

# 脉冲氧碘化学激光放大器的理论模型\*

冯浩 王成栋 庄琦 沙国河 张存浩

(中国科学院大连化物所, 大连 116023)

**提要** 本文提出脉冲氧碘化学激光主振荡器加功率放大器(MOPA)系统中放大器的理论模型。计算表明: 氧碘放大器内采用折迭光路方案, 可以获得高的放大率及化学效率。

**关键词** 脉冲, 氧碘化学激光器, 放大器, 模型, 重复频率

## Model for amplifier of pulsed oxygen-iodine chemical laser

Feng Hao, Wang Chengdong, Zhuang Qi, Sha Guohe, Zhang Cunhao

(Dalian Institute of Chemical Physics, Academia Sinica, Dalian 116023)

**Abstract** A theoretical model for amplifier of pulsed chemical oxygen-iodine laser is presented. The calculation shows that an oxygen-iodine amplifier using multiple optical path may get high amplification ratio and high chemical efficiency.

**Key words** pulsed, chemical oxygen-iodine laser (COIL), amplifier, model, repetition rate

## 1 引言

随着脉冲氧碘激光器研究的发展, 开展主振荡器加功率放大器(简称 MOPA)系统的研究工作显得十分重要。G. H. Hays 等人<sup>[1]</sup>曾设计了一个高功率的放大腔, 但未见发表有关的理论模型。N. G. Basov 等人<sup>[2]</sup>提出了重复脉冲氧碘放大器的设想方案, 并对其性能进行了估算, 但过于简单。

本文建立了较为完整的脉冲氧碘化学激光放大器的理论模型, 详细考虑了放大器内部进行的化学动力学过程, 在建立物理模型时, 抓住其氧碘化学激光的实质, 即在放大器内部始终存在着氧与碘传能和弛豫等化学动力学过程, 及气流流动等因素。在计算时, 对模型作了巧妙的模拟求解, 大大地简化了计算程序, 并得到了可靠的计算结果。理论模型探索了来自振荡器的碘激光束性能以及放大器操作参数对放大器性能的影响。计算表明: 采用重复频率短脉宽的碘激光束输入氧碘放大器, 同时放大器内采用多次折迭光路 MOPA 方案是可行的和高效的。

收稿日期: 1992年8月27日。

\* 本工作受国家高技术计划激光技术领域资助。

## 2 模型的基本原理

为了提高脉冲氧碘化学激光的输出功率,我们提出采用主振荡器加功率放大器(简称 MOPA)方案,其装置由主振荡器加功率放大器两部分组成(见图 1)。

脉冲氧碘激光振荡器能提供高质量具有一定脉宽和重复频率的脉冲碘激光束,并可输入放大器内。放大器本身为连续流动式,  $O_2(^1\Delta)$  和  $I_2$  等气体在其内部进行化学动力学过程,并在某处开始产生粒子数反转 [ $I(^2P_{1/2})$  粒子数大于  $0.5I(^2P_{3/2})$  粒子数], 当反转粒子数密度达到一定值时,相应地小信号增益  $\alpha$  也达到一定值,此时如受到来自振荡器碘激光光束的照射,由于  $I(^2P_{1/2})$  的受激发射作用,使光束能量不断增强,获得高功率碘激光输出,达到使输入光束功率放大之目的。

模型中,在放大器内部加高反射率的反射镜,使光束在氧碘放大器内多次来回反射,以提高对化学能的提取效率和功率的放大率。本模型的计算目的是找出放大器的放大率及能量提取效率与来自振荡器的碘激光束性能的关系,同时找出氧碘放大器的输出性能与放大器操作条件的关系。

## 3 模 型

基本假设:(1) 放大器为宽  $l$  cm,高  $b$  cm,长  $L$  cm 的空腔。放大器内部气流为预混一维流动,即气流各参数在没有光束输入放大器期间,只是位置  $y$  坐标的函数;(2) 全部过程在等温(298 K)、等压和气流速度  $u$  不变的情况下进行;(3) 碘激光束输入放大器期间,各反射镜的反射率  $\beta$  都取为 0.998,此外,不考虑窗口及放大器内部的一切其它损失。

