

光引发脉冲氧碘化学激光器的研究*

张荣耀 陈方 宋雪琴 庄琦 张存浩

(中国科学院大连化物所)

提要: 研究以 $O_2(^1\Delta)$ -RI- N_2 作为反应混合物的光引发脉冲氧碘化学激光, 其激光能量输出高于 160 mJ, $O_2(^1\Delta)$ 能量利用效率为 12%。对 $O_2(^1\Delta)$ - CH_3I - N_2 和 $O_2(^1\Delta)$ - CF_3I - N_2 体系作了比较, 以前者为佳。试验也证实以 N_2 代替 Ar 作为缓冲气, 可得到同样高的激光输出。

A photoinitiated pulsed oxygen-iodine chemical laser utilizing CF_3I or CH_3I as iodine atom donors

Zhang Rongyao, Chen Fang, Song Xueqin, Zhuang Qi, Zhang Cunhao

(Dalian Institute of Chemical Physics, Academia Sinica, Dalian)

Abstract: A photoinitiated $O_2(^1\Delta)$ -RI- N_2 mixture has been made to lase with an output energy of over 160 mJ. The utilization efficiency of the stored $O_2(^1\Delta)$ energy attains 12%. A comparison between $O_2(^1\Delta)$ - CH_3I - N_2 mixture and $O_2(^1\Delta)$ - CF_3I - N_2 mixture suggests that the former exceeds the latter in many respects. It is also shown that N_2 is as good a buffer gas as Ar in the oxygen-iodine laser with respect to the laser output.

一、引言

氧碘化学激光器是目前国际上又一种新型高能化学激光器, 它不仅具有 HF/DF 化学激光器的优点, 而且有很多为 HF 所不及的特点。例如激光波长更短、效率更高、光束质量较好、高储能和装置安全简便, 至今已研究成功具有相当规模的连续波氧碘化学激光器^[1, 2]。但在一些需要高功率激光脉冲的地方, 更希望能以脉冲方式运转。然而至 1984 年前, 国外还没有此种脉冲氧碘化学激光的

报道。我们于 1983 年研究连续波氧碘化学激光获得成功之后, 就提出脉冲氧碘化学激光的研究方案, 同年完成了该方案理论模型的计算。于 1984 年 4 月成功地获得了脉冲氧碘化学激光, 还取得与体系化学因素有关的一些规律。

二、实验的理论依据及其装置

1. 氧碘化学激光主要依靠 $O_2(^1\Delta) + I$

收稿日期: 1986 年 6 月 18 日。

*中国科学院科学基金资助的课题。

$\rightleftharpoons O_2(^3\Sigma) + I^*(^2P_{1/2})$ 共振传能反应以及 $I^*(^2P_{1/2}) \longrightarrow I + h\nu$ (波长 $1.315 \mu\text{m}$) 进行运转的。在一般连续波氧碘化学激光器中, 由于使用碘分子 I_2 作为碘原子 I 的来源, 而碘分子 I_2 却又是激发态 $I^*(^2P_{1/2})$ 极强的猝灭剂, 也是碘原子重合很好的第三体。因此在激光器内碘分子浓度受到限制, 由此生成的 I 原子浓度就不能高, 其增益也就不够高。并且体系的工作压力也不能高, 只能在很低气压下 ($1 \sim 2 \text{Torr}$) 运转。但如果采用对 $I^*(^2P_{1/2})$ 和 $O_2(^1\Delta)$ 猝灭较慢的碘化物 RI 来代替现用的碘分子, 将会对提高氧碘体系的激光性能带来很多好处。因为在脉冲引发反应初期可直接取得高浓度的碘原子, 而又不存在上述被碘分子猝灭之虑, 效率、增益将会大为提高。同理, 体系的工作压力也因而得以提高, 体积效率和装置的简易性都更可改善。其次, 由于 $O_2(^1\Delta)$ 具有较高储能, 又有很长寿命, 是极好的高储能体系, 可在相当长持续时间内提供能量。而激发态 $I^*(^2P_{1/2})$ 受激发射后, 其下能态为基态碘原子, 可继续参与上述的共振传能反应, 一方面有助于把下能态抽空, 另一方面继续提取 $O_2(^1\Delta)$ 储能, 形成链的循环。预期这样的体系进行脉冲运转时, 其自终止 (self-terminating) 时间是很长的。计算表明, 在一定工作条件下有可能获得 $10 \sim 150 \mu\text{s}$ 的激光脉宽。

