

连续波氟化氢激光输出光谱特性研究

郭建增, 王杰*, 赵海涛, 颜飞雪, 任晓明, 杨珍

中国船舶重工集团公司第七一八研究所, 河北 邯郸 056027

摘要 设计了 V 型折叠非稳定光学谐振腔, 对不同氧化剂过量系数条件下连续波氟化氢 (HF) 激光输出谱线变化规律进行分析。结果表明, 在合适的激光反应体系配方和光学谐振腔参数下, 波长大于 $2.87 \mu\text{m}$ 的 2P8 和 2P9 等 HF 激光长波谱线能够有效输出。调节燃烧室反应相对氧化剂过量系数, 控制参与光腔激射反应的自由氟原子量, 能够在一定程度上调节 HF 激光输出谱线分布。激光器输出功率与增益系数密切相关, 单支谱线的最高输出功率与其最大增益系数相对应, 激光器最高输出功率与各支谱线增益系数之和的最大值相对应。

关键词 激光器; 氟化氢激光器; 非稳腔; 输出光谱; 级联谱线

中图分类号 TN248.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.021404

Output Spectrum of Continuous Wave Hydrogen Fluoride Laser

Guo Jianzeng, Wang Jie, Zhao Haitao, Yan Feixue, Ren Xiaoming, Yang Zhen

The 718th Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Handan, Hebei 056027, China

Abstract A V-model unstable optical resonator is designed, and the rule of the output spectrum of continuous wave hydrogen fluoride (HF) laser is discussed on the condition of different oxidant excess indexes. Spectral lines corresponding to wavelength over $2.87 \mu\text{m}$, such as 2P8 and 2P9, are obtained efficiently under appropriate reaction formula and optical resonator parameters. We can partly regulate the distribution of HF laser output spectrum by adjusting the combustor oxidant excess index and controlling the amount of free fluoride atom lasing reaction. The output power of laser is closely related to the gain coefficient. The maximal output power of a single spectral line is determined by its maximal gain coefficient, while the maximal output power of the laser depends on the maximal value of the sum of all spectral lines gain coefficients.

Key words lasers; hydrogen fluoride chemical laser; unstable cavity; output spectrum; cascade lines

OCIS codes 140.1550; 300.6170; 070.4790; 310.6188

1 引言

燃烧驱动连续波氟化氢 (HF) 化学激光器是高效率激光器的典型代表之一, 由于具有良好的工程放大性和 $2.5 \sim 3.1 \mu\text{m}$ 的中红外输出光谱, 在红外对抗等领域具有广泛的应用^[1-3]。一般来说, 燃烧驱动型 HF 化学激光器主要采用冷抽运反应产生激活介质, 其输出光谱中仅能观察到振动能级 2-1 和 1-0 两个谱带的跃迁谱线, 且转动能级较低, 难以高效输出波长大于 $2.87 \mu\text{m}$ 的谱线^[4-6]。本文通过优化激光器结构参数和调整反应体系配方, 实现了 HF 激光

输出光谱向长波的转移, 可以高效输出波长大于 $2.87 \mu\text{m}$ 的 2P8、2P9 等长波谱线, 在一定程度上拓宽了 HF 激光的实用光谱范围^[7]。长波 HF 激光谱线增益较小, 采用稳定光学谐振腔输出耦合率仅为 3%。对于高功率 HF 化学激光器而言, 非稳定光学谐振腔条件下的光束质量优于稳定腔条件^[8-10], 但前者的输出损耗较大, 波长大于 $2.87 \mu\text{m}$ 的长波谱线未必能得到有效输出。为此, 本文设计一种 V 型折叠的非稳定光学谐振腔, 并通过实验和理论分析对连续波 HF 激光器输出光谱特性进行了研究讨论。

收稿日期: 2017-07-19; 收到修改稿日期: 2017-08-28

基金项目: 总装预研项目(51326010201)

