

# 连续输出氮分子激光器阈值温度的研究

**Abstract:** The operation condition and the threshold temperature for a CW molecular nitrogen laser are analysed and discussed.

## 一、引言

现有的氮分子激光器都是脉冲输出的,其输出稳定性较差,平均功率低。若能实现氮分子激光器连续输出,就有可能大大提高平均输出功率。

我们在论文[1]中,根据 L. Y. Nelson<sup>[2]</sup> 等人做实验时所观测的结果,在 200 Torr 总气压下, Ar (89%) + N<sub>2</sub> (10%) 的混合气体中,加入 1% 的 HF,观察到长达 5~20 μs 的 N<sub>2</sub> 第一和第二正带系统的激光辐射。输出脉冲宽度比激光上能级的辐射寿命长几倍到一千倍,有时还超过了下能级的寿命。从这里出发,我们从理论上推得了实现氮分子激光器连续输出的基本公式。

## 二、实验氮分子激光器连续输出的基本条件

氮分子激光器是三能级激光器,见图 1。其速率方程为<sup>[1]</sup>:

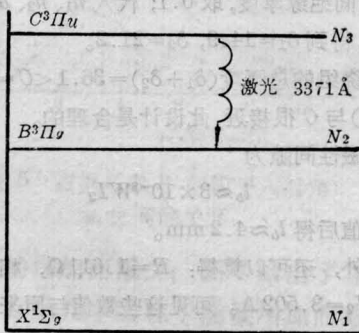


图 1

$$\begin{aligned} \frac{dN_3}{dt} &= X_{13}N_1 + X_{23}N_2 - (y_{31} + y_{32} + \tau_{31}^{-1} + \tau_{32}^{-1})N_3 \\ &\quad - R_{32} \left[ N_3 - \left( \frac{g_3}{g_2} \right) N_2 \right] \\ \frac{dN_2}{dt} &= X_{12}N_1 + (y_{32} + \tau_{32}^{-1})N_3 \\ &\quad + R_{32} \left[ N_3 - \left( \frac{g_3}{g_2} \right) N_2 \right] \\ &\quad - (X_{23} + y_{21} + \tau_{21}^{-1})N_2 \\ \frac{dN_1}{dt} &= -(X_{12} + X_{13})N_1 + (y_{21} + \tau_{21}^{-1})N_2 \\ &\quad + (y_{31} + \tau_{31}^{-1})N_3 \end{aligned} \quad (1)$$

其中  $X_{ij}$  是激发速率 ( $i < j$ ),  $y_{ji}$  是消激发速率,  $g_3$ 、 $g_2$  分别是  $C^3\Pi_u$  和  $B^3\Pi_g$  的统计权重,  $\tau_{ji}$  是自发光寿命,  $N_1$ 、 $N_2$ 、 $N_3$  是三个能级的粒子数密度。

考虑  $\tau_{31}^{-1}$ ,  $y_{31}$ ,  $y_{32} \ll \tau_{32}^{-1}$ ;  $y_{23} \ll y_{21}$ ,  $\tau_{21}^{-1}$ , 则可将速率方程简化为:

$$\frac{dN_3}{dt} = X_{13}N_1 + X_{23}N_2 - \tau_{32}^{-1}N_3$$

$$- R_{32} \left( N_3 - \frac{g_3}{g_2} N_2 \right)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = X_{12}N_1 + \tau_{32}^{-1}N_3 + R_{32} \left( N_3 - \frac{g_3}{g_2} N_2 \right)$$

$$- (X_{23} + y_{21} + \tau_{21}^{-1})N_2$$

$$\frac{dN_1}{dt} = -(X_{12} + X_{13})N_1 + (y_{21} + \tau_{21}^{-1})N_2 \quad (2)$$

当系统稳定时:

$$\frac{dN_i}{dt} = 0 \quad (i=1, 2, 3)$$

只考虑小信号情况,要求:

$$\begin{aligned} \Delta N = N_3 - \frac{g_3}{g_2} N_2 &= \left\{ \tau_{32} \left[ X_{23} + \frac{X_{13}(\tau_{21}^{-1} + y_{21})}{X_{13} + X_{12}} \right] \right. \\ &\quad \left. - \frac{g_3}{g_2} \right\} N_2 > 0 \end{aligned}$$

假设:  $X_{13} > X_{12}$ ,  $X_{23} \ll \tau_{21}^{-1} + y_{21}$ , 则由上式得

$$\tau_{32}(\tau_{21}^{-1} + y_{21}) - \frac{g_3}{g_2} \geq 0 \quad (3)$$

这就是实现连续输出的基本条件。

## 三、实现连续输出的阈值温度

我们知道,气体温度对氮分子激光器的输出有很大的影响。实验表明<sup>[3]</sup>,在固定气压和电压的情况下,观察到的激光脉冲半宽度随温度上升而增加。在激光持续过程中,由于碰撞弛豫对  $B^3\Pi_g$  亚稳态的影响较大,相应地延长了达到自终止效应的的时间。显然要达到连续输出激光,阈值温度是必须考虑的因素。