放大器内部进行的主要化学动力学过程计有:

动力学过程	速率常数 $K_i$ ( $cm^3 \cdot molec^{-1} \cdot s^{-1}$ )	参考文献
$O_2^* + I_2 \xrightarrow{K_1} O_2 + I_2^*$	$7.0 \times 10^{-15}$	[3]
$O_2^* + I_2^* \xrightarrow{K_2} O_2 + 2I$	$3.0 \times 10^{-10}$	[3]
$O_2^* + I \xrightarrow{K_3} O_2 + I^*$	$7.7 \times 10^{-11}$	[3]
$O_2 + I^* \xrightarrow{K_4} O_2^* + I$	$2.7 \times 10^{-11}$	[3]
$I^* + M \xrightarrow{K_5 \sim K_{10}} I + M$		
$M = I_2$	$3.6 \times 10^{-11}$	[4]
$O_2$	$4.6 \times 10^{-15}$	[4]
$O_2^*$	$1.1 \times 10^{-13}$	[3]
$I$	$1.6 \times 10^{-14}$	[3]
$H_2O$	$2.0 \times 10^{-12}$	[3]
$Cl_2$	$8.0 \times 10^{-15}$	[3]

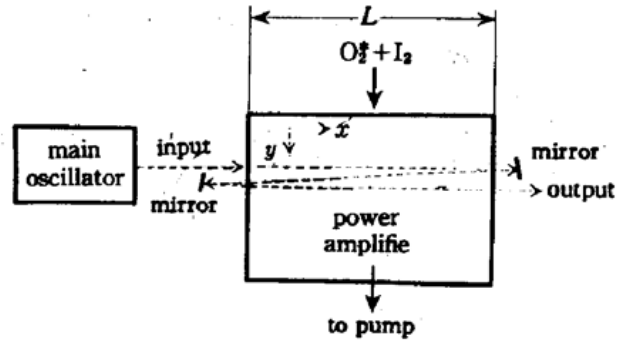
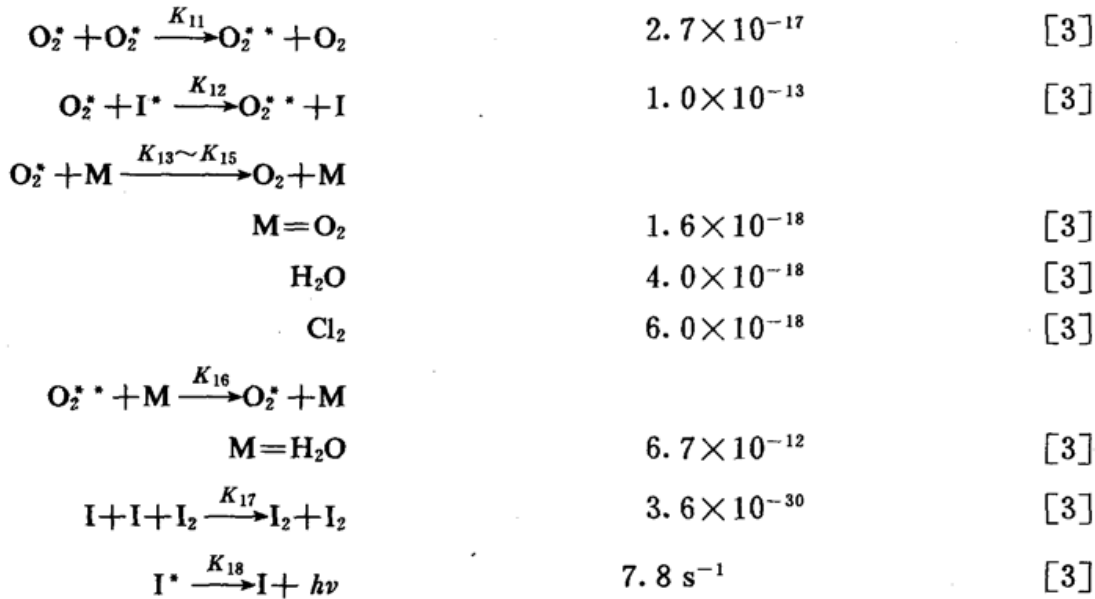