作者简介: 郭建增(1965—), 男, 博士, 研究员, 主要从事高能激光技术方面的研究。E-mail: Guojianzeng718@126.com

* 通信联系人。E-mail: wangjie_24@163.com

2 光学谐振腔与测试光路

图1是V型折叠非稳定光学谐振腔及测试光路示意图。V型折叠非稳腔由凹镜、平面转折镜、凸镜和输出镜(刮刀镜)组成,放大率(M 值)为1.6,即输出光斑为外径与内径之比为1.6的空心环状光

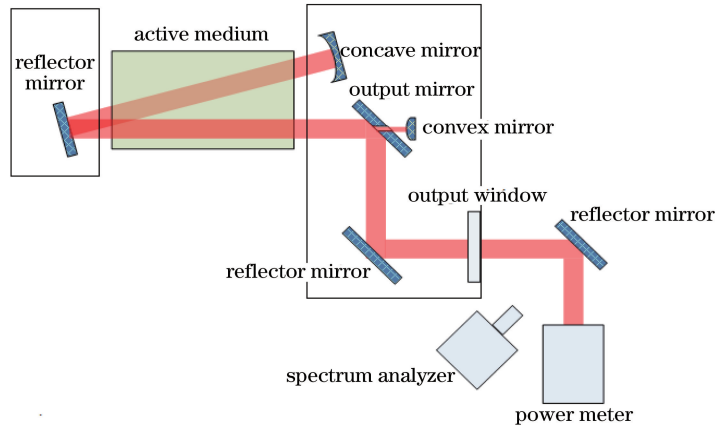


图1 光学谐振腔及测试光路示意图

Fig. 1 Schematic of optical resonator and testing optical path

考虑到 HF 激光输出谱线受大气中水汽和二氧化氮吸收的影响^[11-12],实验前对实验室进行除湿处理,并尽量缩短腔外 45°全反镜与强光输出窗口、光谱仪、全吸收能量计的距离,同时在外光路测试区域增加干燥氮气吹气净化处理。

3 输出光谱及分析

图2是非稳腔条件下燃烧驱动连续波 HF 激光实测光谱。输出光谱包含 10 条谱线,分别是基于一能级跃迁的 1P6、1P7、1P8、1P9、1P10 谱线和二能级跃迁的 2P6、2P7、2P8、2P9、2P10 谱线,且两簇谱线分别以 1P8 和 2P8 为中心趋于正态分布。理论上,对于 HF 激光器的某支谱线,只要其增益大于损耗就能够有效输出。在传统经典 HF 激光中,1P9、1P10、2P8、2P9、2P10 等谱线可被认为是高转动量子跃迁的长波谱线,其增益极小。在特定的激光反应配方下,采用低耦合率(3%)的单通稳定腔,这些谱线能够高效输出^[7]。在实际应用中,非稳腔输出的激光具有更好的光束质量和实用价值,但其输出损耗较大。根据理论分析与计算,通过优化激光反应配方和光学谐振腔参数(确保相应谱线的增益大于损耗),实现非稳腔条件下 2P8、2P9、2P10 等波长大于 2.87 μm 谱线的有效输出。

图3是 HF 激光器在非稳腔条件下,1 s 出光过程中输出谱线的相对强度分布。图中横坐标的采样

斑。输出镜输出的强激光经 45°全反镜后从输出窗口传出,再经过腔外的 45°全反镜反射进入全吸收能量计。光谱仪测量腔外 45°全反镜上强激光散射而获得光谱。实验中使用的光谱仪为 D&P 公司的傅里叶光谱仪,实验前采用 3039 nm 标准光源进行标定。

