

# 弱激发氩离子激光的振荡频率特性

吕可诚

(南开大学物理系, 300071)

**提要:** 通过改变激光器的相对激发, 观察到了氩离子激光器振荡频率的演变特性。用模竞争效应对实验现象进行了理论解释。

**关键词:** 振荡频率, 模竞争, 相对激发

## Property of oscillation frequency of argon-ion lasers under weak excitation

Lü Kecheng

(Physics Department, Nankai University, Tianjin)

**Abstract:** By adjusting relative excitation of lasers, we observed the evolution of oscillation frequency of argon-ion lasers. According to effect of mode competition, the experimental phenomena are explained.

**Key words:** oscillation frequency, mode competition, relative excitation

### 一、实验观察

实验装置如图1所示。实验中选用了基横模、外腔不加任何调制元件的氩离子激光器, 腔长为0.75 m和1.5 m两种类型。激光经球面扫描干涉仪(Model 450型)输入到干涉仪的电子显示系统(JPM-1型)上观察振荡频率特性, 另一束光经光电接收器输入到频谱分析仪(TF2370型)中测量纵模差拍。

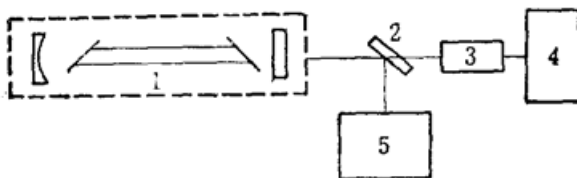


Fig. 1 Simplified diagram of the experimental setup

1—argon-ion laser; 2—splitter; 3—scanning interferometer; 4—electronic display; 5—spectrum analyser

首先使激光器运转在较佳状态(腔镜校准、放电电流调至最佳值附近), 这时激光为多纵模振荡, 如图2所示。各纵模强度的轮廓为非均匀展宽线型(高斯型), 相邻纵模的频率间隔为 $\delta\nu = c/2nL$  ( $L$ 为激光器的腔长,  $n$ 为介质折射率,  $c$ 为光速),  $\delta\nu$ 的计算值与频谱分析仪的测量值相符。然后, 将腔镜逐渐调偏(相当于增加谐振腔的损耗), 激光器的振荡纵模个数逐渐减少, 出现较稳定的

激光器的腔长,  $n$ 为介质折射率,  $c$ 为光速),  $\delta\nu$ 的计算值与频谱分析仪的测量值相符。然后, 将腔镜逐渐调偏(相当于增加谐振腔的损耗), 激光器的振荡纵模个数逐渐减少, 出现较稳定的

11, 7, 5, 3, 2, 1 个纵模振荡, 如图 3 所示。可以看到, 模强度参差不齐, 不再与增益线型轮廓相符合。用拍摄的照片与图 2 的多纵模进行测量比较, 证明相邻纵模的频率间隔不一定是  $\delta\nu$ , 而是  $\delta\nu$  的整数倍, 显然, 这是某些纵模被压制而熄灭的结果。如果将腔镜从坏腔状态逐渐调正, 则振荡纵模的个数逐渐增加, 可以重复以上的实验结果。

