

文章编号: 1001-4322(2006)05-0733-03

# 无稀释气立式氧碘化学激光器的设计与实验\*

张岳龙<sup>1,2</sup>, 房本杰<sup>1</sup>, 陈方<sup>1</sup>, 赵伟力<sup>1,3</sup>, 桑凤亭<sup>1</sup>, 金玉奇<sup>1</sup>, 李庆伟<sup>1,2</sup>, 徐明秀<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院大连化学物理研究所, 辽宁大连 116023;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3. 海军大连舰艇学院, 辽宁大连 116018)

**摘要:** 分析了氧碘化学激光器(COIL)在无稀释气条件下工作所带来的一系列问题和对其性能的影响,并提出了相应的解决方法,进而对 COIL 结构和相关参数进行了有针对性的设计和实验研究。在氯气流量为 117.6 mmol/s 时,平均输出功率 2.25 kW,化学效率达到 21.1%,比功率 0.22 J/g;分别以氩气和氮气为稀释气,对 COIL 进行了参数和实验数据比较。

**关键词:** 氧碘化学激光器; 射流发生器; 稀释气;  $pt_{res}$  值; 化学效率; 能流密度; 比功率

**中图分类号:** TN248 **文献标识码:** A

以氩气为稀释气的氧碘化学激光器(传统 COIL),自 1978 年演示成功以来,得到很大的发展。但这种传统 COIL 采用大量的氩气作为稀释气体应用成本高,需要庞大的压力恢复系统,这些成为制约 COIL 向实用化和机动性发展的主要障碍。而无稀释气 COIL 较之传统 COIL 省去了大量稀释气体氩气,在尾气当中只有气液反应产生的氧气、残余的氯气、载气(氮气)和少量的碘蒸气,尾气流量大大减少,这便使新型压力恢复系统——低温吸附装置的应用得到了充分发挥。低温吸附装置具有体积小、机动性好、无震动和环境友好等显著优点。低温吸附装置所使用的沸石分子筛可以在低温的条件下对氧气、氮气和氯气进行有效的吸附,采用氮气替代氩气和降低尾气流量是低温吸附的必要条件,减少尾气流量可以大大延长有效吸附时间。

但是在无稀释气条件下,假如保持原来的传统 COIL 结构,仅是省去稀释气,这将引起主气流速度下降,停留时间加长,从而导致单重态氧( $O_2(^1\Delta)$ )的气相传输损失增加、氧碘混合解离时间加长、气流方向增益长度缩短、光腔气流静温上升和阈值  $O_2(^1\Delta)$  产率增加等不利因素,结果激光器水平会大大下降。因此,必须整体地对 COIL 的各个关键部件进行重新设计来克服这些缺点,并通过实验研究来摸索其规律和特点。

## 1 无稀释气 VertiCOIL 实验装置设计

初始实验中,我们保持原有  $N_2$ -COIL<sup>[2-3]</sup> 各部件设计参数不变,仅将 COIL 装置改为立式结构<sup>[4]</sup>,在无稀释气条件下工作;在氯气流量为 115 mmol/s 时,发生器  $pt_{res}$  值大于  $0.2 \times 133 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ,输出功率为 1 320 W,化学效率 12.6%。之后,我们有针对性地对无稀释气 COIL 进行了重新设计,使 VertiCOIL 的性能达到了与传统 COIL 相接近的水平。

通过上述实验结果,我们分析了无稀释气 COIL 较之传统 COIL 所带来的最大变化是  $O_2(^1\Delta)$  发生器(SOG)  $pt_{res}$  值<sup>[5]</sup> 的增加和喷管喉道临界声速的减小。若想弥补以上变化带来的不利因素,在设计 SOG 时必须缩小反应区体积,来减少  $O_2(^1\Delta)$  在 SOG 中的停留时间,尽量使无稀释气时的  $pt_{res}$  值与有稀释气时的相当;对于喷管可以增加其出口设计马赫数来提高光腔气流速度以拉长气流方向的增益区长度,降低气流静温和  $O_2(^1\Delta)$  阈值产率;另外,采用立式结构,在保证 SOG 稳定工作的同时,能够有效缩短 SOG 出口与喷管入口之间的过渡体积,这样可以减少  $O_2(^1\Delta)$  在气相传输过程中的猝灭,降低气相传输时的压力损失,以此达到提高喷管入口  $O_2(^1\Delta)$  产率的目的,另外还可以使 COIL 装置更加紧凑。

鉴于以上考虑,我们对 VertiCOIL 中 SOG 的主要设计思路为:采用逆向流上出气 BHP/ $Cl_2$  反应器,方管式射流喷头,射流孔直径为 0.7 mm,反应比表面积为  $5.5 \text{ cm}^{-1}$ ,反应区横截面积缩小为  $100 \text{ mm} \times 46 \text{ mm}$ ,反应区长度缩短为 110 mm,如图 1 所示。