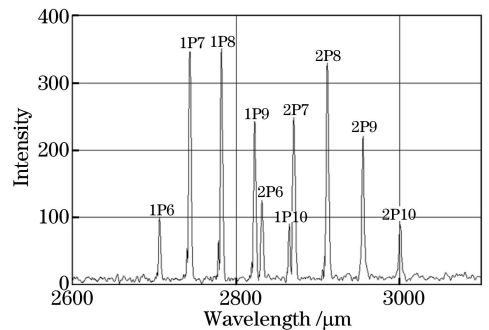


图2 非稳腔条件下, HF 激光器实测光谱

Fig. 2 Measured spectrum of HF laser in the non-stable cavity condition

点数表示光谱仪采样频率,纵坐标是基于各支谱线峰值强度计算获得的比例权重。由图3可知, HF 激光输出的 10 条谱线所占比重随时间变化呈现一定波动, 1P7 和 2P8 谱线所占比重分别由 14.1% 和 15.1% 增加至 16.5% 和 16.8%, 远离两簇正态分布谱线中心的 1P6 和 2P10 谱线所占比重分别由 4.2% 和 6.5% 减少至 2.8% 和 2.1%, 其他各支谱线所占比重相对稳定但也存在一定的起伏变化, 表明 HF 激光输出的各支谱线之间存在相互竞争(包括谱带内和谱带间竞争)。进一步分析发现, 对于一能级和二能级跃迁的 2 簇谱线而言, 靠近中心的谱线在竞争中占有优势, 远离中心的边缘谱线在竞争中处于劣势。而且, 相互级联的 4 组谱线(1P7 和 2P6、1P8 和 2P7、1P9 和 2P8、1P10 和 2P9)所占比重之和超过 90%。

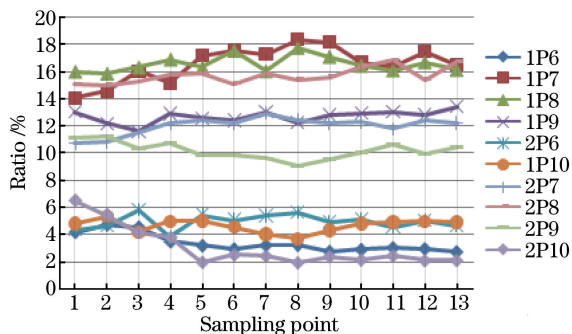


图 3 HF 激光各支谱线强度分布

Fig. 3 Intensity distribution of each spectral line of HF laser

根据 HF 激光快速弛豫理论,增益介质的温度(光腔静温)属性在一定程度上影响输出光谱及分布^[1,7],因此,对不同氧化剂(氟)过量系数条件下 HF 激光输出谱线进行研究。图 4 是相对氧化剂过量系数为 0.94 时, HF 激光实测光谱。相对氧化剂过量系数是指实验中实际氧化剂过量系数与标准配方条件下氧化剂过量系数的比值。对比图 2 可知, HF 激光输出谱线减少至 8 条,转动量子数较大的 1P10 和 2P10 谱线消失,基于一能级和二能级跃迁的两簇谱线的中心谱线向短波方向转移至 1P7 和 2P7 谱线。这说明通过减小相对氧化剂过量系数,可以减少参与光腔激射反应的自由氟原子以降低光腔静温,实现 HF 激光输出谱线向短波方向的转移。

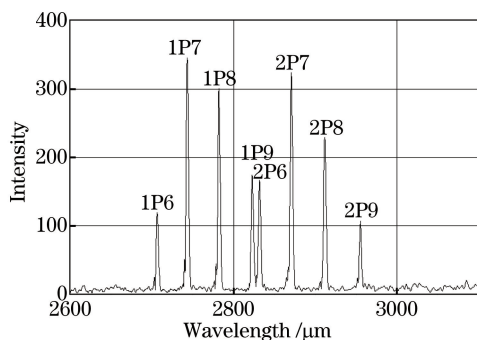
图 4 相对氧化剂过量系数为 0.94 时, HF 激光实测光谱
Fig. 4 Measured spectrum of HF laser when the relative oxidant excess index is 0.94

图 5 是不同相对氧化剂过量系数下 HF 激光输出的各支谱线的强度分布。对单支谱线而言,相对氧化剂过量系数为 0.96 时, 1P6、1P7、1P8、2P7 等转动量子数小的短波谱线所占比重最大,相对氧化剂过量系数为 1.02 时, 1P9、1P10、2P9、2P10 等转动量子数大的长波谱线所占比重最大,即适当增加氟以提高腔温有利于长波谱线的输出。随着相对氧化剂过量系数由 0.96 增加至 1.02, 1P9、1P10、2P9、2P10

