

# 氧碘化学激光器运行模式对其 脉冲化影响的模拟研究

李国富<sup>1)2)†</sup> 多丽萍<sup>1)</sup> 金玉奇<sup>1)</sup> 于海军<sup>1)</sup> 汪建<sup>1)</sup> 王德真<sup>2)</sup> 桑凤亭<sup>1)</sup>

1) (中国科学院化学激光重点实验室, 大连化学物理研究所, 大连 116023)

2) (大连理工大学物理与光电工程学院, 大连 116024)

(2011年6月11日收到; 2011年9月1日收到修改稿)

根据氧碘化学激光器的反应机理建立了一维预混脉冲出光理论模型, 从理论上研究了气体总压力在 660—2660 Pa, 温度在 150—400 K 区间内对单脉冲能量、脉宽和峰值功率的影响. 分析了气体总压和温度对出光特性影响的内在原因. 计算结果表明: 增益介质温度对单脉冲能量的影响要远大于对激光脉宽的影响; 增益介质温度在 150 K, 气体总压在 1330 Pa 可以获得比温度在 400 K, 气体总压为 2660 Pa 时更高的峰值功率. 因此在不干扰超音速流动状态条件下瞬间大量产生碘原子, 可以实现高效的脉冲氧碘化学激光器.

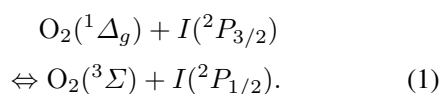
**关键词:** 碘原子, 脉冲, 氧碘化学激光, 超音速

**PACS:** 42.55.Ks, 42.55.-f, 34.50.Lf

## 1 引言

连续波氧碘化学激光器是目前波长最短的化学能激光器, 具有高能量、高效率、优良的光束质量和低损耗的光纤传输效率等特点. 这些优点很适合在一些工业领域上应用, 例如, 切割、焊接、石油钻孔等方面. 具有一定激光脉宽、峰值功率和平均功率的强脉冲激光在钻孔切割方面的优势更加明显<sup>[1]</sup>. 结合工业和军事上对大能量脉冲激光的需求, 自 20 世纪 80 年代至今, 国际上一直在进行氧碘化学激光器脉冲化的研究.

氧碘化学激光器的工作波长为 1315 nm, 它是基于激发态碘原子的受激跃迁. 激发态的碘原子是由基态碘原子与亚稳态的单重态氧近共振传能产生:



单重态氧与碘原子正、逆反应的速率常数  $K_{\text{eq}}$  决定了激光增益大于零的必要条件为单

重态氧的产率不能够低于阈值产率:

$$Y_{\text{th}} = \frac{1}{2K_{\text{eq}} + 1}, \quad (2)$$

其中  $K_{\text{eq}} = 0.75 \exp(402/T)$ ,  $T$  为光腔增益介质的温度. 增益介质温度越低, 单重态氧阈值产率越低, 则可提取的单重态氧能量越高.

亚稳态的单重态氧是通过氯气和碱性的过氧化氢溶液反应生成, 此反应的量子效率接近 100%, 但是由于脱活和猝灭等效应的影响, 最终的产率也可以高达 70%. 而碘原子是由多个单重态氧解离碘分子产生.

氧碘化学激光器脉冲化可以在连续波超音速氧碘化学激光器上实现, 方法主要有机械调  $Q$ <sup>[2]</sup>, 磁调  $Q$ <sup>[3]</sup> 和增益调制<sup>[4]</sup>, 工作的基础还是建立在超音速氧碘激光器的高功率和高效率的基础之上. 通过瞬间光解碘甲烷或者脉冲放电解离碘甲烷<sup>[5-7]</sup> 产生碘原子实现氧碘化学激光器脉冲化, 既可以在超音速流动下工作, 也可以在亚音速流动下工作.

