

文章编号: 1001-4322(2007)01-0049-04

氧碘化学激光器输出功率的估算*

刘万发, 韩新民, 金玉奇, 桑凤亭

(中国科学院 大连化学物理研究所, 辽宁 大连 116023)

摘 要: 建立了激光在工作时的动态模型,即假设在单位时间内,激光介质的粒子数全部被泵浦到上能级。引入激光介质重复泵浦次数的概念,根据能量守恒原理,通过分析氧碘化学激光器(COIL)的传能机理,计算了沿气流方向变化的碘原子上能级的弛豫时间及沿气流方向变化的碰撞传能时间,并且计算了碘原子在出光区内被单重态氧反复泵浦的次数及相应的残余单重态氧数目,从而计算出碘原子在出光区的反复泵浦次数,修正了原计算 COIL 输出功率的公式。理论计算与实验结果均表明:当碘流量过低时,增益小于损耗,激光器不能起振;当增大碘流量时,激光输出功率也逐步增大,反复泵浦次数逐渐减少;当碘流量继续增大时,激光输出功率达到最大,且在一定碘流量变化范围内基本保持稳定;但随着碘流量的进一步增大,激光输出功率却逐步下降。

关键词: 氧碘化学激光器; 单重态氧; 碘原子; 泵浦次数; 弛豫时间; 碰撞传能时间

中图分类号: TN248.5 **文献标识码:** A

在氧碘化学激光器(COIL)中,从超音速喷管前注入的碘分子被单重态氧解离成为碘原子 $I(^2P_{3/2})$,碘原子又进一步被单重态氧泵浦为上能级碘原子 $I(^2P_{1/2})$,在出光区上能级碘原子辐射出光子后,又转变成下能级碘原子 $I(^2P_{3/2})$,单重态氧又将其泵浦为上能级碘原子 $I(^2P_{1/2})$ 。碘原子就这样在出光区内被单重态氧反复泵浦。一方面,人们为了提高 COIL 的化学效率,积极探索各种碘原子发生器^[1],希望减少为了解离碘分子而损耗的单重态氧。如果知道碘原子在出光区内被单重态氧泵浦的次数,就可知道碘原子发生器的作用究竟有多大。计算结果表明,碘原子在出光区内被单重态氧泵浦的次数越大,碘原子发生器越接近碘分子发生器,但是泵浦次数较大时,碘原子发生器对提高 COIL 的化学效率并没有实质性的作用。另一方面,我们也一直希望能够从理论上预测 COIL 的激光输出功率。而文献[2]计算所得的结果与实验结果相差较大,原因在于 COIL 的化学效率与单重态氧的产率明显不符。研究发现有一个非常重要的因素没有考虑,即横流的气动激光器单重态氧的浓度在出光区沿气流方向一直在不断下降。因为出光区口径有限,单重态氧的能量在出光区内不可能全部传给下能级碘原子,因此经过出光区后在出光区外,必将剩余大量的单重态氧,而光腔无法提取这部分能量,所以其化学效率根本不可能达到理论结果。

本文建立了激光在工作时的动态模型,引入激光介质重复泵浦次数的概念,估算氧碘化学激光器输出功率,修正了原计算 COIL 输出功率的公式,最后将计算结果与实验结果进行了对比。

1 激光等效模型

设激光体系为两能级稳定出光的激光器(本文没有考虑能级的简并度),能级上的粒子数总是处于动态平衡。设激光介质总的粒子数为 $2m_1$ (对 COIL 来说是碘原子数目),处于动态平衡时上能级粒子数为 n_1 ,下能级粒子数为 n_2 ,则 $n_1 + n_2 = 2m_1$ 。激光器在稳定出光时,不断有下能级的粒子被泵浦到上能级,同时也不断有上能级的粒子辐射光子而回到下能级,单位时间泵浦到上能级的粒子数应等于所产生的光子数。设单位时间泵浦到上能级的粒子数为 Δn ,则单位时间产生激光输出的光子数也等于 Δn 。如果假设泵浦到上能级的粒子数 Δn 在单位时间内被反复泵浦了 N 次,则产生总的光子数为 $\Delta n N$ 。

