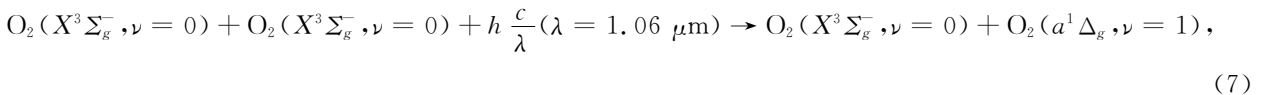
根据量子力学理论,小信号增益表达式为^[8]

$$G = \sigma_{ul} \left[N_{\Delta} - \left(\frac{g_1}{g_u} \right) N_{\text{vib}} \right], \quad (6)$$

式中 σ_{ul} 为液氧的受激发射截面, N_{Δ} 和 N_{vib} 分别为上、下能级粒子数密度, g_1 和 g_u 为统计权重。在整个测量过程中,上能级的粒子数密度始终远远大于下能级的粒子数密度,所以统计权重的取值对于计算结果的影响可以忽略不计。对1064 nm激光的分布情况进行了初步简单的测量,通过实验测量了65个数据点,发现其分布为平顶高斯分布,光束中心位置的光强约是其平均值的1.67倍。

经(6)式计算,在1064 nm波长激光抽运条件下1580 nm波长处其小信号增益为0.15 cm⁻¹。实验数据拟合后液氧在1579.9 nm波长位置的小信号增益为0.12 cm⁻¹。

实验结果与理论计算结果基本相吻合,出现的误差来源于两个方面:1)当抽运光波长为1064 nm时其相应的两个跃迁为^[9]



处于电子激发态第一振动能级的 $\text{O}_2(a^1\Delta_g, \nu = 1)$ 与基态的 $\text{O}_2(X^3\Sigma_g^-, \nu = 0)$ 会发生近共振传能,其结果为 $\text{O}_2(a^1\Delta_g, \nu = 1)$ 会迅速弛豫到 $\text{O}_2(a^1\Delta_g, \nu = 0)$

态, $\text{O}_2(X^3\Sigma_g^-, \nu = 0)$ 会跃迁至基态第一振动激发态 $\text{O}_2(X^3\Sigma_g^-, \nu = 1)$, 当这两个过程达到平衡后, $\text{O}_2(a^1\Delta_g, \nu = 0)$ 的产率为84%, $\text{O}_2(X^3\Sigma_g^-, \nu = 1)$ 的

产率为 16%^[10], 此时计算的小信号增益为 0.108 cm^{-1} , 而在不考虑上述过程时小信号增益的计算结果为 0.15 cm^{-1} 。上述的平衡需要一定的时间, 而在 10 ns 的测量时间内, 其产率并没有达到平衡后的产率, 因此实验值将介于理论计算的最大值和最小值之间, 而测量的实验值为 0.12 cm^{-1} , 恰好处于理论计算值范围之内; 2) 液氧中含有微量的干冰等杂质以及液氧池两端的窗口对信号光的散射导致实验结果偏小。

4 结 论

采用探针光放大法, 首次对液氧在不同波长位置处的小信号增益系数进行了初步测试, 获得了明显的正增益信号, 拟合后获得的最大增益约为 0.12 cm^{-1} , 并且获得了不同波长位置处的增益信号。该结果证明液氧是一种非常有前景的高能激光工作介质, 与此同时需要针对实验进行全面的参数优化, 以获得尽可能大的小信号增益。目前对该系统有严重制约的参数是液氧的纯度, 由于液氧中混有干冰等其他杂质, 对于测试结果有一定的影响。

参 考 文 献

1 A Kumar, R Rajesh, G Singhal, *et al.*. Analysis of various optical pumping schemes for liquid oxygen laser[J]. Appl Phys,

2007, 89(2-3): 358-394.

- 2 R Portz, M Marei. Temperature dependence of vibrational energy in liquid oxygen[J]. Chem Phys Lett, 1979, 64(1): 27-31.
- 3 R Portz, M Marei. Concentration and temperature dependence of electronic and vibrational energy relaxation of O₂ in liquid mixtures[J]. Chem Phys Lett, 1981, 62(3): 377-385.
- 4 A Yamagishi, T Ohta, J Konno, *et al.*. Visible fluorescence of liquid oxygen excited by a Q-switched Nd:YAG laser[J]. J Opt Soc Am, 1981, 71(10): 1197-1201.
- 5 Duo Liping, Sang Fengting, Jin Yuqi, *et al.*. The experiment study of two-dimensional distribution of the small-signal gain for supersonic chemical oxygen-iodine laser[J]. Chinese J Lasers, 1997, 24(4): 289-291.
多丽萍, 桑凤亭, 金玉奇, 等. 燃烧驱动全气相碘激光的小信号增益测试[J]. 中国激光, 1997, 24(4): 289-291.
- 6 W Koehner. Solid State Laser Engineering[M]. 5th ed. Berlin: Springer, 1999.
- 7 J A Fleming, J Dewar. On the dielectric constant of liquid oxygen and liquid air[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1896, 60: 358-368.
- 8 Tang Haibin, Zhu Shouen, Li Lu, *et al.*. Calculation and experiment of small signal on solid propellant combustion driven CO₂ gasdynamic laser[J]. Chinese J Lasers, 2002, 29(5): 393-396.
汤海滨, 祝寿恩, 李 陆, 等. 固体推进剂燃烧驱动的 CO₂ 气动激光器小信号增益的计算与实验研究[J]. 中国激光, 2002, 29(5): 393-396.
- 9 D L Huestis. Challenges for lasers in liquid oxygen[J]. Chem Phys Lett, 2005, 411(1): 108-110.
- 10 K R Hobbs, B V Zhdanov, T L Henshaw, *et al.*. Singlet delta oxygen kinetics in optically excited liquid oxygen[C]. SPIE, 2004, 5334: 100-110.

栏目编辑: 宋梅梅