氧碘化学激光器的抽运机制与一些光抽运的 YAG 激光器、铜蒸汽激光器<sup>[8]</sup>、电激励的  $\text{CO}_2$

† E-mail: ligf@dicp.ac.cn

激光器<sup>[9,10]</sup>和HF激光器有很大不同. 初始激发态碘原子浓度为零, 在粒子数反转和激光出光的过程中, 抽运传能过程在反复进行. 激发态碘原子也会与其他粒子碰撞而发生猝灭损失掉. Yuryshev<sup>[11]</sup>在理论上讨论了单重态氧密度对单脉冲能量的影响并与实验结果做了对比. 庄琦<sup>[12]</sup>等建立了预混模型, 讨论了光引发情况下闪光灯强度和预混气体各组分密度对激光脉宽和单脉冲能量的影响. 本文作者<sup>[13]</sup>在预混反应脉冲出光模型基础上进一步讨论了光学参量和各组分密度对激光参数的影响, 在理论上给出了脉冲氧碘化学激光器中的增益开关现象.

增益介质温度在氧碘化学激光中也有着有别于其他激光器的作用, 降低增益介质温度可以增大增益介质的受激辐射截面和在相同气体压力下增大增益区内介质密度, 同时也可以降低单重态氧的阈值产率, 从而提高激光器的化学效率. 本文在预混反应脉冲出光模型基础上, 主要讨论了增益介质温度和气体压力对激光峰值功率、单脉冲能量和激光脉宽的影响, 为进行不同流动状态下的氧碘化学激光(COIL)脉冲化提供理论指导.

## 2 计算模型

根据文献[14]中简化的13个化学动力学过程及反应动力学常数, 建立了预混反应动力学和出光理论计算模型. 在模型中假设: 1) 碘原子是由放电瞬间产生并与其他气体已经充分混合均匀; 2) 光子密度在光腔中是均匀的; 3) 忽略反应器表面对激发态粒子的脱活作用. 动力学模型得到的微分方程组采用二阶 Rosenbrock 法计算. 反应动力学过程包含碘原子与单重态氧近共振传能、激发态碘原子及单重态氧的猝灭过程、碘原子的自发辐射等. 由传统 COIL 的化学动力学过程, 各物种的浓度为

$$\frac{d[n_k]}{dt} = \sum_m k_m [n_i] \cdot [n_j] - \sum_\nu k_\nu [n_i] \cdot [n_k], \quad (3)$$

$[n_k]$  为物种  $k$  的浓度,  $[n_i], [n_j]$  为第  $m$  个反应的反应物浓度,  $k_m$  为第  $m$  个反应方程的反应速率常数. 其中光子浓度的时间微分方程由下式确定:

$$\begin{aligned} \frac{df}{dt} = & c \frac{7}{12} \sigma f ([I^*] - 0.5[I]) \\ & + \frac{cf \ln R}{2L} + \frac{a^2 [I^*]}{4\pi L^2 \tau}, \end{aligned} \quad (4)$$

其中  $f$  为光腔中的光子数浓度,  $c$  为光速,  $\sigma$  为受激辐射截面,  $F$  为填充因子,  $[I^*]$  为激发态碘原子浓度,  $[I]$  为基态碘原子浓度,  $R$  为腔镜反射率,  $L$  为激光腔长,  $a$  为方形腔镜的边长,  $\tau$  为自发辐射寿命.

$$\sigma(T) = \frac{c^2 A}{8\pi\nu^2} \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{1/2}, \quad (5)$$

其中  $A$  为 Einstein 系数,  $\nu$  为激光中心频率,  $k$  为 Boltzmann 常数,  $T$  为增益介质温度. 对于 2660 Pa 以下的氧碘激光器增益介质, Doppler 加宽是主要的, 自然加宽可以忽略.