我们建立一种等效新模型:假设在单位时间内,激光介质的粒子数全部被泵浦到上能级,仅仅是单位时间泵浦到上能级的粒子数的次数比上述模型少。假设泵浦到上能级的粒子数 $2m_1$ 在单位时间内被反复泵浦了 N' 次 ($N' < N$),则产生总的光子数为 $2m_1 N' = \Delta n N$ 。这一模型与上述实际工作中的激光模型是等价的,但该

* 收稿日期:2006-07-02; 修订日期:2006-10-30

基金项目:国家 863 计划项目资助课题;国家自然科学基金资助课题(10474097)

作者简介:刘万发(1962—),男,硕士,研究员,主要研究方向为化学激光; wfliu@dicp.ac.cn。

模型在实际计算激光输出功率时显得极为有意义,我们将以 COIL 为例进行实际推导。

2 COIL 激光输出功率的修正

2.1 上能级碘原子的弛豫时间及下能级碘原子的碰撞时间

假设单重态氧的产率为 Y , 氧的利用率为 η , 氧的摩尔流量为 m_0 , 则单重态氧的摩尔流量为 $m_0 \eta Y$, 单重态氧的粒子数密度为 $m_0 \eta Y N_A / S M a v_c$ (N_A 为阿佛加德罗常数, S 为气流的横截面积, Ma 为气流的马赫数, v_c 为当地音速), 我们曾计算过上能级碘原子的弛豫时间近似为^[3]

$$\tau_1 = \frac{1}{k_1 x_{O_2(^1\Delta)} + k_2 x_{O_2(^3\Sigma)}} \quad (1)$$

式中: k_1, k_2 为速率常数; $x_{O_2(^1\Delta)}, x_{O_2(^3\Sigma)}$ 分别为 $O_2(^1\Delta), O_2(^3\Sigma)$ 的浓度。

总氧的粒子数密度为 $m_0 \eta N_A / S M a v_c$, 则

$$x_{O_2(^1\Delta)} = \frac{m_0 \eta N_A Y}{S M a v_c} \quad (2)$$

$$x_{O_2(^3\Sigma)} = \frac{m_0 N_A \eta (1 - Y)}{S M a v_c} \quad (3)$$

将(2),(3)式代入(1), 则

$$\tau_1 = \frac{S M a v_c}{m_0 \eta N_A Y [k_1 + k_2 (1/Y - 1)]} \quad (4)$$

设碘原子的直径为 d , 热运动平均速度为 v , 则单重态氧与碘原子的碰撞时间为^[4]

$$\tau_2 = \frac{S M a v_c}{\sqrt{2} m_0 \eta N_A Y \pi d^2 v} \quad (5)$$

2.2 碘原子在出光区内被单重态氧反复泵浦的次数

设出光区宽度为 L , 则气流通过出光区的平均时间为

$$t = \frac{L}{M a v_c} \quad (6)$$

设碘分子的流量为 m_1 , 并假设在 L_x 处已被反复泵浦了 N 次, 则单重态氧浓度在 L_x 处的流量

$$m_0 \eta Y (N) = m_0 \eta Y \left[1 - \frac{2m_1}{m_0 \eta Y} (\alpha + N) \right] \quad (7)$$

α 包括泵浦碘分子所需的单重态氧数目以及碘分子激发到更高能级所需单重态氧的数目, 从而产生黄色荧光, α 的大小与具体的激光器有关。下能级碘原子被泵浦一次所需要的时间为 $\tau_1 + \tau_2$ 。由(7)式可见, 这一时间沿气流方向是逐渐增大的, 碘原子第 N 次被泵浦所需的时间

$$(\tau_1 + \tau_2)_N = \frac{S M a v_c [1 - (2m_1/m_0 \eta Y)(\alpha + N)]}{m_0 \eta N_A Y \{k_1 + k_2 - k_2 Y [1 - (2m_1/m_0 \eta Y)(\alpha + N)]\}} \times \frac{1}{1 - (2m_1/m_0 \eta Y)(\alpha + N)} + \frac{S M a v_c}{\sqrt{2} m_0 \eta N_A Y \pi d^2 v} \times \frac{1}{1 - (2m_1/m_0 \eta Y)(\alpha + N)} \quad (8)$$

