

脉冲氧碘化学激光器的动力学模拟研究

李国富^{1)2)†} 多丽萍²⁾ 金玉奇²⁾ 于海军²⁾ 王德真¹⁾ 桑凤亭²⁾

1) (大连理工大学物理与光电工程学院, 大连 116024)

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

(2009 年 9 月 9 日收到; 2009 年 11 月 11 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, 从理论上研究了碘原子密度、单重态氧密度及产率、其他组分密度和光学参量(输出耦合率、增益长度等)对单脉冲能量及脉宽的影响. 分析了影响单脉冲能量和激光脉宽的内部动力学过程. 讨论了出光过程中增益开关效应. 计算的结果为优化脉冲氧碘化学激光器提供了理论依据.

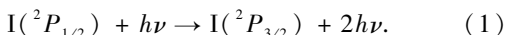
关键词: 碘原子, 脉冲, 氧碘化学激光

PACC: 4255K, 4255

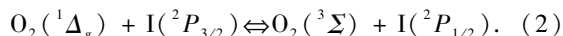
1. 引言

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、石油钻井等方面. 脉冲激光与物质相互作用的研究表明, 具有一定激光脉宽、峰值功率和占空比的强激光在钻孔切割方面的优势更加明显^[1]. 结合工业和军事上对大能量脉冲激光的需求, 脉冲氧碘化学激光器既具有了连续波氧碘激光器的传统优势, 又赋予了其在更多领域更多方面的应用前景, 成为当前国际上高能量脉冲激光研制的一个重要方向.

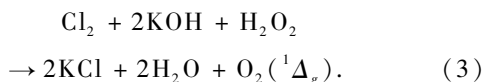
氧碘化学激光器的工作波长为 1315 nm, 它是基于激发态碘原子的受激辐射跃迁,



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,

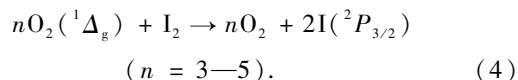


亚稳态的单重态氧是通过氯气和碱性的过氧化氢溶液反应生成, 反应式为



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, 即



由上述氧碘化学激光器的化学动力学过程看出, 可以通过碘化物气体脉冲放电或脉冲光解瞬间产生碘原子实现氧碘化学激光器脉冲化^[2-6]. 采用调 Q 的方法也可以实现连续波氧碘化学激光器的脉冲模式工作^[7-9].

氧碘化学激光器的抽运机理与一些光抽运的 YAG 激光器、铜蒸气激光器^[10]、Sr 离子激光器^[11]、电激励的 CO_2 激光器^[12,13] 和 HF 激光器有很大不同. 初始激发态碘原子密度为零, 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. Yuryshv^[14] 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. 庄琦等^[15] 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.

我们在预混反应脉冲出光模型基础上, 不仅研究了其内部各粒子数密度对激光能量和激光脉宽的影响, 而且还讨论了不同光学参量(如输出耦合率和激光腔长等)对能量提取和激光脉宽的影响. 理论计算发现如果光学参量不合适就会产生激光

† E-mail: ligf@dicp.ac.cn

拖尾现象,并对该现象进行了分析.

2. 计算模型

由传统化学氧碘激光器 COIL 的化学动力学过程,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)忽略了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. 在光腔处的化学动力学过程和相应的反应速率数据采用文献[16]中简化的 13 个反应. 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. 各组分的密度为

$$\frac{d[n_k]}{dt} = \sum_m k_m [n_i] \cdot [n_j] - \sum_\nu k_\nu [n_i] \cdot [n_k], \quad (5)$$

其中 $[n_k]$ 为组分 k 的密度, $[n_i],[n_j]$ 为第 m 个反应的反应物密度, k_m 为第 m 个反应方程的反应速率常数. 其中光子密度的时间微分方程由下式确定:

$$\begin{aligned} \frac{df}{dt} = & c\sigma Ff([I^*] - 0.5[I]) \\ & + \frac{cf\ln R}{2L} + \frac{a^2[I^*]}{4\pi L^2\tau}, \end{aligned} \quad (6)$$