增益介质温度导致三方面的影响: 1) 单重态氧的阈值产率与温度成正比例关系, 如 (2) 式所示; 2) 激发态碘原子受激辐射截面与温度的平方根成反比, 如 (5) 式所示; 3) 增益介质的气体密度与温度成反比:

$$[n_k] = P_k / RT, \quad (6)$$

$P_k$  为物种  $k$  的分压,  $R$  为气体常数.

## 3 计算结果讨论与分析

### 3.1 增益介质温度对单脉冲能量的影响

增益介质宏观温度降低会降低单重态氧的阈值产率, 从而可以提高脉冲 COIL 的输出能量. 连续波的出光功率可以用下面的公式表达<sup>[15]</sup>:

$$P = [O_2](Y - Y_{th})Sv h\gamma\beta, \quad (7)$$

其中  $[O_2]$  为总氧的密度,  $Y$  和  $Y_{th}$  为单重态氧产率和单重态氧阈值产率,  $S$  为气流流通截面面积,  $v$  为气流速度,  $h\gamma$  为单光子的能量,  $\beta$  为光腔的提取系数.

由 (7) 式可以得到光腔内可提取的能量为

$$E_{\text{pulse}} = [O_2](Y - Y_{th})SLh\gamma\beta, \quad (8)$$

其中  $L$  为气体流动方向的光腔长度.

我们首先利用 (8) 式计算了相同的单重态氧密度下, 增益介质温度对激光能量的影响. 假定亚音速流动条件下脉冲气体放电等离子体的温度  $T = 450 \text{ K}$ , 则  $Y_{th} = 21.4\%$ ; 而在超音速流动下  $T = 150 \text{ K}$  时,  $Y_{th} = 4.3\%$ . 如果按照发生器出口处单重态氧产率  $Y = 50\%$  估算, 则在相同气体密度和组分比例条件下, 激光能量增大约 59.7%, 不同气体温度对激光能量的影响如表 1 所示.

表 1 数值模拟计算和 (8) 式计算的脉冲能量随光腔中增益介质温度的变化对比

| (8) 式计算结果   |             |   | 理论模拟结果       |   |
|-------------|-------------|---|--------------|---|
| $T_{cav}/K$ | $Y_{th}/\%$ | $((E_T - E_{T=450 K})/E_{@T=450 K})/\%$ | $E_{optT}/J$ | $(E_{optT} - E_{optT=450 K})/E_{optT=450 K}/\%$ |
| 150         | 4.3         | 59.7                                    | 7.760        | 62.0  |
| 200         | 8.2         | 46.3                                    | 7.090        | 48.0  |
| 250         | 11.7        | 33.8                                    | 6.470        | 35.0  |
| 300         | 14.8        | 23.0                                    | 5.940        | 24.0  |
| 350         | 17.4        | 13.9                                    | 5.490        | 14.6  |
| 400         | 19.6        | 6.3                                     | 5.110        | 6.6   |
| 450         | 21.4        | 0                                       | 4.790        | 0   |

注:  $T_{cav}$  为光腔内气体的温度,  $E_T$  为不同温度下可提取的能量,  $E_{T=450 K}$  为光腔内气体温度为 450 K 时可提取的能量,  $E_{optT}$  为理论计算得到的不同温度下最大的可提取能量,  $E_{optT=450 K}$  为理论计算得到的 450 K 时可提取的最大能量

在稀释气体密度为  $58.4 \times 10^{16}$  molecule/cm<sup>3</sup>, 总氧密度为  $14.6 \times 10^{16}$  molecule/cm<sup>3</sup>, 单重态氧产率为 50% 和输出耦合率为 1% 条件下, 采用理论模型计算了气体温度对激光单脉冲能量的影响, 计算结果如图 1 所示. 从图 1 中可以看出, 随着光腔气体温度降低, 单重态氧阈值产率也随之下降, 单脉冲能量也随之上升. 同时表 1 的理论模拟结果中也可以看到在最佳的碘原子密度配比下, 温度  $T = 450 K$  时, 单脉冲能量为 4.79 J; 而温度  $T = 150 K$  时, 激光能量为 7.76 J, 相对于  $T = 450 K$  时的激光脉冲能量增大了 62.0%. 这与理论公式估计的数值相当符合, 同时其他不同温度条件也具有较高的符合度.