2. 图 1 为脉冲氧碘化学激光系统的装置示意图。激光管 4 系石英玻璃管制成, 激活体积 600cm^3 , 图中所示光腔为内腔结构, 我们还在全外腔结构下做过大量实验。一腔镜为全反射, 另为透过率 0.4% 至 6% 。氙闪光灯 5 的工作电压低于 22kV , 电容器为 $3.5 \mu\text{F}$, 并有电控系统同步操作。 $O_2(^1\Delta)$ 绝对浓度采用辐射量热法标定^[3], 并用干冰冷却的 PbS 元件监测其相对浓度变化。用激光能量计测量激光输出能量。激光波形用国产 2CU_2 光电二极管接收, Tektronix 466 示波器照相记录。系统压力用 Datametrix 570

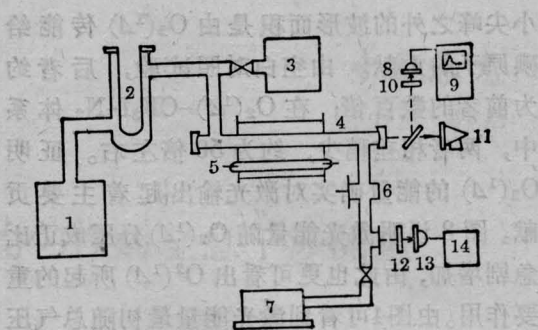


图 1 实验装置示意图

1— $O_2(^1\Delta)$ 化学发生器; 2—干冰冷阱; 3—碘化物供料装置; 4—激光管; 5—闪光灯; 6— $O_2(^1\Delta)$ 绝对浓度检测系统; 7—真空泵; 8—光电二极管; 9—示波器; 10—干涉滤光片 ($1.315 \mu\text{m}$); 11—激光能量计; 12—干涉滤光片 ($1.27 \mu\text{m}$); 13— PbS 检测器; 14—锁相放大器

电容压力计测量。使用的碘化物 RI 有两种: CF_3I 和 CH_3I , 纯度分别为 99% 和 98.5% 。 $O_2(^1\Delta)$ 流过激光管的同时, 加入上述碘化物, 并用脉冲闪光灯引发。使碘化物瞬间分解获得大量碘原子, 在激光管内与 $O_2(^1\Delta)$ 进行快速传能反应, 达到粒子数反转。与光腔内发射碘激光的同时, 进行链的循环, 直至反应自终止为止, 形成脉冲激光输出。

三、实验结果和讨论

1. 各种试验参数对激光能量的关系

图 2 照片显示 $O_2(^1\Delta) - \text{CH}_3\text{I} - \text{N}_2$ 体系的脉冲激光波形。在波头处出现小尖峰, 是纯 CH_3I 光解反转的贡献, 其能量可忽略不计。

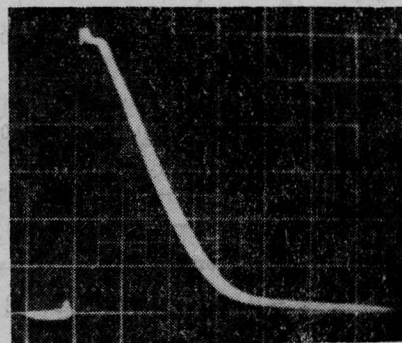


图 2 $O_2(^1\Delta) - \text{CH}_3\text{I} - \text{N}_2$ 体系的脉冲氧碘激光波形

小尖峰之外的波形面积是由 $O_2(^1\Delta)$ 传能给碘原子的贡献。由空白对照试验, 后者约为前者的数百倍; 在 $O_2(^1\Delta)-CF_3I-N_2$ 体系中, 两者相差稍少, 约为 50 倍左右。证明 $O_2(^1\Delta)$ 的能量确实对激光输出起着主要贡献。图 3 说明激光能量随 $O_2(^1\Delta)$ 分压成正比急剧增加, 由此也更可看出 $O_2(^1\Delta)$ 所起的重要作用。由图 4 可看到激光能量最初随总气压

