

# 连续输出氮分子激光器的初步研究

陈五高

(华中师范学院物理系)

**提要:** 本文对实现连续输出氮分子激光器的可能性进行了初步研究和讨论。

## Preliminary investigation of CW molecular nitrogen laser

Chen Wugao

(Department of Physics, Huazhong Normal University)

**Abstract:** The feasibility for a CW molecular nitrogen laser has been investigated preliminarily.

现在的氮分子激光器都是脉冲输出的,若能研究出像二氧化碳激光器或 YAG 激光器那样,既能脉冲输出,又能连续输出的氮分子激光器,那么它将为氮分子激光器的应用开辟出一个崭新的天地。

本文基于上述物理思想,对实现连续输出氮分子激光器的可能性进行了分析,提出了实现连续输出氮分子激光器的三个必要条件。

### 脉冲氮分子激光器的理论

可以把氮分子激光器看作三能级系统激光器,它的三个能级是:  $X' \Sigma_g^+$  (基态能级)、 $B^3 \Pi_g$  (激光下能级) 和  $C^3 \Pi_u$  (激光上能级),如图 1 所示。

设  $w_{ij}$  表示从能级  $i$  跃迁到能级  $j$  ( $i < j$ ) 的激发速率,用  $y_{ji}$  表示从能级  $j$  跃迁到能

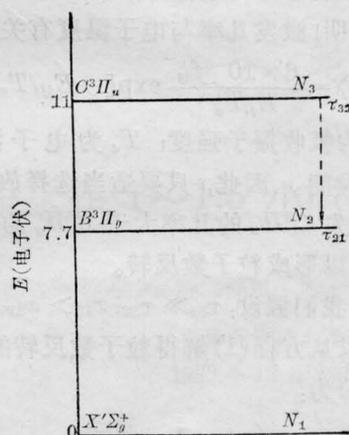


图 1 氮分子能级简图

级  $i$  的消激发速率。用  $R_{ji}$  表示受激发速率 (它包括线宽、爱因斯坦系数  $B$  和能量密度)。于是我们可以得到下述速率方程组<sup>[1]</sup>:

收稿日期: 1982年10月27日。

## 连续输出氮分子激光器的设想

从式(3)中我们不难看出, 只有当  $y_{32} \ll \tau_{32}^{-1}$  的情况下, 粒子数反转的时间才能等于  $C^3\Pi_u$  能级的辐射寿命。但是这种情况只有在氮分子密度远远小于  $6 \times 10^{14}$ /厘米<sup>3</sup> 时才能成立。因此, 单靠  $y_{32} \ll \tau_{32}^{-1}$  这一条还不能形成连续输出氮分子激光。为了实现连续输出氮分子激光器, 还必须具备:

### 1. 掺入适量的气体

在氮气中, 加入适当的猝灭气体, 有利于加快激光下能级的弛豫速率和猝灭作用, 同时也增加了激光上能级的激发速率。根据能量共振转移的理论, 在氮气中加入适当的其它气体, 可以使激光上能级的寿命得到有效的延长。

国外有人在 200 托总气压下, 在 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 微秒的 N<sub>2</sub> 的第一和第二正带系统的激光辐射。这种氮分子激光器中的输出脉冲宽度比激光上能级的辐射寿命大几倍到一千倍, 有时还超过了下能级的寿命。

另外有人在腔长为 3.2 米、气压为 50 托的 N<sub>2</sub> 分子中加入 SF<sub>6</sub>, 很快达到第一正带的振荡阈值。继续增加 SF<sub>6</sub>, 第一正带振荡停止, 出现第二正带的振荡。而且激光脉冲上升时间和持续时间分别为 60 毫微秒和 75 毫微秒, 它们都已经大于激光上能级寿命。这说明 SF<sub>6</sub> 对激光下能级  $B^3\Pi_g$  有加快弛豫的作用。由于第一正带是属于  $B^3\Pi_g \rightarrow A^3\Sigma_g^+$  的跃迁, 随着 SF<sub>6</sub> 增加该系振荡停止。这表明  $B^3\Pi_g$  能级的弛豫速率加快, 反转机构遭破坏。

还有实验说明, 在 N<sub>2</sub>、SF<sub>6</sub> 混合气体中, 可获得长达 400 毫微秒的高效率激光输出, SF<sub>6</sub> 使得  $E/P$  值发生变化。当 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 从 0 增大到 0.6 时,  $E/P$  值由原来的 70 伏/厘米·托, 增大到 140 伏/厘米·托, 这使电子

