

文章编号: 1001-4322(2003)05-0417-04

# 氧碘化学激光中的增益光导效应\*

束小建

(北京应用物理与计算数学研究所,北京 100088)

**摘 要:** 发现和分析了氧碘化学激光中的增益光导效应。碘注入的不均匀等导致增益在该方向的不均匀。采用预混模型和 Fabry-Perot 腔模型,推导了碘不均匀分布情况下的单重态氧的产额和激光束横向分布的解析表达式。计算结果表明,由于增益光导效应,引起激光横向分布的变化,可导致光束在碘注入方向的倾斜,以及输出功率的下降。

**关键词:** 氧碘化学激光; 光导效应; 不均匀分布; 倾斜; 分析模型

**中图分类号:** TN248.5 **文献标识码:** A

光导效应是指激光介质空间不均匀分布的增益和等效折射率产生的对光束的引导作用,分别称为增益光导和折射光导。该效应和不同轴问题在自由电子激光中已做了大量的研究<sup>[1~3]</sup>。但在氧碘化学激光(COIL)<sup>[4~6]</sup>中还未见该方面的研究,其原因在于 COIL 固有的在气体流动方向( $x$  方向)的不均匀太突出,掩盖了其它的不均匀性。随着 COIL 的发展,装置尺寸的增加和测量技术的进步,增益和输出功率分布的不均匀性已被越来越多地观测到。光导效应是影响激光横向分布和光束质量的一个重要因素,值得研究。

在现有的超音速连续波 COIL<sup>[4~6]</sup>中,碘蒸汽一般是经大量氦气稀释后在拉伐尔(收敛扩张)喷管喉部前以声速注入,很难保证其在注入方向( $y$  方向)的均匀性。我们假设碘在  $y$  方向的分布是不均匀的,采用 Hager 等人的方法<sup>[7]</sup>推导了  $O_2(^1)$  产额和激光束横向分布的解析表达式。结果表明光导效应对激光横向分布有重要影响,可导致其在  $y$  方向的倾斜,以及输出功率的下降。

## 1 分析模型

采用预混模型<sup>[8,9]</sup>,假设在光腔入口处碘已经完全离解。按照 Hager 等人的方法<sup>[7]</sup>,假定光腔中混合气体的密度、温度  $T$  和流速  $v$  是常数。忽略少量的三重态氧  $O_2(^3)$ ,氧、碘的数密度满足

$$[O_2(^1)] + [O_2(^3)] = [O_2]_t = \text{Const} \quad (1)$$

$$[I^*] + [I] = 2[I_2] = [I]_t = [I]_0 f(y) \quad (2)$$

其中  $f(y)$  描述了碘的非均匀注入及其在  $y$  方向的分布,为保证碘的总量不变,要求  $f(y)$  的平均值等于 1。

采用均匀增益饱和模型,增益为<sup>[7,8]</sup>

$$g = ([I^*] - 0.5[I]) \quad (3)$$

$$= 1.31 \times 10^{-16} / \sqrt{T} \quad (4)$$

由近共振传能反应和激光受激辐射,可得  $O_2(^1)$  的产额  $Y$  和激发态碘  $I^*$  的速率方程

$$v \frac{dY}{dx} = -k_F Y[I] + k_R(1 - Y)[I^*] \quad (5)$$

$$v \frac{d[I^*]}{dx} = \{k_F Y[I] - k_R(1 - Y)[I^*]\} [O_2]_t - \frac{gI}{h} \quad (6)$$

其中  $k_F = 2.33 \times 10^{-8} / T(\text{cm}^3 \text{s}^{-1})$  和  $k_R$  是氧碘近共振传能正向和反向反应速率,  $I$  是双程平均腔内光强,  $h$  是波长为  $1.315\mu\text{m}$  的光子的能量。

为了得到解析结果,采用 Fabry-Perot 腔模型,增益在各点饱和到阈值增益

$$g = g_{th} = -\ln[R_1 R_2(1 - \dots)] / 2L \quad (7)$$

其中分布损失已被忽略不计<sup>[7]</sup>,  $L$  是增益长度,  $R_1, R_2$  分别是输出镜和高反射镜的反射率,  $\dots$  是衍射损失。

\* 收稿日期:2002-10-29; 修订日期:2003-01-20

基金项目:国家 863 计划项目资助课题

作者简介:束小建(1963-),男,博士,研究员,主要从事氧碘化学激光、自由电子激光等理论研究;北京 8009 信箱;E-mail:shu.xiaojian@mail.iapcm.ac.cn。