Fig. 1 Schematic of MOPA system



其中,  $\text{O}_2^*$  为  $\text{O}_2(^1\Delta)$ ,  $\text{O}_2$  为  $\text{O}_2(^3\Sigma)$ ,  $\text{O}_2^{* *}$  为  $\text{O}_2(^1\Sigma)$ ,  $\text{I}^*$  为  $\text{I}(^2P_{1/2})$ ,  $\text{I}$  为  $\text{I}(^2P_{3/2})$ ,  $\text{I}_2^*$  为  $\text{I}_2(A^3\Pi_u)$ ,  $\text{I}_2$  为  $\text{I}_2(^1\Sigma)$  态。

上述 18 个动力学方程中, 共有 9 种组分。

取气流流动方向为  $y$  坐标。放大器无光束照射时, 其内各组分的浓度变化率为

$$W_{\text{chem},i} = \frac{\partial C_i}{\partial t} + u \frac{\partial C_i}{\partial y} = \sum_{j=1}^{18} W_i^{(j)} - \sum_{j=1}^{18} W_j^{(i)} \quad (1)$$

其中:  $i = 1, 2, \dots, 9$ ;  $W_i^{(j)}$  为第  $i$  个组分在第  $j$  个动力学方程中的生成速率;  $W_j^{(i)}$  为第  $i$  个组分在第  $j$  个动力学方程中的消失速率。

小信号增益  $\alpha$  表示为

$$\alpha = \sigma_{st}(C_{I^*} - 0.5C_I) \quad (2)$$

其中,  $\sigma_{st}$  为  $\text{I}^*$  的受激发射截面(为  $7.4 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ )<sup>[5]</sup>;  $C_{I^*}$  为  $\text{I}^*$  的浓度;  $C_I$  为  $\text{I}$  的浓度。

取光束前进方向为  $x$  坐标。放大器在有脉冲碘激光束输入时, 选定坐标原点在输入光束的窗口处。不考虑  $x, y$  方向的扩散传质, 只是  $y$  方向有流动。在放大器内的光束上取微元  $dx \cdot dy$ , 因此, 当有光速通过放大器内工作物质时, 可建立如下方程:

$$\frac{\partial C_{I^*}}{\partial \tau} = W_{\text{chem},I^*} - u \frac{\partial C_{I^*}}{\partial y} - \sigma_{st}(C_{I^*} - 0.5C_I)c\phi \quad (3)$$

$$\frac{\partial C_I}{\partial \tau} = W_{\text{chem},I} - u \frac{\partial C_I}{\partial y} + \sigma_{st}(C_{I^*} - 0.5C_I)c\phi \quad (4)$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial \tau} = W_{\text{chem},i} - u \frac{\partial C_i}{\partial y} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \tau} = -c \frac{\partial \phi}{\partial x} + \sigma_{st}(C_{I^*} - 0.5C_I)c\phi \quad (6)$$

其中  $C_i$  指除了  $\text{I}^*$  及  $\text{I}$  以外的其它组分浓度;  $\tau$  为光束照射微元的时间;  $\phi$  为光子密度;  $u$  为  $y$  方向气流速度;  $c$  为光速。

在初始条件 [ $\tau = 0: C_{I^*} = C_{I^*,0}, C_I = C_{I,0}, C_i = C_{i,0}, (i = 1, 2, \dots, 7)$ ] 和边界条件 [ $0 < \tau \leq \tau_p, x = 0: \phi(\tau) = \phi_0(\tau)$ ] 确定时, 则(3)~(6)方程可解。