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

式中  $g_3$  和  $g_2$  分别为激光上能级  $C^3\Pi_u$  和激光下能级  $B^3\Pi_g$  的统计权重。

放电时由于电子碰撞, 把基态  $X^1\Sigma_g^+$  的分子激发到激光上能级  $C^3\Pi_u$  或激光下能级  $B^3\Pi_g$  上去。由于激光上能级  $C^3\Pi_u$  的辐射寿命非常短, 大约只有 40 毫微秒, 而激光下能级  $B^3\Pi_g$  的辐射寿命却比  $C^3\Pi_u$  的长得多, 达 10 微秒左右。因此, 氮分子激光三能级系统与一般激光三能级系统具有相反的特点: 上能级的寿命比下能级的寿命短 2~3 个数量级, 这对形成粒子数反转是不利的。但理论计算表明, 激发几率与电子温度有关<sup>[2]</sup>, 且

$$\langle \sigma_{ij} U \rangle = \frac{6 \times 10^{-6} f_{ij}}{E_{ji} T_e^{1/2}} \exp[-E_{ij}/T_e] \quad (2)$$

式中  $f_{ij}$  为吸收振子强度;  $T_e$  为电子温度;  $E_{ji}$  为激发能。因此, 只要适当选择放电条件, 使激发  $C^3\Pi_u$  的几率大于  $B^3\Pi_g$  的几率, 那么就可以形成粒子数反转。

另外我们假设:  $\tau_{31} \gg \tau_{32}$ ;  $x_{13} > x_{12}$ ;  $\tau_{21} \gg \tau_{32}$  则可以从方程(1)解得粒子数反转的条件 ( $N_3 > N_2$ ) 为:

$$t < \frac{1}{y_{32} + \tau_{32}^{-1}} \quad (3)$$

式中  $t$  为电激发脉冲宽度。

在一般情况下, 特别是氮分子密度比  $6 \times 10^{14}$ /厘米<sup>3</sup> 大时,  $y_{32}$  比  $\tau_{32}^{-1}$  大, 这时要获得激光, 就必须在小于 40 毫微秒的时间内激发氮分子, 在这种情况下要实现连续输出是困难的。

温度得到提高, 因而有利于增加能级  $C^3\Pi_u$  的激发速率。

$SF_6$  对  $B^3\Pi_g$  态的猝灭特别有效。  $SF_6$  对  $B^3\Pi_g$  态的弛豫速率常数  $K \approx 1 \sim 3 \times 10^{-11}$  厘米<sup>3</sup>/秒, 它比  $N_2$  分子本身的碰撞所引起的弛豫速率(约  $7 \times 10^{-12}$  厘米<sup>3</sup>/秒) 大了一个数量级。

另外掺入  $SF_6$  也使放电时间也得到了改善。总气压为 80 托,  $N_2/SF_6 = 1.0$  时, 能量注入时间扩大到 500 毫微秒, 这样可得到脉宽为 70 毫微秒的激光输出。

进一步分析激发  $N_2$  分子的动力学过程表明,  $SF_6$  不但对  $B^3\Pi_g$  有加快弛豫的作用, 而且对氮离子的复合过程也是有利的。  $N_2^+ + SF_6^- \rightarrow N_2(C) + SF_6$  过程具有新的泵浦机制。在激发  $N_2$  的过程中部分  $N_2$  分子被电离, 部分  $N_2$  分子处于亚稳态, 这就使得基态粒子数减少, 从而产生了自终止效应。在  $N_2$  分子中掺入少量的 F, 激发功率可提高 30%。这主要是通过复合激发  $F^- + N_2^+ \rightarrow F + N_2(C)$  过程, 而提高了输出功率。

从上讨论不难看出, 在  $N_2$  分子中掺入 Ar、 $SF_6$  或 HF 等, 可以延长激光上能级的寿命和加快激光下能级的弛豫速率。在这个定性认识的基础上, 我们仍从速率方程出发来作些定量的讨论。