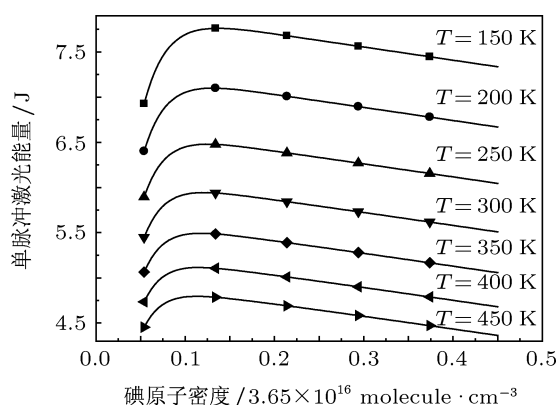


图 1 气体温度和碘原子密度对激光能量的影响

### 3.2 增益介质温度对激光脉宽的影响

不同光腔气体温度对激光脉宽的影响如图 2 所示. 其中稀释气体密度为  $58.4 \times 10^{16}$  molecule/cm<sup>3</sup>, 总氧密度为  $14.6 \times 10^{16}$  molecule/cm<sup>3</sup>, 单重态氧产

率为 50%, 输出耦合率为 1%. 从图 2 中可以看出, 当碘原子密度为  $0.54 \times 10^{16}$  molecule/cm<sup>-3</sup> 时,  $T = 150 K$  对应的激光脉宽为 3.36  $\mu s$ , 当  $T = 450 K$  时激光脉宽为 2.91  $\mu s$ , 脉宽变化为 15%. 这是因为随着光腔气体温度的降低, 单重态氧阈值产率降低, 也就是可以有更多比例的单重态氧的能量被提取出来, 从而导致在低温下激光脉宽有所增加. 在我们可预见的温度范围内, 气体温度对激光脉宽的影响较小, 基本上可以不考虑气体温度对激光脉宽的影响.

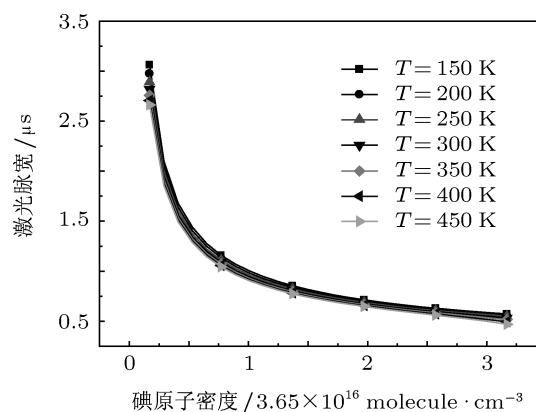


图 2 光腔中气体温度和碘原子密度对激光脉宽的影响

### 3.3 气体总压和增益介质温度对激光峰值功率的影响

目前超音速连续波的氧碘化学激光器的光强压力为 266—600 Pa<sup>[16]</sup> 光腔内的增益介质温度在 150—190 K 之间<sup>[17]</sup>. 放电引发的脉冲氧碘化学激光器一般为亚音速流动, 光腔压力为 2000—2660 Pa, 增益介质温度为 350—450 K 之间<sup>[7]</sup>. 我

们分别计算了低温低压 ( $T = 150$  K, 气体总压约为 660 Pa) 和高温高压 ( $T = 400$  K, 总压约为 2660 Pa) 下碘原子分压和输出耦合率对激光峰值功率的影响, 并模拟超音速和亚音速流动的脉冲出光的过程. 计算结果如图 3 和图 4 所示. 对应相同的输出耦合率, 通过调节碘原子分压得到最佳峰值功率. 计算结果表明: 在相同的输出耦合率  $Tr = 5\%$  且最佳的碘原子分压配比下, 低温