其中 f 为光腔中的光子数密度, c 为光速, σ 为受激辐射截面, F 为填充因子, $[I^*]$ 为激发态碘原子密度, $[I]$ 为基态碘原子密度, R 为腔镜反射率, L 为激光腔长, a 为方形腔镜的边长, $\tau = 0.13\text{ s}$ 为自发辐射寿命.

$$F = \frac{V_{\text{gain}}}{V_{\text{cavity}}}, \quad (7)$$

其中 V_{gain} 为增益介质的模体积, V_{cavity} 为光腔中的模体积.

$$\sigma = \frac{c^2 A}{8\pi\nu^2} \phi(\nu), \quad (8)$$

其中 $A = 7.6\text{ s}^{-1}$ 为爱因斯坦自发辐射系数, $\phi(\nu)$ 为增益线形加宽函数,对于 20 Torr (1 Torr = 1.33322 × 10² Pa) 以下的氧碘激光器增益介质,多普勒加宽是主要的,压力加宽和自然加宽可以忽略^[17,18].

单脉冲激光能量为

$$E = h\nu \iint \frac{c\ln R}{2L} f dV dt = 0.5h\nu c S \ln R \int_0^T f dt, \quad (9)$$

其中 h 为普朗克常数, ν 为激光的中心频率, S 为出光的截面积. T 为激光脉宽的 3—4 倍, dV 为单位体积积分微元, dt 为单位时间积分微元.

3. 计算结果与分析

放电或者光解脉冲化氧碘化学激光器的核心就是用瞬间产生的碘原子代替传统 COIL 的碘分子,并希望将碘原子密度提高到一定的值以获得更高的脉冲峰值功率. 针对这个问题,我们首先计算了碘原子密度对脉冲能量和激光脉宽的影响,其他组分的初始密度是不变的,出光耦合方程的参数(如输出耦合率、腔长等)也是不变的,得到的计算结果如图 1 和图 2 所示. 计算结果表明:碘原子密度越高,激光的脉宽越窄. 这是因为随着碘原子密度的提高,基态碘原子与单重态氧分子碰撞传能产生激发态碘原子的速度更快,从而导致储存在单重态

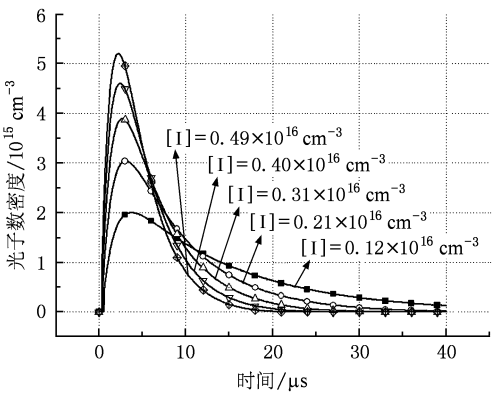


图 1 不同碘原子密度下计算得到的激光脉冲波形 腔镜输出耦合率 $T = 0.25\%$, 单重态氧产率 $Y_{\text{O}_2}(\text{a}) = 50\%$, $\text{O}_2(\text{a})$ 的密度为 $3.6 \times 10^{16}\text{ cm}^{-3}$