因为  $\tau_{31}^{-1}, y_{31}, y_{32} \ll \tau_{32}^{-1}; y_{23} \ll y_{21}, \tau_{21}^{-1}$ , 所以简化式(1)可得:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dN_3}{dt} &= x_{13}N_1 + x_{23}N_2 - \tau_{32}^{-1}N_3 \\ &\quad - R_{32}(N_3 - \frac{g_3}{g_2}N_2) \\ \frac{dN_2}{dt} &= x_{12}N_1 + \tau_{32}^{-1}N_3 + R_{32}(N_3 - \frac{g_3}{g_2}N_2) \\ &\quad - (x_{23} + y_{21} + \tau_{21}^{-1})N_2 \\ \frac{dN_1}{dt} &= - (x_{12} + x_{13})N_1 + (y_{21} + \tau_{21}^{-1})N_2 \end{aligned} \right\} (6)$$

假设系统处于稳态工作方式, 则有:

$$\frac{dN_i}{dt} = 0 \quad (i=1, 2, 3) \quad (7)$$

于是小信号时的粒子数反转方程为:

$$\left. \begin{aligned} x_{13}N_1 + x_{23}N_2 - \tau_{32}^{-1}N_3 &= 0 \\ x_{12}N_1 + \tau_{32}^{-1}N_3 - (x_{23} + y_{21} + \tau_{21}^{-1})N_2 &= 0 \\ (x_{12} + x_{13})N_1 - (y_{21} + \tau_{21}^{-1})N_2 &= 0 \end{aligned} \right\} (8)$$

从上式可解得:

$$N_1 = \frac{\tau_{21}^{-1} + y_{21}}{x_{12} + x_{13}} \cdot N_2$$

$$N_3 = \tau_{32} \left[ x_{23} + \frac{x_{13}(\tau_{21}^{-1} + y_{21})}{x_{13} + x_{12}} \right] N_2$$

由此则得小信号反转粒子数为:

$$\begin{aligned} \Delta N^0 &= N_3 - \left( \frac{g_3}{g_2} \right) N_2 \\ &= \left\{ \tau_{32} \left[ x_{23} + \frac{x_{13}(\tau_{21}^{-1} + y_{21})}{x_{13} + x_{12}} \right] - \frac{g_3}{g_2} \right\} N_2 \end{aligned} \quad (9)$$

同样可求得大信号时的反转粒子数为:

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

$$\text{即} \quad \Delta N = \frac{\Delta N^0}{1 + R_{32}\tau_{32}} \quad (10)$$

现在来讨论小信号时的反转粒子数(9)式。若要使(9)式有意义, 必有  $\Delta N^0 \geq 0$ , 即

$$\tau_{32} \left[ x_{23} + \frac{x_{13}(\tau_{21}^{-1} + y_{21})}{x_{13} + x_{12}} \right] - \frac{g_3}{g_2} \geq 0$$

由于  $x_{13} > x_{12}$  (因而  $\frac{x_{13}}{x_{12} + x_{13}} \approx 1$ );  $x_{23} \ll \tau_{21}^{-1} + y_{21}$  从上式可得:

$$\tau_{32}[\tau_{21}^{-1} + y_{21}] - \frac{g_3}{g_2} \geq 0 \quad (11)$$

这就是实现连续输出的基本条件。

对于脉冲氮分子激光器, 因为  $\tau_{21} \sim 10^{-6}$  秒,  $\tau_{32} \sim 10^{-9}$  秒,  $y_{21}$  可以忽略, (11)式不能成立, 不满足上述基本条件, 故不能实现连续输出。

对式(11)作进一步的分析可知,  $\tau_{32}$  与  $\tau_{21}$  应具有相同的数量级 ( $\tau_{21}$  和  $\tau_{32}$  为有效寿命)。若选取适当匹配的气体(不但气体的种类合适, 而且互相间的比例恰当), 使  $\tau_{32} \sim 10^{-7}$  秒,  $\tau_{21} \sim 10^{-7}$  秒是不难做到的。如果在  $N_2 + Ar$  的混合气体中加入  $SF_6$ , 可能比 HF

更为有效。所以要实现连续输出氮分子激光器, Ar 和 SF<sub>6</sub> 作为选取对象是很有希望的。

## 2. 合理的结构

前面已指出 N<sub>2</sub>+Ar 的能量共振转移常数 K<sub>1</sub> 为 3×10<sup>-11</sup>厘米<sup>3</sup>/秒; N<sub>2</sub>+SF<sub>6</sub> 的弛豫速率常数 K<sub>2</sub> 是 1~3×10<sup>-11</sup> 厘米<sup>3</sup>/秒。若要系统满足基本条件(11), 且 τ<sub>32</sub>~10<sup>-7</sup> 秒和 τ<sub>21</sub>~10<sup>-7</sup> 秒。那么根据粒子数密度公式<sup>[3]</sup>:

$$N \left[ \frac{\text{分子数}}{\text{米}^3} \right] = 9.65 \times 10^{24} \frac{P [\text{托}]}{T [K]} \quad (12)$$