计算过程分二个步骤: 首先根据放大器进口的气流条件, 对其进行只有化学动力学过程而无光照射的计算, 获得放大器内不同部位气流的分浓度场和增益场(图 2)。然后, 再选定某增益数值处, 作为振荡器光束的入口, 进行有输入光束照射提取放大器内能量的计算, 并以

此处对应的各组分浓度值作为初值,计算出放大器的性能。

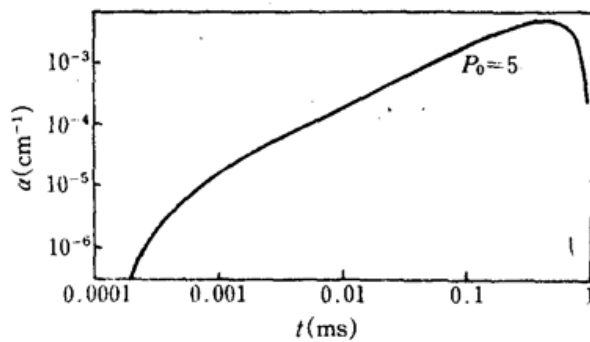


Fig. 2 Change of small signal gain of amplifier along gas flow direction with no laser input

在“空”的时间(“空”指脉冲间隔的时间)里,正好流到第一次提取时的相邻位置,立即由第一次提取输出的被增强了的光束反方向进入该微体积  $\Delta V$  内,进行第二次提取,以此模拟光束的反射过程,如此重复提取能量,直到提取效率最大为止。这个模拟过程与腔内多次反射过程在物理上是完全一致的,但计算过程大为简化。

在进行上面模拟之后,可求出放大器内经  $n$  次提取能量后的总放大率  $K_n$  为

$$K_n = \frac{I_{t,n}}{I_0} = \frac{\int_{n(l/c)}^{n(l/c)+t} h\nu\phi_{t,n}(\tau)d\tau}{\int_0^t h\nu\phi_0(\tau)d\tau} = \beta^{-1} \prod_{m=1}^n K_m \quad (7)$$

其中:  $I_0$  为激光在放大器输入端的光强;  $I_{t,n}$  是激光在放大器输出端的光强;  $K_m$  是输入光束被放大  $m$  次的放大率;  $\beta$  是反射镜的反射率。

在计算放大器的效率时,作如下假设: (1) 输出光斑面积为  $A_n = b(ut_n)$ ; (2) 光斑上的光强度分布是均匀的,只是时间函数。这样效率公式可表示为

$$\eta_n = \frac{H_{t,n} - H_0}{H_{O_2^*}} = \frac{\left[ \int_{n(l/c)}^{n(l/c)+t} I_{t,n}(\tau)d\tau - \int_0^t I_0(\tau)d\tau \right] A_n}{E_{O_2^*} C_{O_2^*}(ut_n) bl}$$

因为  $I = h\nu\phi$ , 所以

$$\eta_n = \frac{h\nu c \left[ \int_{n(l/c)}^{n(l/c)+t} \phi_{t,n}(\tau)d\tau - \int_0^t \phi_0(\tau)d\tau \right]}{E_{O_2^*} C_{O_2^*} L} \quad (8)$$

式中,  $H_{O_2^*}$  是放大器被提取的气体体积中  $O_2^*$  的初始能量;  $H_0$  是激光在放大器输入端的总能量;  $H_{t,n}$  是激光在放大器输出端的总能量;  $\phi_0$  是激光在放大器输入端的光子密度;  $\phi_{t,n}$  是激光在放大器输出端的光子密度;  $E_{O_2^*}$  是一个  $O_2^*$  分子所含能量;  $C_{O_2^*}$  是放大器入口处  $O_2^*$  浓度;  $t_n$  是输入重复频率的脉冲光束,其两个脉冲之间的间隔时间;  $h\nu$  是  $I^*$  发射一个光子的能量;  $u$  是气流速度;  $b$  是放大器厚度;  $l$  是放大器宽度;  $I_0$  是激光在放大器输入端的光强;  $I_{t,n}$  是激光在放大器输出端的光强。