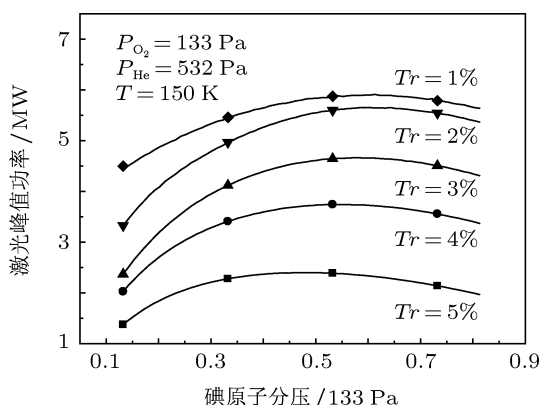


图 3 在光腔气体温度为 150 K 条件下, 碘原子分压和腔镜输出耦合率对激光峰值功率的影响

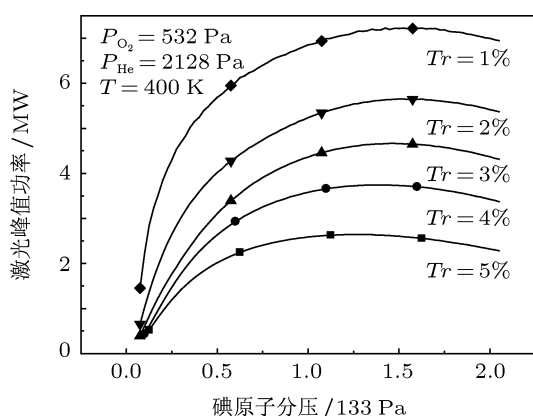


图 4 在气体温度为 400 K 时, 碘原子分压和腔镜输出耦合率对激光峰值功率的影响

低压 ( $T = 150$  K, 总压约为 660 Pa) 下激光峰值功率为 5.8 MW, 而高温高压 ( $T = 400$  K, 总压约为 2660 Pa) 下的峰值功率为 7.2 MW, 即亚音速情况下要高一点. 产生差别的主要原因在于高压下单位体积可提取的能量增加, 而且激光脉宽改变的幅度较小. 目前以氦气作为稀释气体的超音速氧碘激光器的光腔压力在 260—330 Pa, 如果脉冲放电引发的氧碘化学激光器也采用超音速流动体系, 首先要考虑的是在更高的光腔压力下实现超音速流动, 只有这样才能够从总体上达到或者超过亚音速的情况. 即使实现了光腔压力高于 660 Pa 的超音速流动, 也还会遇到另外一个难题, 就是超音速条件的气体辉光放电. 超音速流动中的激波、电极面型设计和预电离与主放电电极的空间位置, 都会影响放电辉光的实现<sup>[18]</sup>. 但是可以考虑氙灯光解碘甲烷的方式实现超音速条件下的脉冲出光.

## 4 结论

本文采用一维预混脉冲出光模型研究了增益介质温度和光腔内气体总压对脉冲激光峰值功率、激光脉宽和单脉冲能量的影响. 模拟研究表明: 增益介质温度主要影响激光单脉冲能量, 而对激光脉宽的影响相对较小; 在超音速流动条件下, 脉冲放电引发的脉冲氧碘激光光腔压力应该大于 660 Pa, 即比超音速连续波氧碘化学激光器的光腔压力高一倍以上. 考虑到超音速气体辉光放电的困难程度, 脉冲放电引发的脉冲氧碘激光更适合在亚音速流动条件下工作. 但是可以考虑在超音速流动体系中采用脉冲光解引发氧碘化学激光的脉冲化因为脉冲光解碘甲烷能够在不影响超音速流动状态的情况下进行.