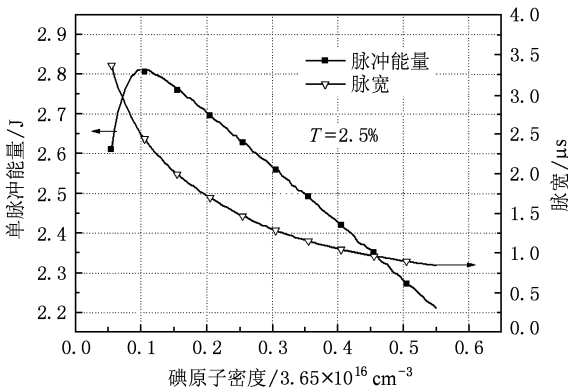


图 2 碘原子密度对脉冲能量和激光脉宽的影响

氧中的能量被迅速提取出来形成很短的强激光脉冲.就激光单脉冲能量而言,碘原子密度存在一个最佳值.当碘原子密度超过这个最佳值时,激光的脉冲能量是单调下降的.这主要是激发态碘原子的抽运和猝灭效应相互竞争的结果.碘原子的密度高了,激发态碘原子会通过表 1 中的反应^[8]很快猝灭掉,单重态氧的一部分能量就会通过激发态碘原子的猝灭通道而损失掉,从而导致单脉冲能量下降.综合碘原子对单脉冲能量和脉宽的影响,碘原子密度提高可以大幅度提高激光的峰值功率并且是单调上升的,因为它对缩短激光脉宽的作用更大.

表 1 化学氧碘激光器中的部分反应及反应速率常数

动力学反应	反应速率常数/ $\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
$\text{O}_2(^1\Delta_g) + \text{I} \rightarrow \text{O}_2(^3\Sigma) + \text{I}^*$	$1.0277 \times 10^{-10} \times e^{(-401.4/T)}$
$\text{O}_2(^1\Delta_g) + \text{I}^* \rightarrow \text{O}_2(^1\Sigma) + \text{I}$	1.00×10^{-13}
$\text{O}_2(^3\Sigma) + \text{I}^* \rightarrow \text{O}_2(^3\Sigma) + \text{I}$	3.50×10^{-16}
$\text{O}_2(^1\Delta_g) + \text{I}^* \rightarrow \text{O}_2(^1\Delta_g) + \text{I}$	1.00×10^{-13}

单重态氧密度对激光出光的影响如图 3 所示.单重态氧密度主要影响的是单脉冲激光能量,单重态氧密度越高,则单脉冲激光能量也越大.这是很自然的结果,毕竟氧碘化学激光器的激光能量是来自于单重态氧的.计算结果还表明:单重态氧密度在一定的碘原子密度与单重态氧密度比例以上时对激光脉宽也有微弱的影响,此时单重态氧密度越高,激光脉宽越大.激发态碘原子密度的生成速度是由碘原子密度和单重态氧密度共同决定的,当碘原子密度与单重态氧密度的比例较高时,它们都会对激发态碘原子的生成有影响,最终导致了激光脉宽的增加或者减小.而一旦这个密度比例降低到激发态碘原子密度的生成速度主要由基态碘原子密

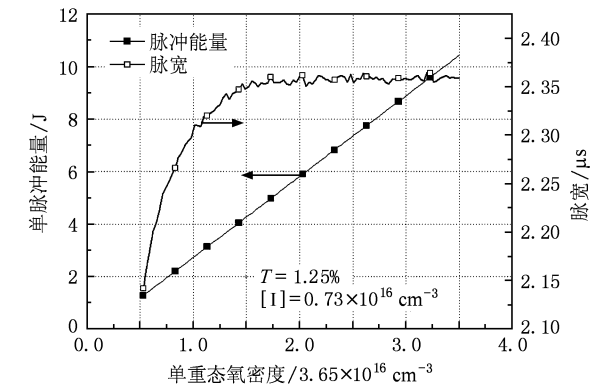


图 3 单重态氧分子对激光能量和激光脉宽的影响

度决定时,单重态氧密度对激光脉宽也就没有影响了.