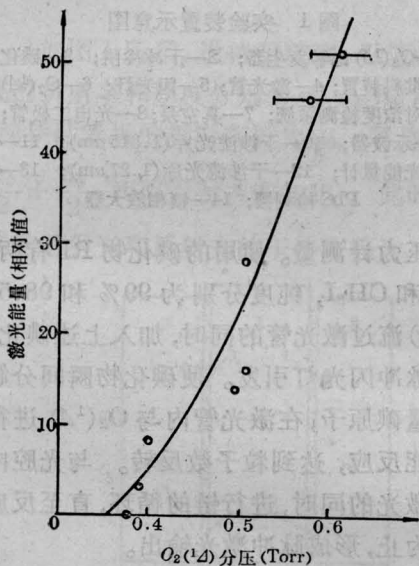


图 3 $O_2(^1\Delta)$ 分压对激光能量的关系
($O_2(^1\Delta)-CH_3I-N_2$ 体系, 试验时总压和 CH_3I 分压保持不变)

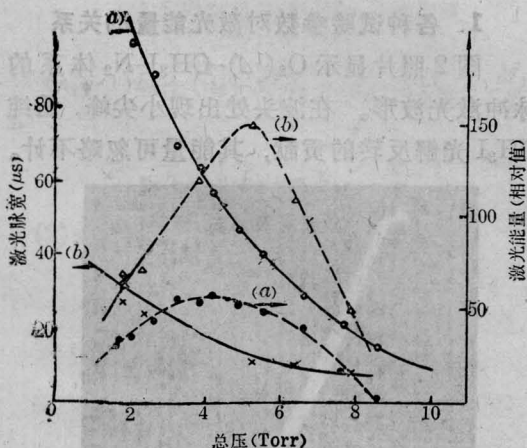


图 4 不同 CH_3I/O_2 比值下激光脉宽和能量随总压的变化

(a) $CH_3I/O_2=0.2$; ○—激光脉宽; ●—激光能量
(b) $CH_3I/O_2=1.0$; ×—激光脉宽; △—激光能量

提高而增加, 4~5 Torr 时达到极大值。自此之后激光能量随总气压继续提高而下降。这显然因 $O_2(^1\Delta)$ % 浓度随工作压力的提高而降低, 同时因激发态 $I^*(^2P_{1/2})$ 的各种猝灭过程加速所致。在我们的脉冲氧碘体系中, 工作压力范围已比连续波氧碘体系 (1~2 Torr) 高好几倍, 在一定工作条件下至 12 Torr 仍有激光输出。光腔最佳透过率 (3.5%) 也远高于连续波氧碘体系, 由此推测其增益是较高的。以上两者也初步证实了第二节中的预测。由图 4 还可看到在一定 RI/O_2 范围内 (本文符号 O_2 代表总氧, 即基态氧和 $O_2(^1\Delta)$ 的总和, 以下类同), 激光能量随 RI/O_2 比值增加而增加, 然而最终也有一最佳值 (见图 5)。试验也表明, 在工作条件相同下, 用 N_2 代替 Ar 作为缓冲气, 无论对 $O_2(^1\Delta)$ 发生和激光能量, 其效果一样好 (见表 1)。这是因为两者对 $I^*(^2P_{1/2})$ 的击活几率都极为微小之故。这也是我们一项革新, 在经济上 N_2 比 Ar 低廉而易得。在目前我们小规模试验装置上, 总压 5.5 Torr, $O_2(^1\Delta)$ 分压 0.6 Torr,

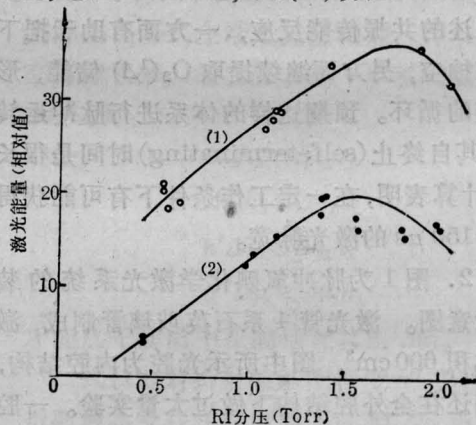


图 5 $O_2(^1\Delta)-CH_3I-N_2$ (1) 和 $O_2(^1\Delta)-CF_3I-N_2$ (2) 体系的比较
(试验时总压和 $O_2(^1\Delta)$ 分压保持不变)

表 1 不同缓冲气对激光能量的影响

气体组成	缓冲气对 $I^*(^2P_{1/2})$ 的碰撞击活几率 ^[4]	激光能量 (mJ)
$O_2:CH_3I:Ar=1:1.2:3$	扩散控制	98~107
$O_2:CH_3I:N_2=1:1.2:3$	3×10^{-6}	102~105

