

模竞争和交叉弛豫对双频 激光器输出特性的影响

巴恩旭 刘玉照

(南开大学)

提 要

双频激光器的稳频特性与其功率调谐曲线的形状有关。本文在理论和实验上研究了模竞争和交叉弛豫对功率调谐曲线的影响,并给出如何选择最佳的磁场和气压,以便获得最好的稳频特性。

Effects of mode competition and cross relaxation on the output characteristics of the two-frequency He-Ne laser

Ba Enxu Liu Yuzhao

(Nankai University)

Abstract

The frequency stabilizing property of two-frequency He-Ne laser depends upon the shape of the power tuning curve. The effects of mode competition and cross relaxation on the power tuning curve have been investigated both theoretically and experimentally. Moreover, in order to obtain the best frequency stabilizing property, the conditions for choosing optimum values of magnetic field and gas pressure are given.

激光器的功率调谐曲线与稳频性能密切相关。对双频激光器、模竞争和交叉弛豫显著地影响其功率调谐曲线的线形。本文从实验上和理论上观测和分析了这些影响。进而给出如何选择磁场和气压以期提高 He-Ne 双频激光器的稳频特性。

一、实验观测

为了观测功率调谐曲线,我们在实验中,使光束先通过 $\lambda/4$ 波片,然后在两个相互垂

收稿日期:1979年7月5日。

直的方向检偏，用双线示波器同时观测不同偏振状态的调谐曲线。在磁场小于 300 高斯时，一般可观察到双频激光器的功率调谐曲线，如图 1 所示。



交叉点 ν_0
(a) 右旋光 (b) 左旋光

图 1 双频激光器功率调谐曲线

曲线的明显特点是：(1) 出现非对称的“主峰”和“次峰”；(2) 两曲线交叉处出现小的凹陷。判定两条曲线所属偏振光的偏振状态(左旋或右旋)以确定主、次峰相对于中心频率 ν_0 的位置是必须的。我们是这样判定的：

先确定 $\lambda/4$ 波片的快、慢轴。然后面对激光束传播方向，则对其快轴左旋 45° 检偏，可检出右旋光；右旋 45° 检偏，则检出左旋光。见图 2。

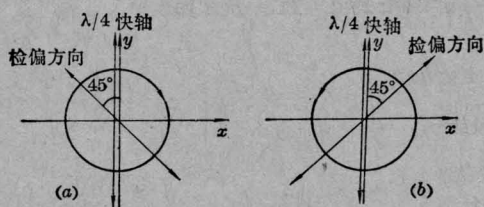


图 2 判定激光偏振状态的示意图

(a) 检出右旋光；(b) 检出左旋光

我们在 0~350 高斯之间改变磁场，观测不同磁场下的功率调谐曲线。实验观测表明：图 1 中所示的功率调谐曲线的主峰与次峰的大小以及交叉点 ν_0 附近曲线的斜率随磁场而变化(当激光器腔长不变时)，这是模竞争和能量的交叉弛豫过程造成的。下面将对几种典型情况进行分析，并给出合理选择磁场的依据。

二、理论分析

1. 模竞争的作用

双频激光器的增益曲线由于塞曼效应而分裂为两种圆偏振(左旋和右旋)光。在一般使用条件下(磁场约为 200 高斯左右)，会出现不同偏振的两个纵模 ν_R 和 ν_L (见图 3)，这很容易通过扫描干涉仪观测到。

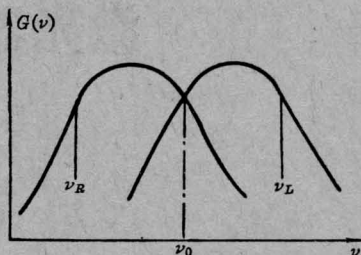


图 3 双纵模运转

根据兰姆的多模激光理论^[1]， ν_R 、 ν_L 之间发生竞争。为分析模竞争，我们引用兰姆的双纵模振幅表达式

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= \beta_1 E_1^2 + \theta_{12} E_2^2 \\ \alpha_2 &= \beta_2 E_2^2 + \theta_{21} E_1^2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 α 相当于单程非饱和净增益， $\beta_1 E_1$ ($\beta_2 E_2$) 是模自身饱和所导致的净增益的减少量， $\theta_{12} E_2^2$ ($\theta_{21} E_1^2$) 是模 2(模 1)导致模 1(模 2)饱和而使其净增益的减少量。由式(1)可见， $\alpha_1 - \theta_{12} E_2^2$ 越大越有利于模 1 的振荡，当 $\theta_{12} E_2^2 \geq \alpha_1$ 时，模 1 不能振荡。所以模 1 和模 2 彼此有一竞争效应。其竞争强弱视 θ_{ij} 而定， θ_{ij} 为模耦合系数。对谱线非均匀致宽的激光器来说， θ_{ij} 值很小，故为弱耦合，其竞争效应不显著。而 He-Ne 激光器虽属非均匀展宽线型(实际上是非均匀展宽大于均匀展宽的综合线型情况)，但由于碰撞效应使耦合变强^[2]，从而使模竞争加强^[3]。