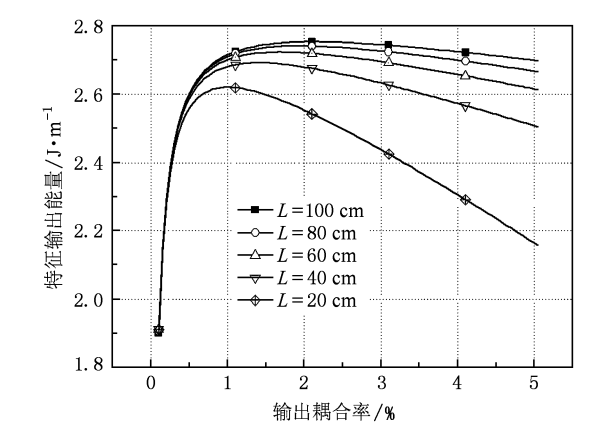


图 4 输出耦合率和增益区长度对单脉冲能量的影响

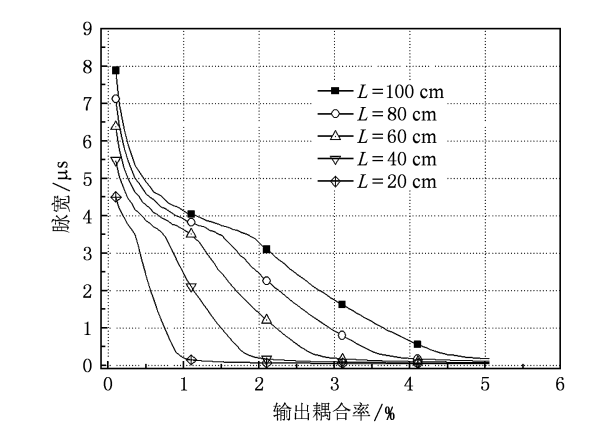


图 5 输出耦合率和增益区长度对激光脉宽的影响

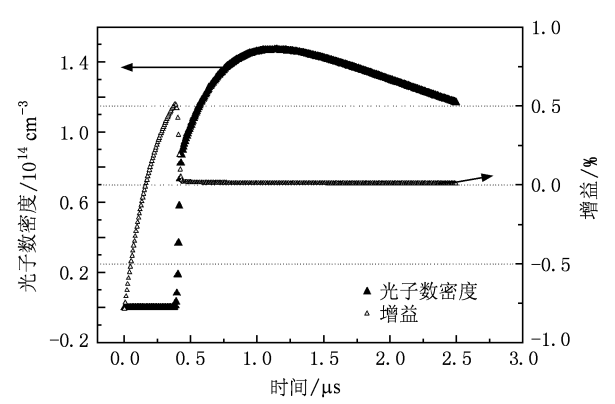


图 6 光腔中的光子数密度和增益随反应时间的变化

腔镜输出耦合率对激光脉冲能量的影响随增益区长度的不同而不同,计算结果如图 4 所示.当增益区长度较长时(例如,增益区长度 $L = 100 \text{ cm}$),输出

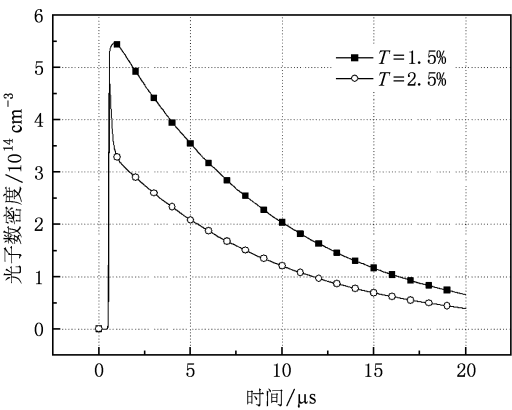


图 7 不同输出耦合率的脉冲激光波形

耦合率达到最佳输出耦合率后对单脉冲能量的影响相对较小,由 2% 增大到 4%,脉冲能量几乎没有大的变化.而当增益长度较短时(例如, $L=20\text{ cm}$),达到最佳输出耦合率后对单脉冲能量的影响较大,由 2% 增大到 4%,脉冲能量降低接近 10%.输出耦合率对激光脉宽的影响比较大,结果如图 5 所示.在增益区长度为 100 cm 时,输出耦合率由 2.0% 增大到 4.0%,激光脉宽由 3.5 μs 缩短到 0.6 μs ,对应不同