若出现双纵模振荡时, 激光输出将是高频调制光, 其调制频率为两个纵模的频率间隔, 这与先前一些作者们的报道类似。

实验中, 若固定腔镜于好腔位置, 改变激光器的激励电流(等效于改变增益), 可获得同样的实验结果。

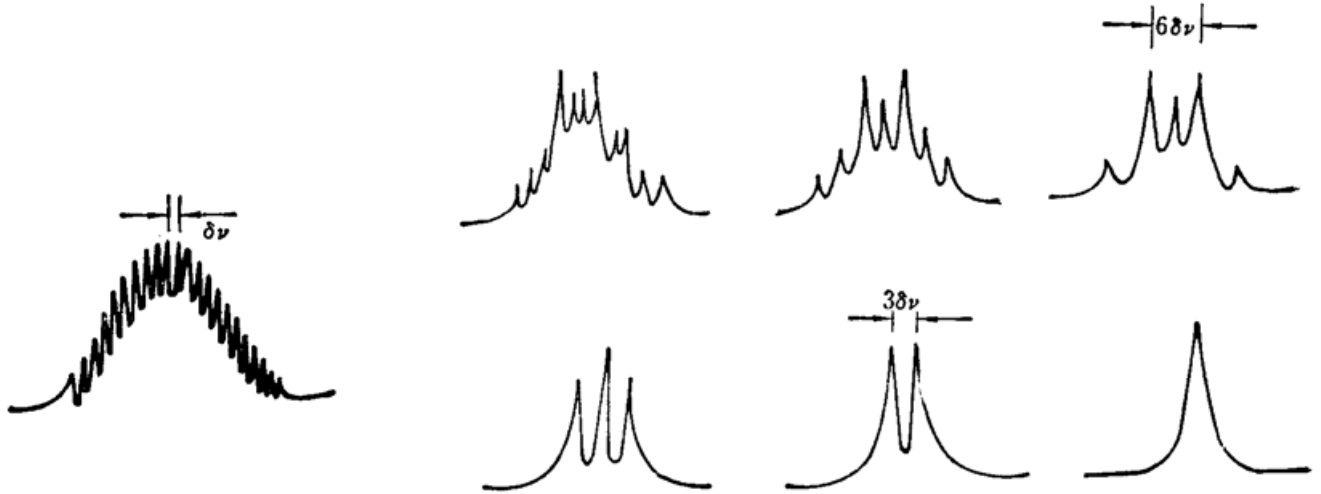


Fig. 2 Multi-longitudinal modes

Fig. 3 Evolution of the oscillation frequency

## 二、理论分析

许多研究已经证明, 在非均匀展宽为主的激光器中, 通常是多纵模振荡的。纵模的共存模个数为

$$N = \Delta\nu_T / \delta\nu \quad (1)$$

式中  $\Delta\nu_T$  为激光阈值对应的非均匀展宽增益宽度,  $\delta\nu$  为相邻纵模的频率间隔。

$$\delta\nu = c / 2nL \quad (2)$$

文献[1]的研究指出, 当激光介质的均匀展宽宽度  $\Delta\nu_h$  与  $\delta\nu$  相当时, 各振荡模之间出现竞争效应, 理论计算证明,  $\Delta\nu_h \geq 2\delta\nu$  时, 这种竞争效应十分剧烈, 其结果使得某些振荡模的强度减小, 呈参差不齐状态, 不再与增益轮廓相符, 甚至有些模被抑制, 使激光器实际振荡的纵模个数远小于由式(1)决定的  $N$ 。氩离子激光器的  $\Delta\nu_h$  约为 500 MHz, 对实验中选用的激光器,  $\delta\nu$  为 100 MHz 和 200 MHz,  $\Delta\nu_h \geq 2\delta\nu$ , 因此实验选用的氩离子激光器的模竞争效应是很强烈的。在相对激发较强的情况下, 激光上能级所积累的粒子数可供较多模使用, 因此尽管振荡模之间强烈竞争, 但各模尚能共存, 竞争效应只导致输出功率的较大起伏。但是在相对激发较弱的情况下, 激光上能级的粒子数积累较少, 由于模竞争效应使某些纵模被迫降至阈值之下, 能起振的纵模个数大大减少。实际中观察到的激光振荡频率的变化正是这种模竞争的结果。

激光的模竞争效应宜用 Lamb 理论加以阐述, 但是由于各模相对相位角的存在, 使理论描述相当复杂。若以常用的三阶非线性理论为基础, 在某些简化条件下, 可以推导出稳态情况下

由于模竞争效应导致实际激光器的纵模个数所满足的方程为<sup>[2]</sup>

$$\frac{PN}{1-P} \left[ \frac{\gamma_{\pm}}{G_{\pm}} - \frac{1}{N} \sum_N \frac{\gamma_j}{G_j} \right] = 1 - \frac{\gamma_{\pm}}{G_{\pm}} \quad (3)$$

式中  $P$  为交叉饱和系数与自饱和系数的比值, 它与激光器的类型有关。对于我们实验中的驻波型激光器,  $P$  值一般为  $2/3$ 。  $G_j$  和  $\gamma_j$  为第  $j$  个纵模的增益和损耗,  $G_{\pm}$  和  $\gamma_{\pm}$  表示相对于中心模左右两侧强度为零的纵模所对应的增益和损耗。

对于以非均匀展宽为主的激光器, 在不加任何调制元件的自由运转情况下, 有

$$\gamma_j = \gamma_0 \quad (4)$$

$$G_j = G_0 \exp \left[ -4 \ln 2 \left( j \frac{\delta\nu}{\Delta\nu_i} \right)^2 \right] \quad (5)$$

$$j = (\nu - \nu_0) / \delta\nu \quad (6)$$

$$j = -\frac{N-1}{2}, \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots, \frac{N-1}{2},$$

$\nu_0$  为增益线型中心频率,  $\gamma_0$ 、 $G_0$  为与频率无关的数。利用式(4)~(6), 则式(3)可写为

$$\frac{PN}{1-P} \left\{ \frac{\gamma_0}{G_{\pm}} - \frac{\gamma_0}{NG_0} \sum_j \exp \left[ -4 \ln 2 \left( j \frac{\delta\nu}{\Delta\nu_i} \right)^2 \right] \right\} = 1 - \frac{\gamma_0}{G_{\pm}} \quad (7)$$