BHP 液体采用泵循环的方式驱动,驱动压力  $6.86 \text{ N/cm}^2$ 。由于无稀释气时喷管喉道临界声速与以氮气为稀释气时的临界声速接近,所以我们采用  $N_2$ -COIL 列阵喷管的设计详见文献<sup>[3]</sup>。

\* 收稿日期:2005-11-29; 修订日期:2006-04-29

基金项目:国家 863 计划项目资助课题

作者简介:张岳龙(1977—),男,物理化学在读博士,主要从事化学激光器研究;yuelong2001zhang@hotmail.com。

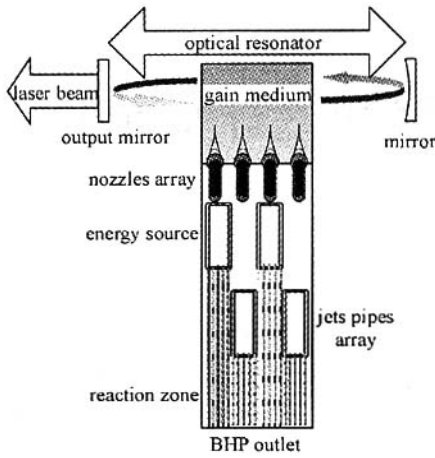


Fig. 1 Schematic of Verti COIL

图 1 无稀释气立式氧碘化学激光器示意图

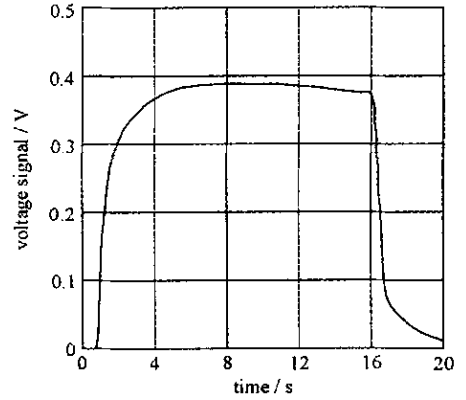


Fig. 2 Time dependence of output power

图 2 功率波形曲线

## 2 实验条件和结果

主要的实验条件和典型的结果,以及与传统 COIL 和  $N_2$ -COIL 实验装置和结果的对比,见表 1。喷管的能流密度<sup>[3]</sup>和比功率(1 g/s 的总气体流量中所产生的功率)分别代表了激光器的体积效率和经济效率,是比化学效率更具有实际意义的衡量指标。

表 1 不同氧碘化学激光器的实验条件及结果

Table 1 Experimental conditions and results of COILs

COIL type	He-COIL	$N_2$ -COIL	VertiCOIL	VertiCOIL*
design Mach number	2.0	2.5	2.5	2.5
$I_2/O_2$ mixing length/mm	12	4	4	4
specific surface of SOG/ $cm^{-1}$	3.1	5.0	5.5	5.5
volume of reaction zone/L	1.5	0.9	0.5	0.5
volume of duct/L	1.00	0.40	0.08	0.08
gain length/mm	170	117	117	117
diluting gas	He	$N_2$	-	$N_2$
$Cl_2$ flow rate/( $mmol \cdot s^{-1}$ )	110.0	115.0	117.6	120.0
dilute ratio	5 : 1	3 : 1	0	0.25 : 1
pressure of SOG/133 Pa	37	58	24	34
$I_2$ flow rate/( $mmol \cdot s^{-1}$ )	3.0	2.9	3.3	3.3
secondary $N_2$ /( $mmol \cdot s^{-1}$ )	90	158	43	44
total gases flow rate/( $mol \cdot s^{-1}$ )	0.75	0.62	0.16	0.20
outcoupling/%	4.2	2.4	2.5	2.5
laser power/kW	2.40	2.40	2.25	2.36
chemical efficiency/%	24.0	22.7	21.1	21.6
nozzles flux/( $W \cdot cm^{-2}$ )	70.6	68.0	64.0	67.0
specific power/( $J \cdot g^{-1}$ )	0.18	0.10	0.22	0.21

\* diluting with a little nitrogen

## 3 分析与讨论

由于有针对性地对 COIL 改变装置结构和对各部件的重新设计,使得无稀释气 COIL 的比功率大大提高,而化学效率与传统 COIL 相当。根据表 1 数据分析可以得到:(1)VertiCOIL 反应比表面积增大为  $5.5 \text{ cm}^{-1}$ ,弥补了反应区长度缩短所带来氯气利用率低的不足;反应区体积和  $O_2(^1\Delta)$  传输体积分别缩小为 0.5 和 0.08 L 时,起到了降低 SOG 的  $pt_{res}$  值、减少  $O_2(^1\Delta)$  猝灭损失等目的。另外,当加入了少量氮气作稀释气时,进一步降低了 SOG 的  $pt_{res}$  值,输出功率和化学效率都有所增加,这说明在条件允许的情况下,加入少量氮气作稀释可以