## 4 计算结果及讨论

### 4.1 放大器在无振荡器碘激光光束输入时,放大器内各点的 $I^*$ 、 $I$ 的浓度及增益 $\alpha$ 的分布

在放大器无振荡器碘激光光束输入时,随着化学动力学过程的进行,  $O_2^*$  ( $\Delta$ ) 不断消耗,使得  $C_{I^*}$ 、 $C_I$  和  $C_{O_2^*}$  都有增加,并在某处  $y$  (或  $t$ ) 开始产生粒子数反转,  $\Delta N > 0$  ( $C_{I^*} - 0.5C_I > 0$ ), 有

长脉宽单程提取,由于能量提取深度不够,其效率一定是很低的。为了提高提取效率,必须采用重复频率多次来回反射的 MOPA 方案,也就是使单元体积内的  $O_2^*$  能量被多次提取。具体办法是使输入放大器的碘激光,在激活区域内,经反射镜多次来回反射,作多次提取,以得到高的提取效率及放大率,这是一个四维时空模型计算,计算过程很复杂。为了简化上述多次提取过程的计算,模型计算时,采用模拟办法,即将某  $\Delta V$  体积内激活介质在被提取一次后(即输入光束照射一次后),

正值小信号增益出现,以后增益  $\alpha$  逐渐达到  $\alpha_{\max}$ ,当  $O_2(^1\Delta)$  粒子数减少到一定数量时,它对 I 的传能贡献减小,而 I\* 的弛豫使  $C_{I^*}$  减小,  $C_I$  增大,故使反转粒子数密度  $\Delta N(C_{I^*} - 0.5C_I)$  减小了,增益  $\alpha$  也随之下落(图 3)。

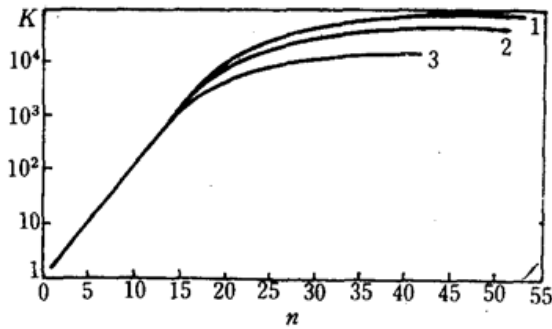


Fig. 3 Influence of input laser pulse width on amplification rate

$f_0 = .4E 10 \text{ cm}^{-3}$ ; 1 -  $t_p = 0.1 \mu\text{s}$ ,  $t_s = 10 \mu\text{s}$ ; 2 -  $t_p = 0.2 \mu\text{s}$ ,  $t_s = 10 \mu\text{s}$ ; 3 -  $t_p = 1.0 \mu\text{s}$ ,  $t_s = 10 \mu\text{s}$

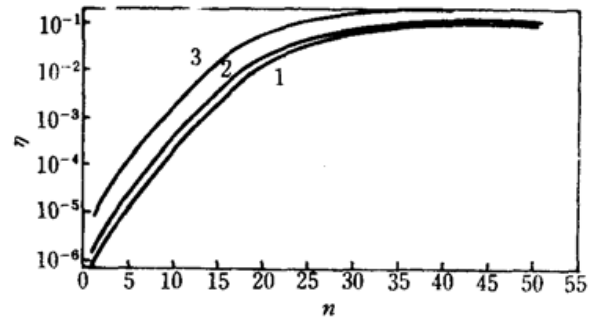


Fig. 4 Influence of input laser pulse width on chemical efficiency

$f_0 = .4E 10 \text{ cm}^{-3}$ ; 1 -  $t_p = 0.1 \mu\text{s}$ ,  $t_s = 10 \mu\text{s}$ ; 2 -  $t_p = 0.2 \mu\text{s}$ ,  $t_s = 10 \mu\text{s}$ ; 3 -  $t_p = 1.0 \mu\text{s}$ ,  $t_s = 10 \mu\text{s}$