由(2),(3),(7)式,可得到碘的数密度为

$$[I^*] = [2g_{th} + [I]_0 f(y)]/3 \quad (8a)$$

$$[I] = [-2g_{th} + 2[I]_0 f(y)]/3 \quad (8b)$$

将(8)式代入(5)式后对方程积分得到产额为

$$Y(x, y) = (Y_0 - Y_{sat})e^{-x/v} + Y_{sat} \quad (9)$$

其中  $Y_0$  是在光腔入口处的初始产额,饱和时的剩余产额  $Y_{sat}$  和时间常数 定义为

$$Y_{sat}(y) = \frac{[I^*]}{k_{eq}[I] + [I^*]} = \frac{2g_{th} + [I]_0 f(y)}{(2k_{eq} + 1)[I]_0 f(y) - 2g_{th}(k_{eq} - 1)} \quad (10a)$$

$$(y) = \frac{1}{k_F[I] + k_R[I^*]} = \frac{3k_{eq}}{k_F[(2k_{eq} + 1)[I]_0 f(y) - 2g_{th}(k_{eq} - 1)]} \quad (10b)$$

其中  $k_{eq} = 0.75 \exp[401.4/T]$  是近共振传能反应平衡常数。

由(6),(8),(9)式,饱和光强为

$$I(x, y) = h[O_2]_t(Y_0 - Y_{sat})e^{-x/v} / g_{th} \quad (11)$$

上式对  $x$  积分可得到平均光强在  $y$  方向的分布

$$\bar{I}_x(y) = \frac{h[O_2]_t v}{g_{th} l_x} (Y_0 - Y_{sat})(1 - e^{-l_x/v}) \quad \frac{h[O_2]_t v}{g_{th} l_x} (Y_0 - Y_{sat}) \quad (12)$$

其中  $l_x$  是镜子在  $x$  方向的尺寸。

输出功率是对入射到镜子上的光强的积分

$$P = \iint_{out} dxdy = \frac{1}{2} \iint dxdy = \frac{x_{O_2}}{2g_{th}L} \frac{1}{l_y} \int_0^{l_y} dy (Y_0 - Y_{sat})(1 - e^{-l_x/v}) \quad (13)$$

其中  $= h N_A$ ,  $N_A$  是 Avogadro 常数;  $x_{O_2}$  是总的氧气的摩尔流量;  $l_y$  是镜子在  $y$  方向的尺寸; 是输出耦合因子<sup>[7]</sup>

$$= \frac{(1 - R_1 - S_1) \sqrt{R_2}(1 - ) \ln[R_1 R_2(1 - )]}{[\sqrt{R_2} + \sqrt{(1 - )} R_1] [\sqrt{R_1 R_2(1 - )} - 1]} \quad (14)$$

其中  $S_1$  是输出镜的散射损失。

令  $f(y) = 1$ ,所有的结果退化到 Hager 等人的结果<sup>[7]</sup>。

对于最简单的线性不均匀分布

$$f(y) = 1 + k(0.5l_y - y) \quad (15)$$

饱和时的产额、光强的平均值和输出功率等可以积分出来,但运算和结果太烦琐,不如直接做简单的数值积分计算。作为例子,在此给出  $Y_{sat}$  的平均值

$$\bar{Y}_{sat} = \frac{1}{2k_{eq} + 1} + \frac{6k_{eq}g_{th}}{(2k_{eq} + 1)^2 [I]_0 k l_y} \ln \frac{(2k_{eq} + 1) [I]_0 (1 + 0.5kl_y) - 2g_{th}(k_{eq} - 1)}{(2k_{eq} + 1) [I]_0 (1 - 0.5kl_y) - 2g_{th}(k_{eq} - 1)} \quad (16)$$

## 2 结果分析与讨论

采用(15)式表示的不均匀碘分布,具体计算了其对 COIL 运行的影响。计算所用参数见表 1,此外  $R_2 = 0.995$ ,  $= 0.015$ ,  $S_1 = 0.0025$ ,对  $R_1$  优化使得输出功率最大,此时,  $R_1 = 0.75$ 。

表 1 计算所用的 COIL 参数

Table 1 COIL parameters in the cavity used in the calculations

$Y_0$	$T/ K$	Mach number	$v/ (m \cdot s^{-1})$	$[I]_0/ cm^{-3}$	$[O_2]/ [I_2]$
0.289	187	1.76	888	$1.14 \times 10^{15}$	45