则 $(\tau_1 + \tau_2)_N$ 是关于 N 的函数, 求其前 N 项和

$$\sum_{k=0}^N (\tau_1 + \tau_2)_k = \sum_{k=0}^N \left\{ \frac{S M a v_c Y [1 - (2m_1/m_0 \eta Y)(\alpha + k)]}{m_0 \eta N_A Y \{k_1 + k_2 - k_2 Y [1 - (2m_1/m_0 \eta Y)(\alpha + k)]\}} + \frac{S M a v_c}{\sqrt{2} m_0 \eta N_A Y \pi d^2 v} \right\} \times \frac{1}{1 - (2m_1/m_0 \eta Y)(\alpha + k)} \quad (9)$$

如果在出光区内碘原子被泵浦了 N 次, 则

$$t = \frac{L}{M a v_c} = \sum_{k=0}^N (\tau_1 + \tau_2)_k \quad (10)$$

为了与实验结果比对, 需要通过泵浦次数来计算激光的输出功率。

2.3 单重态氧的利用率和剩余率

在出光区(横流激光, 沿气流方向)边缘, 为了维持激光的粒子数反转, 必须有足够的单重态氧, 而这部分能量是无法提取的。设单重态氧的剩余率为 R , 单重态氧的利用率为 U , 则

$$R = 1 - \frac{2m_1}{m_0 \eta Y} (\alpha + N) \quad (11)$$

$$U = \frac{2m_1}{m_0 \eta Y} (\alpha + N) \quad (12)$$

碘原子每被泵浦 1 次,就会有 $2m_1$ 个碘原子被泵浦到上能级,每次也就要消耗掉 $2m_1$ 个单重态氧(在理想的情况下单重态氧的消耗计算结果见图 1),在出光区下边缘处,即在出光区中完成最后一次泵浦时,维持激光介质反转的最低条件为:此时上能级的碘原子数只需略大于 m_1 个(假设腔镜的耦合率很小,损耗很小,这时激光介质仍能保有净增益),下能级的粒子数为 m_1 个。因为要维持激光介质的粒子数反转,至少还需要 m_1 个单重态氧,而不是 $2m_1$ 个单重态氧,因此最后一次泵浦次数为 $1/2$ 。

单重态氧用于产生激光的利用率

$$U' = \frac{2m_1}{m_0 \eta Y} (N + \frac{1}{2}) \quad (13)$$

根据能量守恒,COIL 的激光功率^[2]

$$P = 91m_0 \eta Y \eta_{\text{mix}} \eta_{\text{res}} \times U' = 91 \times 2m_1 (N + 1/2) \eta_{\text{mix}} \eta_{\text{res}} = 182m_1 (N + 1/2) \eta_{\text{mix}} \eta_{\text{res}} \quad (14)$$

式中: η_{mix} 为氧碘混合效率; η_{res} 为光学谐振腔提取效率。由(14)可以看出,在一定的出光区内,采用提高碘量来增加激光功率是不可取的,因为碘量提高将导致碘原子在出光区内被单重态氧反复泵浦的次数减少,总的激光功率不但不会增加,反而还会减少,我们可以通过(14)式较准确地计算 COIL 的功率和化学效率(通过实验验证,该公式比较符合实验结果)。