[1] Wani F, Nakabayashi T, Hayakawa A 2002 *Proc. SPIE* **4631** 128  
 [2] Matsuzaka F, Ohga T 1989 *Proc. Int. Conf. "Lasers'89"* 223  
 [3] Highland R, Crowell P, Hager G 1990 *Proc. SPIE* **1225** 512  
 [4] Schmiedberger J, Kodymova J 1991 *IEEE J. Quant. Electron.* **27** 1262  
 [5] Yuryshev N N 1991 *Proc. SPIE* **1397** 221  
 [6] Zhang R Y, Chen F, Sang F T, Min X D, Shao M Y 1989 *Proc. SPIE* **1031** 308  
 [7] Li G F, Yu H J, Duo L P, Jin Y Q 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 114201  
 [8] Jin Y, Pan B L, Chen G, Chen K, Yao Z X 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1799 (in Chinese) [金毅, 潘佰良, 陈钢, 陈坤, 姚志欣 2004 物

理学报 **53** 1799]  
 [9] Ding C L, Wan C Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1165 (in Chinese) [丁长林, 万重怡 2006 物理学报 **55** 1165]  
 [10] Cheng C 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 3068 (in Chinese) [程成 2003 物理学报 **52** 3068]  
 [11] Yuryshev N N 1998 *Quant. Electron.* **28** 397  
 [12] Zhuang Q, Sang F T, Zhou D Z 1997 *Short Wavelength Chemical Laser* (Beijing: National Defence Industrial Press) p178 (in Chinese) [庄琦, 桑凤亭, 周大正 1997 短波长化学激光 (北京: 国防工业出版社) 第 178 页]  
 [13] Li G F, Duo L P, Jin Y Q, Yu H J, Wang D Z, Sang F T 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4672 (in Chinese) [李国富, 多丽萍, 金玉奇, 于海

- 军, 王德真, 桑风亭 2010 物理学报 **59** 4672]
- [14] Carroll D L 1995 *AIAA Journal* **33** 1454
- [15] Yuryshev N N, Vagin N P 2002 *Proceeding of SPIE* **4760** 515
- [16] Zhang Y L, Sang F T, Zhang P, Jin Y Q 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 01110
- [17] Duo L P, Yang B L, Sang F T, Jin Y Q 1998 *IEEE J. Quan. Electron.* **34** 1258
- [18] Go I, Tran T S, Masataro S, Wataru M 2007 *Proceeding of SPIE* **6346** 63463A

## Theoretical research of the influence of operation mode of chemical oxygen-iodine laser on its pulsing

Li Guo-Fu<sup>1)2)†</sup> Duo Li-Ping<sup>1)</sup> Jin Yu-Qi<sup>1)</sup> Yu Hai-Jun<sup>1)</sup> Wang Jian<sup>1)</sup>  
Wang De-Zhen<sup>2)</sup> Sang Feng-Ting<sup>1)</sup>

1) (Key Laboratory of Chemical Laser, Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, China)

2) (School of Physics and Optoelectronic Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

(Received 11 June 2011; revised manuscript received 1 September 2011)

### Abstract

One-dimensional pre-mixed model for a pulsed chemical oxygen-iodine laser is presented according to the reaction mechanism in chemical oxygen-iodine laser. The influences of gas temperature of 150–450 K and pressure of 660–2660 Pa on single pulse energy, pulse duration and peak power are studied. The internal reason of the influences of pressure and temperature on laser characteristics is analyzed. The results show that the higher laser peak power can be obtained in the case of gas temperature of 150 K and pressure of 1330 Pa than in the case of 400 K and 2660 Pa. Thus an efficient pulsed chemical oxygen-iodine laser is promising if the abundant atomic iodine is generated instantaneously. The approach to atomic iodine generation does not disturb the state of supersonic flow.

**Keywords:** atomic iodine, pulse, chemical oxygen-iodine laser, supersonic, subsonic

**PACS:** 42.55.Ks, 42.55.-f, 34.50.Lf

† E-mail: ligf@dicp.ac.cn