图 1 给出了碘密度在  $y$  方向从开始时的最大值一直线性地减少到半值情况下激光的横向分布。可见光场不仅在气体流动的  $x$  方向,而且在  $y$  方向也是不均匀分布的,是在两个方向倾斜的。增益和光导效应对激光横向分布和光束质量有重要的影响,激光场有产生与增益分布一致的趋势。由(10),(11)式,碘密度直接影响饱和时的剩余产额  $Y_{sat}$  和时间常数,而且这种影响不是线性的,并且进一步通过它们对光强和输出功率产

生影响,光强在  $y$  方向的变化是随着不同的  $x$  而改变的。图 2 给出了对  $x$  平均后的光强随  $y$  的变化,可见光强在  $y$  方向不是线性减少的。当碘密度的变化大时,采用(12)式的近似结果是不准确的,指数项不可忽略。图 3 给出了不同  $x$  位置处的光强随  $y$  的变化。开始光强随  $y$  线性减少,然后随着  $x$  的增加,产额和增益下降,光强随  $y$  的变化也变得平缓起来,先是前面变缓、变平,然后逐渐抬起来,中间最大并且后移,直至反过来,光强随  $y$  几乎线性增加。

在实验上如果能够测量不同  $x$  位置处光强随  $y$  的变化,依据本文分析得到的光强变化特性,就可以判断光束倾斜是由本文所研究的增益光导效应所造成的,还是由其它原因如镜子倾斜等所造成的。此外,通过测量小信号增益的空间分布<sup>[5]</sup>也可以判断是否存在增益光导,以及碘在  $y$  方向是否不均匀分布等。

光束倾斜将削弱光场和激光介质的相互作用,从而导致输出功率的下降。由于所采用的镜子在  $x$  方向的尺寸很大,能量提取很充分,而且我们采用了碘的总量保持不变的条件,因此,在我们的计算中,当加大碘密度的变化,即增大(15)式中的  $k$  时,输出功率变化不大,只是略有下降。

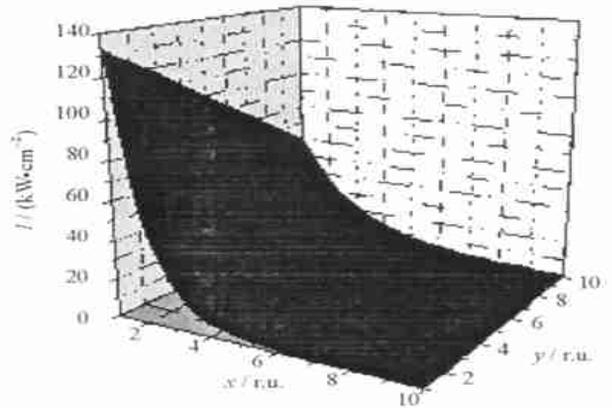


Fig. 1 Intensity in the cavity with  $f(I_y)/f(0) = 0.5$

图 1  $f(I_y)/f(0) = 0.5$  的情况下腔内光强分布

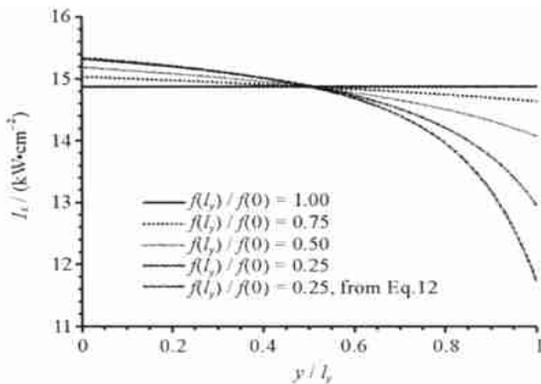


Fig. 2 Average flux over  $x$  as a function of  $y$

图 2 对  $x$  平均后的光强随  $y$  的变化

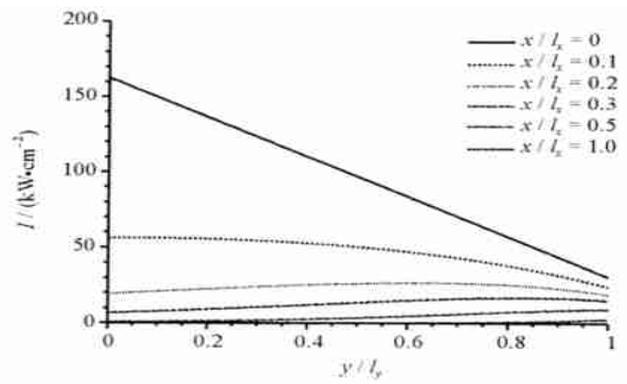


Fig. 3 Distribution of the flux in the  $y$ -direction with  $f(I_y)/f(0) = 0.25$