发射激光的两能级 ( $C^3\Pi_u$  和  $B^3\Pi_g$ ) 的粒子数密度和统计权重满足玻耳兹曼分布:

$$\frac{N_3}{N_2} = \frac{g_3}{g_2} e^{-h\nu_{23}/KT} \quad (4)$$

其中  $K$  是玻耳兹曼常数,  $T$  是气体的绝对温度,  $\nu_{23}$

是谱线的吸收频率。此式也即为:

$$\frac{g_3}{g_2} = \frac{N_3}{N_2} e^{h\nu_{23}/KT} \quad (5)$$

代入(1)式得

$$\tau_{32}(\tau_{21}^{-1} + y_{21}) - \frac{N_3}{N_2} e^{h\nu_{23}/KT} \geq 0 \quad (6)$$

改写成:

$$T \geq \frac{h\nu_{23}}{K} \left\{ \ln \left[ \frac{N_3}{N_2} \tau_{32}(\tau_{21}^{-1} + y_{21}) \right] \right\}^{-1} \quad (7)$$

这是阈值温度与粒子数密度所满足的关系。

经过(3)式的分析,要实现连续输出,其主要设想是使得上能级( $C^3\Pi_u$ )的寿命得到有效延长,尽量使 $\tau_{32}$ 与 $\tau_{21}$ 达到同一数量级。而在氮气中加入适量的其它气体(如HF、SF<sub>6</sub>等)就可以实现。根据我们的研究<sup>[1]</sup>,一般可以实现: $\tau_{21} \sim 10^{-7}$ s,  $\tau_{32} \sim 10^{-7}$ s,  $y_{21} \sim 10^{13}$ /s。将各数值代入(7)式得:

$T \approx 1000$  K

以上的温度是在饱和近似的条件下得到的,而实际所需最低温度可能比这低。

总的说来,氮分子激光器能否连续输出,温度是有很大的影响的。而且在某些时候还会起着决定性的作用。所以实现连续输出,除了其它条件以外,温度一定要达到阈值。

### 参 考 文 献

- [1] 陈五高;《中国激光》,1984,11, No. 1, 7.
- [2] L. Y. Nelson; *Appl. Phys. Lett.*, 1973, 22, No. 2, 79.
- [3] K. Bergstedt et al.; *Zeitschrift für Physik*, 1974, 269, No. 3, 195.

(华中师范学院物理系 陈五高 李庆园

1984年8月24日收稿)

## 科学札记

# 连续波调频 $C^{18}O_2$ 激光器

**Abstract:** A sealed-off tunable CW  $C^{18}O_2$  laser is reported. 105 laser lines were obtained and the strongest line output was 41.3 W.

### 一、引言

近年来,激光化学、激光分离同位素、激光光泵、激光光谱学和激光测污等领域有了很大的发展,迫切要求激光器扩展调频范围并提高单谱线的输出功率。 $CO_2$ 有多种同位素丰富的谱线,有希望制成宽范围调频 $CO_2$ 激光器。

### 二、同位素 $CO_2$ 的光谱特点

$CO_2$ 分子是线性三原子分子,它的激光上能级是001,下能级是100和020。 $C^{16}O_2$ 和 $C^{18}O_2$ 的有

关能级和相应的跃迁示于图1。

从图1可以看出, $C^{18}O_2$ 的020能级上升了,而100能级下降了,且降到020能级的下面。 $C^{16}O_2$ 和 $C^{18}O_2$ 的激光上能级与 $N_2(V=1)$ 能级差分别为 $+18\text{ cm}^{-1}$ 和 $-17\text{ cm}^{-1}$ ,即 $C^{18}O_2$ 的激光上能级更靠近 $N_2$ 的 $V=1$ 能级,能量共振转移更加有效。 $C^{18}O_2$ 9 $\mu\text{m}$ 带P(20)线的小讯号增益 $\alpha$ 为0.73%  $\text{cm}^{-1}$ ,饱和参量 $I_s$ 为39  $\text{cm}^{-2}$ ,10 $\mu\text{m}$ 带该线的小讯号增益 $\alpha$ 为0.30%  $\text{cm}^{-1}$ ,饱和参量 $I_s$ 为30  $\text{cm}^{-2}$ 。<sup>[1]</sup> $C^{18}O_2$ 9 $\mu\text{m}$ 带P(20)的小讯号增益只低于 $C^{16}O_2$ ,但在已知的几种有激光输出的同位素 $CO_2$ ( $^{18}C^{16}O_2$ 、 $^{13}C^{18}O_2$ 、 $^{14}C^{16}O_2$ 等)中是比较大的。

调频 $C^{18}O_2$ 激光器波长范围是8.9~10.9 $\mu\text{m}$ ,它的绝大部分谱线落在调频 $C^{16}O_2$ 激光器的间隙处,而且还向短波方向移动了0.2 $\mu\text{m}$ 。特别有意义的是它的增益最高的9P带的几条较强谱线(例如波长为9.355 $\mu\text{m}$ 的9P(20)线),恰是普通调频 $C^{16}O_2$

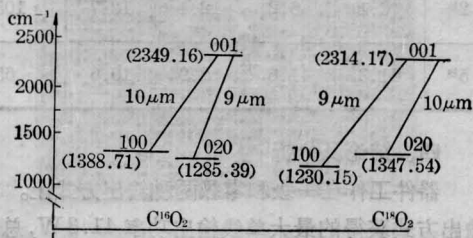


图1  $C^{16}O_2$ 、 $C^{18}O_2$ 有关能级及相应的跃迁