下面我们利用兰姆双模激光理论来分析模竞争对双频激光器调谐曲线的影响。考虑模竞争以后的功率调谐曲线的线形还取决于塞曼分裂距离 $\Delta\nu_z$ 和纵模间隔 $C/2L$ ，以下分几种情况来讨论(所用激光器均保证基模 TEM₀₀ 运转)。

$$(1) 0 < \Delta\nu_z < \Delta\nu_h$$

$\Delta\nu_h$ 为烧孔宽度(当总气压为 3 托时，

$\Delta\nu_h \approx 240$ 兆赫), $\Delta\nu_z$ 由下式给出:

$$\Delta\nu_z = 2 \times 7/6 \cdot \frac{\mu_B}{h} H \quad (2)$$

其中 μ_B 为玻尔磁子, h 为普朗克常数。由 (2) 式, 此时相当于 $H < 75$ 高斯。

此种情况下塞曼分裂较小, 基本可保证单纵模运转, 功率调谐曲线出现兰姆凹陷。

$$(2) \quad 2\Delta\nu_h < \Delta\nu_z < \frac{C}{2L}$$

此时所得功率调谐曲线如图 4。曲线有两个不对称峰, 二峰之间有一下陷, 我们称为“磁下陷”。“磁下陷”的形成是由不同偏振模竞争的结果。两个振荡模 ν_L 和 ν_R 在频率调谐过程中, 其中一个模被另一个模所饱和, 增益大的模进一步被加强。在极端情况下, 即当 $\alpha_R - \theta_{RL} E_L^2 \leq 0$ 或 $\alpha_L - \theta_{LR} E_R^2 \leq 0$ 时, 则只有一个模振荡, 另一个模被抑制, 而把全部能量转移给另一个模。竞争的结果形成图 4 的功率调谐曲线(实线所示), 这是最为常见的形状。

对应图中所标明的纵模分布:

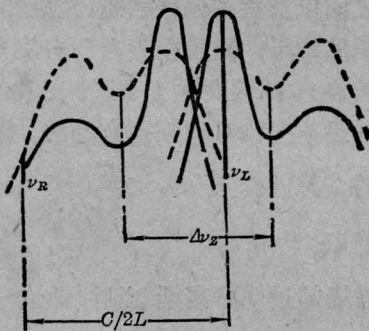


图 4 有“磁下陷”的功率调谐曲线
实线为实际情况, 虚线为不考虑模竞争
情况的纵模分布: $\Delta\nu_z + \frac{\Delta\nu_D}{4} \approx C/2L$
($\Delta\nu_D$ 为多普勒宽度)

$$\Delta\nu_z \approx \frac{C}{2L} - \frac{\Delta\nu_D}{4},$$

可以标出此时的磁场 $H \approx 200$ 高斯。

磁场进一步加大, 使二个纵模的分布为 $\Delta\nu_z \approx \frac{C}{2L} - \Delta\nu_h$, 如图 5 所示(仍满足 (2) 中

的条件)。模竞争结果, 形成对称并且深而锐的下陷(如图 5 中实线所示)。由纵模分布可以标出, 此时 $H \approx 240$ 高斯。

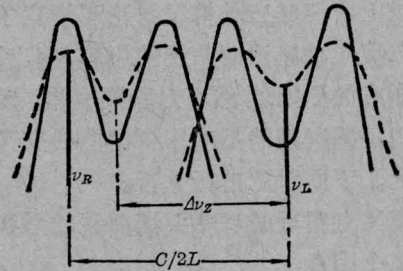


图 5 功率调谐曲线, 纵模分布:

$$\Delta\nu_z + \Delta\nu_h \approx \frac{C}{2h}$$

$$(3) \quad \Delta\nu_z = \frac{C}{2L}$$

当 $\Delta\nu_z = \frac{C}{2L}$ 时, 如图 6 所示, 由于模 1 (ν_R) 和模 2 (ν_L) 在频率调谐过程中基本满足 $E_1 = E_2$, 所以其功率调谐曲线如图 7 所示, 除交叉点有一凹陷外, ν_R 和 ν_L 的功率调谐曲线基本上同单频激光器(图 7), 可以算出此时 $H \approx 310$ 高斯。