图 3  $f(I_y)/f(0) = 0.25$  的情况下不同  $x$  处的光强随  $y$  的变化

### 3 结 论

本文指出了氧碘化学激光中增益光导效应的存在。假设碘注入是不均匀的,采用预混模型、均匀增益饱和模型和 Fabry-Perot 腔模型,用 Hager 等人的方法<sup>[7]</sup>推导了碘不均匀分布情况下的  $O_2(^1)$  产额和激光束横向分布的解析表达式。结果表明光导效应对激光横向分布有重要影响,可导致其在碘注入方向的倾斜,以及输出功率的下降。所得到的光强变化特性有助于在实验上判断和观测光导效应的存在,以进一步采取改进碘注入等技术手段来控制 and 改善 COIL 光束的均匀性和光束质量。

### 参考文献:

[1] Scharlemann E T, Sessler A M, Wurtele T S. Optical guiding in a free-electron laser[J]. *Phys Rev Lett*, 1985, **54**:1925—1928.  
 [2] 束小建,王元璋,姜云卿,等.波导自由电子激光振荡器的三维数值模拟[J].*强激光与粒子束*, 1997, **9**(2):277—282. (Shu X J, Wang Y Z, Jiang Y Q, et al. 3D simulations of a waveguide free electron laser oscillator. *High Power Laser and Particle Beams*, 1997, **9**(2):277—282)  
 [3] 王泰春,王元璋,张治畴,等.FEL 振荡器实验中电子束非理想入射和反射镜倾斜引起的三维效应模拟[J].*强激光与粒子束*, 1995, **7**(2):171. (Wang T C, Wang Y Z, Zhang Z C, et al. Numerical simulation of 3-D effects caused by  $e^-$  beam deviation and oblique injection or mirror tilt in FEL oscillator experiment. *High Power Laser and Particle Beams*, 1995, **7**(2):171)  
 [4] 桑凤亭,陈方,杨柏龄,等.超音速氧碘化学激光实验研究[J].*强激光与粒子束*, 1996, **8**(2):274. (Sang F T, Chen F, Yang B L, et al. Experimental investigation on supersonic COIL. *High Power Laser and Particle Beams*, 1996, **8**(2):274)  
 [5] 多丽萍,闵祥德,孙以珠,等.转镜扫描测量超音速氧碘化学激光器二维增益分布[J].*强激光与粒子束*, 1999, **11**(4):385—388. (Duo L P, Min X D, Sun Y Z, et al. Study of 2D small-signal gain for a supersonic COIL by a scanning mirror. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999,

- 11(4):385—388)
- [6] 陈云山, 李守先, 刘广华, 等. COIL 运行参数对激光器性能的影响[J]. 强激光与粒子束, 1999, 11(3):267—271. (Chen Y S, Li S X, Liu G H, et al. The operation parameters influence on the COIL performance. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, 11(3):267—271)
- [7] Hager G D, Helms C A, Truesdell K A, et al. A simplified analytic model for gain saturation and power extraction in the flowing chemical oxygen iodine laser[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1996, 32:1525—1536.
- [8] Copeland D A, Bauer A H. Optical saturation and extraction from the chemical oxygen-iodine laser medium[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1993, 29(9):2525—2539.
- [9] 束小建. 碘离解和淬灭对氧碘化学激光气动特性影响的计算[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(2):105—109. (Shu X J. Calculations of the influences of iodine dissociation and quenching on COIL flow properties. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(2):105—109)

## Gain optical guiding effects in a chemical oxygen-iodine laser

SHU Xiao-jian

(*Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, P. O. Box 8009, Beijing 100088, China*)

**Abstract:** The gain optical guiding effects in a chemical oxygen-iodine laser (COIL) are found and studied for the first time. The non-uniform distribution of gain in one transverse direction is assumed to be caused by non-uniform injection of the secondary flow. Simple expressions are derived to predict the cavity singlet delta oxygen and intensity profile using the method of Hager et al. Our calculations show that the gain and optical guiding effects have an important influence on the transverse shape of the optical field. The laser beam has a trend to produce similar shape of the gain, which results in some effects such as the offset of the optical beam and the reduce of the output power. The optical guiding can be observed in experiment by measuring the transverse shape of the laser beam.

**Key words:** Chemical oxygen-iodine laser; Optical guiding effects; Non-uniform injection; Offset; Modeling