#### 4.2 输入光束脉宽 ( $t_p$ ) 的影响

由图 3 可见,当输入光束的脉冲间隔时间( $t_s$ )一定时,虽然脉宽  $t_p$  不同,但前几次提取的放大率曲线是重合的,随着提取次数的增加,输入光束脉宽  $t_p$  大的,放大率要小。这个现象可以这样来分析:在最初几次提取能量时,由于输入光束的能量不高,剩有足够的  $O_2(^1\Delta)$  可用于反应和传能,再次提取后增益  $\alpha$  变化很小,因此  $t_p$  对放大率的影响就很小,才会有曲线 1, 2, 3 重合部分。随着提取次数增加,  $t_p$  大的光束,消耗的  $O_2(^1\Delta)$  也多,经过动力学反应和传能后,增益  $\alpha$  数值减小得较多,因此出现  $t_p$  大的,其放大率低的现象。至于  $t_p$  大的,其提取深度愈大,每次提取的能量要多,故效率要高,在达到同样的化学效率情况下,总提取次数可少些(见图 4)。

#### 4.3 $O_2^* - I$ 传能平衡时间

在放大器内部进行的化学动力学过程中,本模型考虑了 18 个各种类型的反应,把所有主要动力学过程都考虑进去了。通过增益  $\alpha$  和提取过程中的时间变化关系曲线(图 5)可见:在每次提取能量,输入光束由  $o \rightarrow t$  时,  $\alpha$  不断减少,使  $\alpha$  下降到最低点。但在提取能量之后,在较短的时间内,由于  $O_2(^1\Delta)$  与 I 原子传能过程的进行,使增益  $\alpha$  又恢复到接近上次提取前的数值;这个传能平衡时间大约在  $0.5 \sim 1 \mu\text{s}$ 。

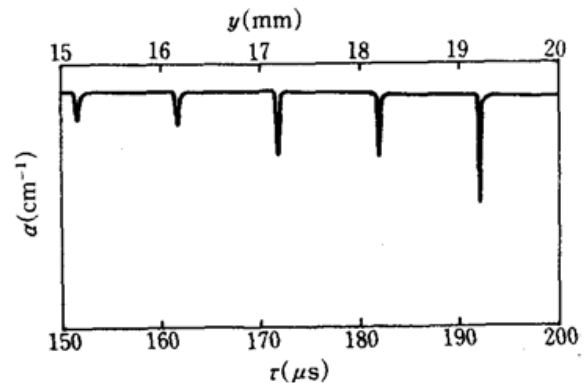


Fig. 5 Change of small signal gain during extraction process

$f_0 = .4E 10 \text{ cm}^{-3}$ ,  $t_p = .10E+00 \mu\text{s}$ ,  $t_s = .10E+02 \mu\text{s}$ ,  $u = 100 \text{ m/s}$

#### 参 考 文 献

- 1 G. H. Hays, G. A. Fisk, *IEEE J. Quant. Electr.*, QE-17(9), 1832(1981)
- 2 N. G. Basov, P. G. Kryukov, N. N. Yuryshev, *Sov. J. Quant. Electr.*, 17(5), 588(1987)
- 3 G. P. Perram, AD-A202223, The standard chemical oxygen-iodine laser kinetics package
- 4 G. E. Busch, *IEEE J. Quant. Electr.*, QE-17(6), 1128(1981)
- 5 Report to the American Physical Society of the Study Group on Science and Technology of Directed Energy Weapons (1987)