的增益长度影响的幅度也是不同的.激光场的建立和粒子数反转形成增益的时序关系如图 6 所示.由图 6 可以看出在激光场没有建立之前,粒子数反转形成增益并达到一定的值,在谐振腔作用下瞬间形成强脉冲激光同时增益下降到阈值增益.粒子数反转是依靠单重态氧与基态碘原子共振传能实现的,这种传能过程需要一定的时间,在较高输出耦合率情况下,如果抽运传能时间大于光腔衰荡时间时就会出现拖尾现象,如图 7 所示.

4. 结 论

本文采用一维预混脉冲出光模型研究了各组分密度和光学参量对激光脉宽和单脉冲能量的影响.缩短激光脉宽不仅可以提高碘原子密度实现,也可以通过适当增加输出耦合率来达到.虽然增大输出耦合率会导致单脉冲能量下降,但单脉冲的峰值功率会显著提高.增益区长度越长,对应单脉冲能量的最佳输出耦合率越大.提高单重态氧密度和产率对增大单脉冲能量是非常有效的.该模型的计算结果为优化脉冲氧碘化学激光器系统提供了理论依据.

[1] Wani F, Nakabayashi T, Hayakawa A 2002 *Proc. SPIE* **4631** 128

[2] Yuryshev N N 1991 *Proc. SPIE* **1397** 221

[3] Zhang R Y, Chen F, Sang F T, Min X D, Shao M Y 1989 *Proc. SPIE* **1031** 308

[4] Li G F, Yu H J, Duo L P, Jin Y Q 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 114201

[5] Vagin N P, Pazyuk V S, Yuryshev N N 1995 *Quant. Electron.* **25** 746

[6] Vagin N P, Yuryshev N N 2001 *Quant. Electron.* **31** 127

[7] Matsuzaka F, Ohga T 1989 *Proc. Int. Conf. "Lasers'89"* 223

[8] Highland R, Crowell P, Hager G 1990 *Proc. SPIE* **1225** 512

[9] Schmiedberger J, Kodymova J 1991 *IEEE J. Quant. Electron.* **27** 1262

[10] 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]

[11] Chen L, Mao B N, Wang Y B, Wang L M, Pan B L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6976 (in Chinese) [陈 立、毛邦宁、王煜博、王丽敏、潘佰良 2007 物理学报 **56** 6979]

[12] 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]

[13] Cheng C 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 3068 (in Chinese) [程 成 2003 物理学报 **52** 3068]

[14] Yuryshev N N 1998 *Quant. Electron.* **28** 397

[15] 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]

[16] Carroll D L 1995 *AIAA Journal* **33** 1454

[17] Fan A F, Gao Z 1993 *Acta Phys. Sin.* **42** 407 (in Chinese) [范安辅、高 智 1993 物理学报 **42** 407]

[18] Gao Z 1981 *Acta Phys. Sin.* **30** 1591 (in Chinese) [高 智 1981 物理学报 **30** 1591]

Dynamical simulation of pulsed chemical oxygen-iodine laser

Li Guo-Fu^{1)2)†} Duo Li-Ping²⁾ Jin Yu-Qi²⁾ Yu Hai-Jun²⁾ Wang De-Zhen¹⁾ Sang Feng-Ting²⁾

¹⁾ (*School of Physics and Optoelectronic Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China*)

²⁾ (*Key Laboratory of Chemical Laser, Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, China*)

(Received 9 September 2009; revised manuscript received 11 November 2009)

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 dependence of species concentration and optical parameters on single pulse energy and pulse duration is studied. The dynamical process is analyzed while laser is running. Gain switching during lasing is discussed. These results can provide theoretical support for the optimization of pulsed chemical oxygen-iodine laser.

Keywords: atomic iodine, pulse, chemical oxygen-iodine laser

PACC: 4255K, 4255

[†] E-mail: ligf@dicp.ac.cn