(14)式对其它激光器也适用,它实质上是激光输出总的光子数表达式

$$P = h\nu m (N + 1/2) \eta_{\text{mix}} \eta_{\text{res}} \quad (15)$$

如果激光出光介质是流动的,则 m 为激光出光介质的单位时间通过的粒子数个数, N 为出光介质在出光区内的泵浦次数;如果激光出光介质是相对静止的,则 m 为激光出光介质的粒子数, N 为单位时间出光介质在光腔内的泵浦次数。如果我们假设激光的混合是最佳的(即 $\eta_{\text{mix}} \approx 1$),耦合率取最佳耦合率,则激光输出功率可表示为

$$P = h\nu m (N + 1/2) \quad (16)$$

3 理论计算与实验结果比较

我们计算了激光输出功率随碘流量的变化关系,结果如图 2 所示。由图中可以看出,如果不改变激光器的其它条件,激光器输出功率与碘流量的确存在一个最佳关系,当碘流量在一定合适的范围内时激光输出功率最大。值得注意的是在激光最大输出附近,功率随碘流量的变化在一定范围内比较平缓(碘流量变化范围约有 6 mmol/s),表现出激光功率对碘流量在一定范围内的不敏感性。多年前我们曾做过这方面的分析^[5],现在通过理论计算证实了这一点。

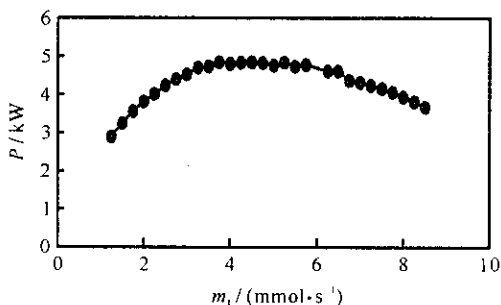


Fig. 2 Theoretical result for the variation of laser output power vs iodine flow rate

图 2 激光输出功率 P 随碘流量 m_1 变化的计算结果

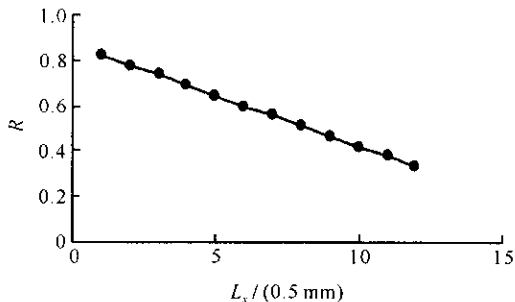


Fig. 1 Variation of $O_2(^1\Delta)$ residual percentage vs the width of lasing zone

图 1 $O_2(^1\Delta)$ 残余率 R 随出光区宽度 L_x 的变化

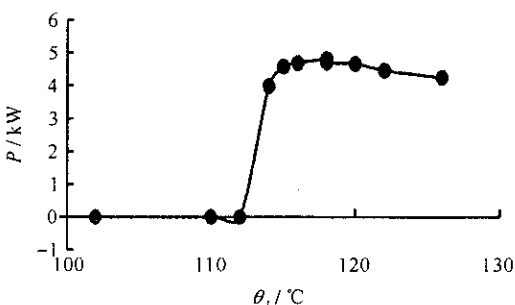


Fig. 3 Experimental result for the variation of laser output power vs the temperature of iodine-cell

图 3 激光输出功率 P 随碘池温度 θ_1 变化的实验结果

实验采用氯流量为 0.25 mol/s 的方管式射流发生器,出光区宽度 7 cm ,超音速碘喷管高度 4 cm ,马赫数 $Ma=2.1$,通过不断改变供碘系统的温度(实际也是改变供碘系统的流量,碘流量与温度的光关系可参见文献[6]),得到的结果如图 3 所示。

由图 3 可知,当碘流量过低时,增益小于损耗,激光器不能起振,输出功率为 0(前 3 个数据点);当逐步增大碘流量时,激光输出功率逐步增大,反复泵浦次数逐渐减少(第 4,5,6 实验点);当碘流量进一步增大时,激光输出功率达到最大,且在此附近的输出功率相差很小;但随着碘流量继续增大,激光输出功率却逐步下降。在耦合率为 17% 时,最大功率为 6.23 kW 。通过(10)式计算上能级碘原子在出光区内的反复泵浦次数为 12 次,由(14)式可计算出激光的最大输出功率为 6.55 kW ,此时的化学效率为 26%。可见实验结果与理论模型的结果比较一致,从而证明了这一理论模型的正确性。