$O_2(^1\Delta)-CH_3I-N_2$ 体系已高于 160 mJ 激光输出, $O_2(^1\Delta)$ 能量利用效率为 12%。

2. RI/ O_2 比值和总压对激光脉宽的影响

由图 4 还可看到, 在总压为 2 Torr 以下 $CH_3I/O_2=0.2$ 时, 激光脉冲的半宽度 (FWHM) 长达 110 μs 以上, 甚至最高可达 130 μs (图中未列出)。与此同时闪光灯脉冲半宽只有 15 μs 左右。这说明发生了较好的链循环, 估计其效果比碘分子高得多。随着 CH_3I/O_2 比值或总压的提高, 激光脉宽成反比缩短。有意思的是在低压下提高 RI/ O_2 比值对激光脉宽稍有缩短影响, 说明我们选用的碘化物 (CH_3I 和 CF_3I) 还不是很理想。虽然其对 $I^*(^2P_{1/2})$ 的猝灭, 程度上可能有所好转但还不够, 这类碘化物尚能稍微引起对 $I^*(^2P_{1/2})$ 猝灭的各种复杂副反应。

3. $O_2(^1\Delta)-CH_3I-N_2$ 与 $O_2(^1\Delta)-CF_3I-N_2$ 体系的比较

图 5 显示两体系在激光能量输出方面的对比。两组数据是在工作总压、总氧分压、 $O_2(^1\Delta)$ 分压、闪光灯工作电压基本保持不变的条件下, 只改变 RI 分压进行试验的。由图可见, $O_2(^1\Delta)-CH_3I-N_2$ 体系要比 $O_2(^1\Delta)-CF_3I-N_2$ 为佳。激光能量前者约为后者的 2 倍, 相应化学效率也为后者的 2 倍。低 RI 分压下, 两者相差更多, 甚至达 4~5 倍。激光

能量随 RI 分压的增加而增加, 最终达到极大值后下降。两者在激光性能上有如此大的差别, 只在于 R 基不同。表明激光性能与所使用碘化物的分子结构密切相关。清楚地说明氟烷基基团的存在, 可能引起有害于氧碘传能反应以及对 $I^*(^2P_{1/2})$ 猝灭的各类副反应。而氢甲基基团的存在, 此类副反应就不如氟烷基基团明显, 运转效率较高。以上激光试验结果与文献 [5] 的基础研究结果颇为吻合。因此进一步开展各类碘化物对激光性能 (包括能量输出和脉宽等性能) 影响的研究是很有必要的。

参加本实验工作的还有许庆洲、桓长清、黄瑞平、桑凤亭、董子丰、张允禄、国保川、邵明君、杨何平同志。此外尚有沈惠华、刘惠芳、王宗娟、孙以珠、闵祥德、李明盛同志参加部分工作, 谨此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] *AW & S T*, 1982, **117**, No. 13, 16; *Defense Electronics*, 1983, **15**, No. 11, 11.
- [2] *Gas Flow and Chemical Lasers 1984*, edited by A. S. Kaye, (Adam Hilger Ltd, Bristol and Boston). pp. 137~206.
- [3] G. A. Fisk, G. N. Hays; *Chem. Phys. Lett.*, 1981, **79**, 331.
- [4] J. Donovan *et al.*; *Transaction of the Far. Soc.*, 1966, **62**, 2023.
- [5] A. T. Young, P. L. Houston; *J. Chem. Phys.*, 1983, **78**, 2317.

(上接第 469 页)

三、设计题例

半导体激光器波长 $\lambda=800$ nm, 采用单模式, 其参数如下:

$$\theta_1=30^\circ, \theta_2=5^\circ, b=10 \mu m.$$

考虑到工作距不至太小, 选取 $f'=8$ mm, 入射口径 D 取 8 mm。由上述条件直接代入 (2) 式计算可得:

$$4.25 \leq \Gamma \leq 6$$

考虑到仪器结构的大小及象差校正需要, 取

下限, 确定扩束系统的 Γ , 即

$$\Gamma=4.5$$

扩束系统是一个倒置的伽里略望远镜系统。为了降低加工成本, 采用平凸和平凹两透镜组成, 接近球差最优化型式。两柱面镜的材料选取有其特殊性: 负柱面镜取为冕牌玻璃 k_0 , 正柱面镜选取火石玻璃 ZF_7 , 这样有利于象差的平衡。

参 考 文 献

- [1] U. S. P., 4, 253, 735.