等谱线所占比重逐渐增加, 1P6 和 2P7 谱线所占比重逐渐减小, 1P7 和 1P8 谱线所占比重先减小后增加, 2P6 谱线所占比重先增加后减小, 这表明对单一谱线而言存在最优的反应配方。

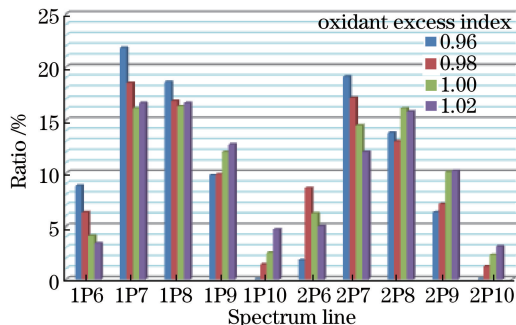
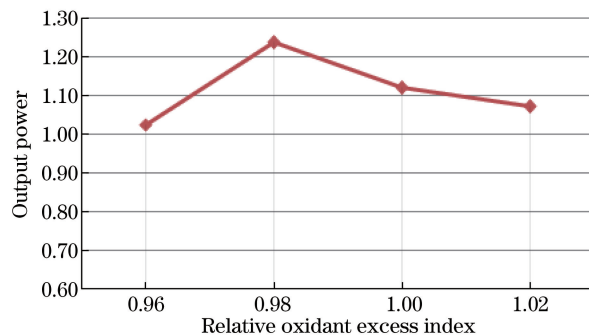


图 5 HF 激光输出谱线强度分布

Fig. 5 Intensity distribution of spectrum lines of HF laser

图 6 是不同相对氧化剂过量系数条件下, HF 激光的输出功率。相对氧化剂过量系数为 0.98 时, HF 激光输出功率最大。在此条件下增加或减少氟, 激光器总的输出功率均减小, 即对某一固定的激光器装置而言, 存在最佳反应配方, 在该配方条件下激光器总的输出功率达到最大值。

图 6 不同氧化剂过量系数下 HF 激光输出功率
Fig. 6 Output power of HF laser under different oxidant excess indexes

根据图 5 和图 6, 将激光器总的输出功率乘以各支谱线所占比重并进行无量纲处理, 获得不同氧化剂过量系数下 HF 激光输出各支谱线的相对增益系数, 如图 7 所示。对比图 5 可知, 某一支谱线(如 1P7、1P8、2P7 等)所占比重与增益系数并不是完全对应的。高转动量子数跃迁的 1P9、1P10、2P9、2P10 谱线所占比重与增益系数一致, 均是在多氟条件下达到最大。相对氟原子过量系数为 0.98 时, 互为级联的 1P7 和 2P6、1P8 和 2P7 谱线增益系数达到最大。对每一支谱线而言, 输出功率与其增益系数密切相关, 单支谱线的最高输出功率与其最大增

益系数相对应,激光器最高输出功率与各支谱线增益系数之和的最大值相对应。

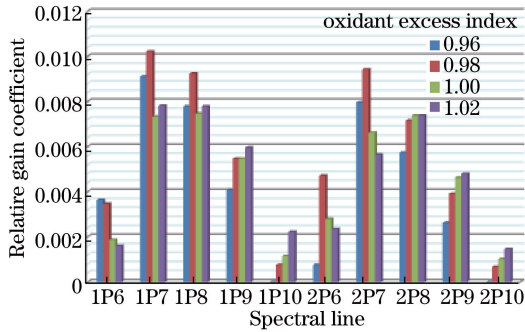


图7 HF激光输出谱线相对增益系数

Fig. 7 Relative gain coefficient of output spectral lines of HF laser

4 结 论

设计一种V型折叠非稳定光学谐振腔,对不同氧化剂过量系数条件下燃烧驱动连续波HF激光输出光谱进行理论分析和实验研究。结果表明:在合适的激光反应体系配方和光学谐振腔参数下,可以实现非稳腔条件下波长大于 $2.87\ \mu\text{m}$ 的2P8、2P9和2P10谱线的有效输出。通过调节燃烧室反应相对氧化剂过量系数,控制参与光腔激射反应的自由氟原子量,能够在一定程度上调节HF激光输出谱线分布。对每一支谱线而言,存在最佳反应配方,其输出功率与增益系数密切相关,单支谱线的最高输出功率与其最大增益系数相对应,激光器最高输出功率与各支谱线增益系数之和的最大值相对应。