4 结论及存在的问题

通过对 COIL 碘原子在出光区反复泵浦次数的计算,可以清楚地掌握激光器的传能机理,修正了原计算 COIL 输出功率的公式,对优化激光器的实验参数,优化选择增益介质粒子数的数目和泵浦次数具有重要的作用。

本文未能将实验中供碘系统的温度转化为碘的流量,因为碘的在线测试系统测量的实验结果还不是很稳定,因此未能将理论计算的结果与实验结果绘制在一个图中。尽管这样的实验能够验证我们的理论模型,但还是有一些不够完善之处。本文没有考虑光腔方面的问题,只是通过一个光腔提取效率来表达这方面的影响,而且为了普适性,没有考虑 COIL 中水蒸汽对激光功率的影响。

参考文献:

- [1] Ide S, Wakazono T, Takemoto T, et al. Study of chemical oxygen iodine laser for high power utilizing RF discharge dissociation of I_2 [C]// Proc of SPIE. 2001, **4148**:95-98.
- [2] Hon J F, Plummer D N, Crowell P G, et al. A heuristic method for evaluating COIL performance[C]//AIAA Paper. 1994, AIAA-94-2422.
- [3] 刘万发,李富岭,桑凤亭,等.超音速 COIL 饱和光强的计算[J].量子电子学报,1999, **16**(1):70-73. (Liu W F, Li F L, Sang F T, et al. Estimation of the saturated optical intensity for a supersonic COIL. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1999, **16**(1):70-73)
- [4] 李春,章立源,钱尚武.热学[M].北京:人民教育出版社,1978:111-115. (Li C, Zhang L Y, Qian S W. Thermotics. Beijing: People's Education Press, 1978:111-115)
- [5] 刘万发,韩新民,赵彤,等.方列管型射流式 $\text{O}_2(^1\Delta)$ 发生器的 COIL 出光研究[J].强激光与粒子束,2001, **13**(3):257-260. (Liu W F, Han X M, Zhao T, et al. Experimental investigation on COIL with a square pipe-array jet-type $\text{O}_2(^1\Delta)$ generator. *High Power Lasers and Particle Beams*, 2001, **13**(3):257-260)
- [6] 刘万发,赵彤,徐文刚,等.COIL 动态平衡式供碘系统的研制[J].强激光与粒子束,2004, **16**(9):1131-1133. (Liu W F, Zhao T, Xu W G, et al. Dynamic-equilibrium iodine supply system for COIL. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(9):1131-1133)

Calculation for output power of chemical oxygen iodine laser

LIU Wan-fa, HAN Xin-min, JIN Yu-qi, SANG Feng-ting

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

Abstract: The concept of repetitively-pumped times of atomic iodine in COIL was introduced. According to the law of energy-conservation, an equivalent lasing model was built. The non-extractable residual energy while lasing, the relaxation period for upper energy-level of atomic iodine and the energy-transfer period of collision between singlet oxygen and atomic iodine were calculated. The calculation formula for COIL output power agrees better with the experimental results than the original one does. Both theoretical and experimental results indicate that: if the iodine flow rate is too low, the laser gain is less than the loss, and the laser cannot start operating. If the iodine flow rate is increased gradually, the laser output power increases accordingly, and the repetitively-pumped times of the iodine decreases gradually. When the iodine flow rate is increased into a certain range, the laser power outputs a maximum, and the power is relatively stable vs iodine flow rate in this range. If the iodine flow rate is increased further and beyond this range, the laser power decreases gradually.

Key words: COIL; Singlet oxygen; Atomic iodine; Repetitively-pumped times; Relaxation period; Energy-transfer period by collision