式中 P 为气体的分压强; T 为气体温度, 估计在室温下, N<sub>2</sub> 和 SF<sub>6</sub> 的分压分别约为 20 托左右。

器件结构要合理。为此, 首先就要研究它的纵向结构, 其目的在于弄清氮分子纵向放电的机理, 然后才能选择激励的手段。

同 He-Ne 和 CO<sub>2</sub> 激光器一样, 低功率连续输出氮分子激光器, 可能要采用封闭式、低气压放电激励的氮分子激光管。激光管的两端要装上谐振腔(在石英介质基片表面镀上铝膜), 因为铝对波长为 3150~3800 Å 的垂直入射光的反射率为 92.4~92.5%, 所以采用镀铝反射系统作谐振腔是合适的。唯有装上适当的谐振腔, 才能使增益达到饱和, 并在氮分子激光管内形成一个稳定状态, 以利于实现连续输出。

考虑到温度对输出功率的影响和电离复合过程, 采用横向流动结构可能更为有利。CO<sub>2</sub> 激光器采用这种结构, 其输出功率与气流速度 u 成正比<sup>[4]</sup>:

$$P = \frac{h\nu \nabla u}{W} \bar{g} \left( \frac{t}{a+t} \right) \int_0^W \bar{I}' u x \quad (13)$$

式中 a 为腔内总损耗, t 为平均透过率, W 是腔宽, ∇ 是腔区体积, u 是气流速度,  $\bar{g}$  等于  $\frac{1}{e} \int_0^\infty g I' dx$  (l 为腔长), g 为激光增益系数, 基值  $g = -\frac{1}{I'^-} \frac{2I'^-}{2x} = \frac{1}{I'^+} \frac{2I'^+}{2x}$ , 而  $I' = I'^+ + I'^-$  为腔内光强。

用同样的模型可以计算 N<sub>2</sub> 分子激光器

的输出功率。考虑到光束匹配问题, 采用非稳腔可以更有效地利用激活介质。

若实现连续输出基本条件(11)不能得到满足而要实现连续输出, 那么对激光的持续时间就有一个最低的要求:  $\tau \geq t = \frac{L}{u}$ , 式中 L 为激光器腔长, u 为气体流速。

## 3. 合适的温度

为实现氮分子激光器连续输出, 除了合理的结构外, 还要有合适的温度, 国外有人在气压和电压不变的情况下, 观察到脉宽随温度的上升而增加。这表明随着温度的升高, 激光上能级的有效寿命得到延长。

气体温度对氮分子激光器的影响机理是比较复杂的, 其增益系数 K<sub>m</sub> 与温度的关系为<sup>[5]</sup>:

$$K_m = f(T_t, T_v, N_m) \quad (14)$$

式中 T<sub>t</sub> 为平均温度, T<sub>v</sub> 为振动温度, N<sub>m</sub> 为基态粒子数密度。

从(5)式我们知道, 温度上升, τ<sub>i</sub><sup>-1</sup> 随之增大, 即加快了碰撞弛豫。在激光持续过程中, 由于碰撞弛豫的加速对 B<sup>3</sup>Π<sub>g</sub> 亚稳态的影响较大, 相应地延长了达到自终止效应的时间, 因而脉冲宽度增宽。

但从(14)式中我们知道温度上升, K<sub>m</sub> 下降, 因而输出功率下降, 故要装上合适的谐振腔。

综上所述, 选择合适的匹配气体, 合理的结构和阈值温度。实现氮分子激光器的连续输出是可能的。

杨约翰教授为本文做了精练工作, 在此表示感谢!

## 参 考 文 献

- [1] 宋占国, 陈五高;《激光》, 1976, 3, No. 1, 44.
- [2] A. W. Ali; *Appl. Opt.*, 1967, 6, No. 12, 2115~2119.
- [3] 周炳琨等;《激光原理》, 国防工业出版社, 1980.
- [4] 赫光生, 雷仕湛;《激光器件设计基础》, 上海科技出版社, 1979年