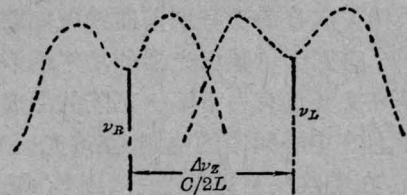


图 6 纵模分布: $\Delta\nu_z = \frac{C}{2L}$

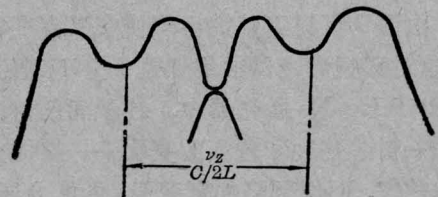


图 7 $\nu_z = \frac{C}{2L}$ 时的功率调谐曲线

$$(4) \quad \Delta\nu_z > \frac{C}{2L}$$

在较强的磁场下 (310 高斯以上),

$$\Delta\nu_z > \frac{C}{2L},$$

将出现三个以上的纵模。使得功率调谐曲线形状更为复杂。并且这已不在我们使用范围之内,故不予讨论。

以上我们分三种情况讨论了模竞争对左旋与右旋光功率调谐曲线的影响,指出了主次峰形成的原因。然而对稳频有用,因而也是我们最感兴趣的是功率调谐曲线交叉位置的情况。下面对此进行分析。

交叉点附近的功率调谐曲线的形状必须考虑三个因素:

- ① 两个纵模的竞争;
- ② 同一纵模的二个不同偏振;
- ③ 烧孔和交叉弛豫效应。

上面讨论了模竞争过程,从下面分析可以看出,由于交叉弛豫和模竞争效应将会使交叉点附近曲线的斜率明显加大,而这对稳频是有利的。

模竞争的作用已如上述,下面讨论交叉弛豫的作用。

2. 交叉弛豫的作用

在不考虑交叉弛豫和模竞争情况下,则每个圆偏振成分的功率调谐曲线应如图7所示。图7有别于单频激光器的功率调谐曲线之处是在交叉点有一下陷。下陷的形成是烧孔效应。在中心频率的两侧,左旋光 ν_L 和右旋光 ν_R 在增益线上烧四个孔(图8(a));在 ν_0 处,烧两个孔,即彼此原孔和象孔重叠(图8(b))。

由图7可见下陷的出现使交叉点变得圆滑,这对双频激光器的稳频是十分不利的。幸好,由于He-Ne激光器中,粒子间的碰撞效应——引起速度和位相的变化——造成交叉弛豫效应,而使下陷加宽变浅,如图9所示,从而减少了下陷造成的影响,使交叉点附近功率调谐曲线的斜率加大,以有利于稳频。为加强交叉弛豫作用,激光管中充的压力适当高些是有利的。

交叉弛豫效应虽然在一定程度上减弱了烧孔效应造成的影响,把下陷“填平”些,但交

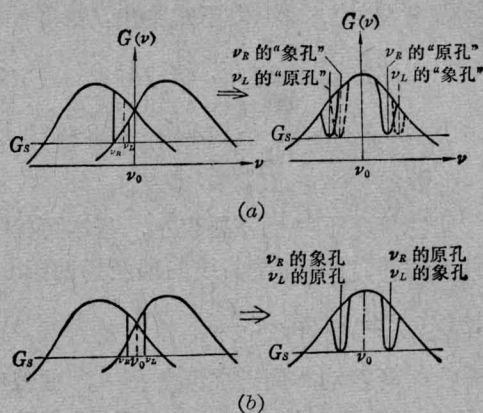


图8 双频激光器的烧孔效应
(a) 在 ν_0 两侧烧两个孔; (b) 在 ν_0 处烧两个孔

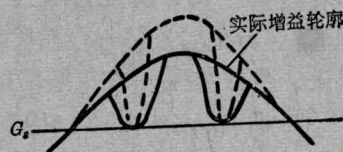


图9 交叉弛豫效应使烧孔加宽变浅

叉点仍有下陷,这在实验中可以观察到。欲使交叉点附近曲线的斜率进一步加大,还需选择大小合适的磁场,以加强模竞争作用。两个纵模之间以及两种偏振状态(左旋和右旋)之间竞争的结果,使得左旋光和右旋光的强度在交叉点 ν_0 两侧发生急剧的变化(如图4)。这种迅速变化对稳频是有利的。图4表明磁场的选择应保证 $\Delta\nu_z < \frac{C}{2L}$,其具体值通过实验确定。