起优化激光器性能的作用。(2)在亚音速氧碘混合解离过程中,VertiCOIL 主气流的流速低,在混合解离区域停留时间较长,这极易引起气流中的气相水对生成的激发态粒子( $I^*$ ,  $I_2^*$ )的猝灭,造成能量提取过程中  $O_2(^1\Delta)$  的损失。而且可以导致最大增益提前出现,增益区缩短,从表观上看就是输出光斑沿气流方向的不均匀。所以,在亚音速段我们将氧碘混合解离长度由传统 COIL 的 12 mm 缩短为 4 mm,在超音速段将喷管出口设计马赫数提高为 2.5,以此提高喷管出口增益气体流速,拉长增益区长度,均匀增益沿气流方向的分布。实际上,在光腔能量提取过程中,由于氧碘强烈解离时放出大量的热,导致气流静温升高,气流的实际马赫数会低于设计马赫数,另外,静温的升高还引起  $O_2(^1\Delta)$  阈值产率的提高和小信号增益的减小。下一步工作,还要通过流场数值模拟对喷管做改进和优化,寻找无稀释气时的最佳氧碘混合解离位置和距离。(3)由于 VertiCOIL 总气体量少,其比功率有所提高,但 VertiCOIL 喷管的能流密度较之传统 COIL 偏低,估计通过对喷管进行优化,会有所提高。

## 4 结 论

VertiCOIL 在无稀释气情况下工作:氯气流量为 117.6 mmol/s 时,平均输出功率 2.25 kW,化学效率达到 21.1%,比功率约 0.22 J/g;加入少量氮气作稀释气时,平均输出功率 2.36 kW,化学效率达到 21.6%。此结果表明,COIL 在无稀释气条件下运行的输出功率和化学效率可以达到同规模传统 COIL 的水平。

## 参考文献:

- [1] 庄琦, 桑凤亭, 周大正. 短波长化学激光[M]. 北京:国防工业出版社, 1997. (Zhuang Q, Sang F T, Zhou D Z. Short-wavelength chemical lasers. Beijing: National Defence Industry Press, 1997)
- [2] 房本杰, 陈方, 张岳龙, 等. 以氮气为载气的千瓦级 COIL 的初步实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(3):337 - 340. (Fang B J, Chen F, Zhang Y L, et al. Experimental investigation of the influence on kilowatts COIL with nitrogen buffer gases. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(3):337-340)
- [3] 房本杰, 陈方, 张岳龙, 等. 以氮气为载气 COIL 的设计与实验[J]. 强激光与粒子束, 2002, 15(12):1148 - 1150. (Fang B J, Chen F, Zhang Y L, et al. Design and experimental results of 2 kW COIL with nitrogen buffer gases. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 15(12):1148-1150)
- [4] Nikolaev V D, Zagidullin M V. Completely scaleable 1 kW class COIL with Verti-JSOG and nitrogen buffer gases[C]//Proc of 30th Plasma-dynamics and Laser Conference, 1999.
- [5] 房本杰, 桑凤亭, 陈芳, 等.  $pt$  值对 COIL 的影响的实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(1):26 - 28. (Fang B J, Sang F T, Chen F, et al. Experimental investigation of the influence of  $pt$  on COIL. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(1):26-28)

## Design and experimental results of VertiCOIL operating without primary buffer gases

ZHANG Yue-long<sup>1,2</sup>, FANG Ben-jie<sup>1</sup>, CHEN Fang<sup>1</sup>, ZHAO Wei-li<sup>1,3</sup>,  
SANG Feng-ting<sup>1</sup>, JIN Yu-qi<sup>1</sup>, LI Qing-wei<sup>1,2</sup>, XU Ming-xiu<sup>1,2</sup>

(1, Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, P. O. Box 110, Dalian 116023, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

3. Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China)

**Abstract:** An efficient VertiCOIL with a square pipe-array jet-type singlet oxygen generator and without primary buffer gas was demonstrated in our laboratory. The most important motivation for no primary buffer gas is that it easily enables the use of a cryosorption pump as the vacuum pumping system, besides, it can greatly reduce the cost and volume of COIL systems for industrial applications. A nozzle bank, with a gain length of 11.7 cm, a subsonic iodine-oxygen mixing length of 4 mm and a designed Mach number of 2.5, is energized by a specially designed SPJSOG operating with no buffer gas. As a result of optimization of the SOG parameters, a maximum output power exceeding 2.25 kW with chemical efficiency of 21.1%, a nozzle exit flux of 64 W/cm<sup>2</sup> and a specific power of 0.22 J/g were obtained for a chlorine flow rate of 117.6 mmol/s. When the chlorine was mixed with a little primary nitrogen, a peak power of 2.4 kW was obtained.

**Key words:** Chemical oxygen-iodine laser(COIL); Jet singlet oxygen generator(JSOG); Primary buffer gas;  $pt_{res}$  value; Chemical efficiency; Nozzles flux; Specific power