因为中心模两侧模强度为零的起始频率为

$$\nu_{\pm} = \nu_0 \pm \left( \frac{N-1}{2} + 1 \right) \delta\nu$$

由式(5)可得

$$G_{\pm} = G_0 \exp \left[ -4 \ln 2 \left( \frac{N+1}{2} \frac{\delta\nu}{\Delta\nu_i} \right)^2 \right] \quad (8)$$

将式(8)代入式(7), 可得

$$\begin{aligned} & \left( \frac{PN}{1-P} + 1 \right) \exp \left[ \ln 2 (N+1)^2 \left( \frac{\delta\nu}{\Delta\nu_i} \right)^2 \right] \\ & - \frac{P}{1-P} \sum_j \exp \left[ -4 \ln 2 \left( j \frac{\delta\nu}{\Delta\nu_i} \right)^2 \right] = \frac{G_0}{\gamma_0} \end{aligned} \quad (9)$$

对于一实际的激光器,  $P$ ,  $\Delta\nu_i$ ,  $\delta\nu$  是确定的,  $G_0/\gamma_0$  表示激光器某一特定运转状态下增益和损耗的比值, 即相对激发, 因此, 式(9)表示一实际激光器的相对激发和纵模个数之间的关系。实验中, 可以通过调节相对激发量  $G_0/\gamma_0$  来改变振荡纵模的个数。

分析测量我们的实验结果得到  $\Delta\nu_i$  约为 5000 MHz, 若取  $\delta\nu$  为 100 MHz (与 1.5 m 腔长的激光器对应) 和 200 MHz (与腔长为 0.75 m 的激光器对应),  $P$  取  $2/3$ , 利用式(9)计算得到的  $N \sim G_0/\gamma_0$  对应关系列于表 1 中。

Table 1

$N$	1	3	5	7	9	11
$(\delta\nu=100 \text{ M}) G_0/\gamma_0$	1.003	1.04	1.13	1.35	1.67	2.18
$(\delta\nu=200 \text{ M}) G_0/\gamma_0$	1.013	1.14	1.53	2.24	3.73	5.88

### 三、讨 论

1. 从模竞争效应考虑, 总是增益较强的模压制增益较弱的模。因此一般总是中心频率  $\nu_0$  附近的模取胜而优先振荡。公式推导中, 假定了振荡模的分布以  $\nu_0$  为对称, 即  $\nu = \nu_0$  时  $j = 0$ ,  $\nu > \nu_0$  时  $j$  为正值,  $\nu < \nu_0$  时  $j$  为负值。令人感兴趣的是, 实验中, 除了稳定的双纵模振荡外, 均为奇数模振荡, 因此理论假定和实验情况相符合。

2. 由表 1 可以看到, 激光器的相对激发越强, 振荡纵模的个数就越多。实验中改变腔的损耗  $\gamma_0$ , 或改变增益  $G_0$ , 都可以改变相对激发量  $G_0/\gamma_0$ 。随着  $G_0/\gamma_0$  的增加, 将有更多的模具有正的增益, 振荡纵模的个数必然增加。理论计算结果与实验规律相符, 尤其是  $G_0/\gamma_0 < 1.50$  的弱激发情况下, 理论和实验符合得很好。

3. 实验难以测量  $G_0/\gamma_0$  的数值, 但是实验中出现从单纵模到 11 个纵模所需改变的相对激发量是不大的。有时固定反射镜于某一位置, 或固定某一放电电流值(即  $G_0/\gamma_0$  无宏观变化)振荡模的个数也会有变化。实验中曾见到过从 3 个纵模改变至 5 个纵模, 从 7 个纵模变化到 9 个纵模, 这是因为激光器运转过程中相对激发量起伏造成的。从表 1 可以看到,  $N$  从 3 变到 5, 则  $G_0/\gamma_0$  的变化量为 0.1~0.4, 这样数量的起伏尚且可能。但是  $N$  从 7 变至 9,  $G_0/\gamma_0$  的改变量则为 1~2, 这样大的相对激发的漂移量与实际激光器的运转情况不符。这是因为公式的推导基于三阶非线性理论, 所以公式只适用于相对激发  $G_0/\gamma_0$  较小的情况, 而对相对激发较强的情况只有定性参考价值。

实验中董孝义教授和林美荣副教授给予了热情帮助, 在此表示感谢。

### 参 考 文 献

- 1 W. Bruner *et al.*, *Opt. and Quant. Electr.*; **15**(1), 87(1983)
- 2 潘少华, *光学学报*, **7**(1), 22(1987)