当磁场超过300高斯以后($\Delta\nu_z > \frac{C}{2L}$),不但使交叉点附近曲线斜率减小,而且输出的差频信号幅度明显减小。这些都是很不利的。

需要指出,在非均匀磁场下仍可形成“磁下陷”,但不如均匀磁场下明显。这是因为非均匀磁场下的拉姆下陷模糊不清。

三、结 论

1. 我们在190~350高斯之间的不同磁

场下做了实验, 观测了各个磁场下的功率调谐曲线。实验表明对于我们的激光器

$$\left(\frac{C}{2L} = 1000 \text{ 兆赫, 功率 } 0.5 \text{ 毫瓦左右}\right)$$

磁场选择 200 高斯左右, 功率调谐曲线的线形对稳频最为有利, 实际稳频效果很好。磁场超过 250 高斯时, 调谐曲线变得对稳频不利, 特别当 350 高斯时, 交叉点调谐曲线明显变“平滑”且差频信号幅度变小。所以我们在使用中一般采用 200 高斯左右的磁场。

2. 实验表明适当增加管内气压会使交

叉弛豫以及模竞争变强, 所以适当提高管内气压(要高于单频管最佳气压)可望获得双频激光器更佳调谐曲线, 同时其输出功率可以提高而不会降低, 因为提高气压增强交叉弛豫和模竞争, 会使无差频模(高频端或低频端)把能量更多地馈给有差频模(ν_0 处)。

参 考 文 献

- [1] W. E. Lamb, Jr.; *Phys. Rev.*, **134**, A1429(1964).
- [2] E. Spiller; *Z. Physik*, **182**, 487(1965).
- [3] R. L. Fork, M. A. Pollack; *Phys. Rev.*, **139**, A 1408(1965).

简 明 通 讯

TEACO₂ 激光多光子解离 CF₃CHCl₂ 分离 H、D 同位素

最近 J. B. Marling 等报导了用 TEA-CO₂ 激光多光子解离 2, 2-二氯 1, 1, 1-三氟乙烷 (CF₃CHCl₂ 即 Freon-123) 浓缩了氘同位素。由于这个体系有许多优点, 引起人们的很大兴趣。我们实验室制备了 CF₃CHCl₂、CF₃CDCl₂ 及 CF₂ClCHClF、CF₂ClCFCIF 化合物并测定了它们的红外光谱, 开展了 CF₃CHCl₂-CF₃CDCl₂ 激光辐照分离 H-D 同位素的实验, 观察到了 H、D 同位素的富集。

CF₃CHCl₂ 氘代以后, 在 944 厘米⁻¹、984 厘米⁻¹ 出现清晰的 C-D 键强吸收。使用 TEA-CO₂ 激光(脉冲能量~2 焦耳; 脉宽 100 毫微秒) 辐照 CF₃CDCl₂, 一个脉冲后 CF₃CDCl₂ 分解 8.9%, 50 个脉冲后 CF₃CDCl₂ 分解达 93%, 并监测到分解产物 CF₂=CFD。而 CF₃CHCl₂ 在 50 个脉冲辐照后, 无任何分解迹象。激光辐照 4:1 的 CF₃CHCl₂ 与 CF₃CDCl₂ 混合物, 总样品压力为 2.1 托。

经辐照 20 个脉冲: 分离系数 $\beta=3.97$ 。

经辐照 70 个脉冲: 分离系数 $\beta=4.61$ 。

(此处 $\beta = \frac{(p_b^0 - p_b^*)/p_b^0}{(p_H^0 - p_H^*)/p_H^0} p_b^0$ - 辐照前 CF₃CDCl₂ 分压, p_b^* - 辐照后 CF₃CDCl₂ 分压; p_H^0 - 辐照前 CF₃CHCl₂ 分压, p_H^* - 辐照后 CF₃CHCl₂ 分压。)

CF₃CHCl₂ 的异构体 CF₂ClCFCIH 经氘代后, 在红外光谱上 900 厘米⁻¹ 和 930 厘米⁻¹ 处出现了 C-D 键吸收, 而 CF₂ClCFCIH 在 880 厘米⁻¹~980 厘米⁻¹ 范围内基本无吸收。CF₂ClCFCIH 是 CF₂=CFH 的氯加成产物, 若把激光辐照 CF₃CCl₂D-CF₃CCl₂H 的离解物 CF₂=CFD 和 CF₂=CFH 通氯加成, 进行第二次激光辐照, 实现激光选择性离解, 就有望达到氘的高浓缩度。因此, 实现 CF₂ClCFCIH-CF₂ClCFCID 的氘同位素浓缩, 将具有实际意义。

(中国科学院有机化学研究所十一室激光组)