参 考 文 献

- [1] 格罗斯, 博特. 化学激光手册[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [2] Wang H Y, Zhang X Z, Li Q, *et al.* Efficient nitrogen diluted discharge-drive continuous wave HF/DF chemical laser [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(2): 304-309.
王红岩, 张焯喆, 李强, 等. 氮稀释剂高效电激励连续波HF/DF化学激光器[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(2): 304-309.
- [3] Rawlins W T, Oakes D B, Mulhall P A, *et al.* Advanced optical diagnostics for HF laser development [R]. Physical Sciences INC Andover MA, 2002.
- [4] Zou Q J, Yuan S F, Luo W, *et al.* Application of spectrum measurements in working status diagnosis of chemical lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(9): 091401.
邹前进, 袁圣付, 罗威, 等. 光谱测量在化学激光器运转状态诊断中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(9): 091401.
- [5] Yu J B, Chen X, Wang H Y, *et al.* Small signal gain measurement for supersonic nitrogen diluted continuous wave HF chemical laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(10): 2569-2572.
于金标, 陈星, 王红岩, 等. 超音速氮稀释剂连续波HF化学激光器小信号增益测量[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(10): 2569-2572.
- [6] Luo W, Yuan S F, Zou Q J, *et al.* Kinetics of the spectral lines of high vibration state in DF/HF lasers [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2012, 31(3): 239-242.
罗威, 袁圣付, 邹前进, 等. DF/HF化学激光器高振动态基频谱线机理分析[J]. *红外与毫米波学报*, 2012, 31(3): 239-242.
- [7] Wang J, Guo J Z, Li S H, *et al.* Study on gain characteristic of the long wave spectral line in hydrogen fluoride laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(4): 0411002.
王杰, 郭建增, 李少华, 等. 氟化氢激光长波谱线增益特性研究[J]. *中国激光*, 2017, 44(4): 0411002.
- [8] Huang R P, Sun Y Z, Sang F T, *et al.* Beam quality measurement for CW HF(DF) chemical laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1993, 5(1): 42-44.
黄瑞平, 孙以珠, 桑凤亭, 等. 连续波HF(DF)化学激光器采用非稳腔的光束质量测量[J]. *强激光与粒子束*, 1993, 5(1): 42-44.
- [9] Liu Z J, Lu Q S, Zhao Y J. Study of evaluating beam quality of high energy lasers with unstable resonators [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1998, 25(3): 193-196.
刘泽金, 陆启生, 赵伊君. 高能非稳腔激光器光束质量评价的探讨[J]. *中国激光*, 1998, 25(3): 193-196.
- [10] Zhu F, Huang K, Zhou S Q, *et al.* Laser beam quality optimization of no-chain pulsed HF laser using unstable resonator [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(4): 0401002.
朱峰, 黄珂, 周松青, 等. 基于非稳腔的非链式脉冲HF激光光束质量优化[J]. *中国激光*, 2017, 44(4): 0401002.
- [11] Cao B L, Wu C J, Rao R Z, *et al.* Atmospheric attenuation of the HF and DF laser radiation [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(1):

17-20.

曹百灵, 鄢承就, 饶瑞中, 等. HF/DF 激光传输的大气衰减特性[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(1): 17-20.

[12] Luo W, Yuan S F, Zou Q J, *et al.* Influence of outer

cavity on emission spectrum of the HF/DF chemical laser[J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(7): 758-761.

罗威, 袁圣付, 邹前进, 等. 外腔式结构对 HF/DF 激光器输出光谱的影响[J]. 激光与红外, 2012, 42(7): 758-761.