

# 四频环形激光陀螺的周期性 零漂与多模耦合

朱 勤

(苏州第一光学仪器厂)

**提要:** 本文初步探讨了激光陀螺中存在的难以观察的离轴模, 以及处于阈值附近的临界模对环形激光陀螺精度的影响。

## Cyclical null-drift and multimode coupling for a four frequency ring laser gyro

Zhu Qing

(Suzhou First Optical Instrument Factory)

**Abstract:** This paper discusses that in the ring laser gyro (RLG) the off-axial mode is difficult to detect and the effects of the critical mode near the threshold on the precision of RLG.

### 一、引 言

妨碍环形激光陀螺(RLG)投入实用的主要障碍, 由于各种消闭锁环节的采用, 已逐渐由“闭锁”效应转为“零位漂移”效应。后者主要起因于环形激光器内部的多种物理过程。本文所探讨的周期性(或近似于周期性)“零漂”是影响 RLG 精度可否大幅度提高的一个重要因素。

多模耦合这一类问题早在 W. Lamb 最初提出半经典理论时已经部分地包含进去了<sup>[1]</sup>, 那时主要反映了多纵模的影响。Lamb 预言这将导致多模“复合音调”(combination tones), 使激光器内不仅存在几个振荡模本身的频率, 而且出现了复杂的拍频结果。由

于各模的非线性频率牵引效应使得高阶混频后得到远比光频低得多的派生频谱。

多模耦合的另一个重要方面是基轴模和各阶离轴模的同时振荡, W. R. Bennett 称为“模混合效应”(cavity mode mixing effects)<sup>[2]</sup>, 而在[3]中则给出了  $n$  阶横模同时振荡的总的相干重迭电场表达式, 并指出在各模激发度、腔结构、菲涅耳数的某种条件下, 同时振荡的横模阶数不高时, 多模重迭的光强分布将十分接近于高斯分布。我们自己的实验则直接观察到了这些现象<sup>[4]</sup>, 并且证明了[2]中所提到的由于模混合效应将使腔内激光束的口径及能量中心发生某种周期性的变动。

本文将着重讨论环形激光器中多模耦合

收稿日期: 1982年2月9日。

的影响。

## 二、环形激光器的多模耦合

### 1. 四频环形激光器的基本拍频方程

在四频差动环形激光器中(见图1),由于加入了沿晶轴方向通光的旋光元件—水晶片,使左旋圆偏振光和右旋圆偏振光的光学腔长不再相等,故每个纵模都分裂成为一个左旋模式和一个右旋模式(旋光分裂见图2),即采取“对模”工作体制。又由于圆偏振光穿过磁光元件时存在着纵向磁光效应,左右旋圆偏振光又各自分裂成两个频率,每个频率之差( $f_4-f_3$ )和( $f_2-f_1$ )与磁场强度、磁光元件性能有关。实际工作时大多选为数百千赫至1兆赫,称之为“偏频量”。这样一来若RLG在顺时针方向转动,一对右旋光的差频( $f_4-f_3$ )将增大,构成一个单陀螺,而一对左旋光之差频( $f_2-f_1$ )将缩小,构成另外一个单陀螺。对这两个单陀螺讯号进行差动处理,将得到一个总的拍频,反映了转速的大小:

$$\Delta f_{\text{总}} = (f_4 - f_3) - (f_2 - f_1) = \frac{8A}{\langle L \rangle \lambda} \Omega \quad (1)$$

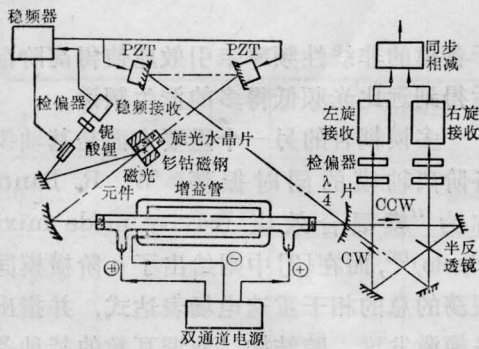


图 1

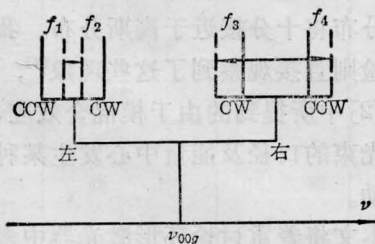


图 2

其中  $A$ ——环路的有效面积(系大小三角形面积之差);

$\langle L \rangle$ ——环形腔的等效光程;

$\Omega$ ——RLG 的转速;

$\lambda$ ——工作波长。

这种四频差动 RLG 的偏频量在数百千赫以上,所以远离锁区(一般都在几百赫以下)上千倍,故闭锁效应已基本上克服。但由于环形激光器的一系列物理效应,它的总拍频并不是上述的只与  $\Omega$  有关的形式。由激光物理中半经典理论导出的顺逆时针两个方向的行波之一组自治方程可得到 RLG 的拍频方程为:

$$\begin{aligned} \Delta \nu_{\text{拍}} = & (1 + SFC) 2 \cdot \Delta \nu_0 \\ & + (SFC_{12} - SFC_{34}) \cdot (\Delta \nu_H + \Delta \nu_B) \\ & + \frac{1}{2\pi} (SFC) \cdot 4 k \bar{v} \\ & + \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{C}{2\langle L \rangle} [f(\xi_{12}) \\ & + f(\xi_{34})] (\nu_2 - \nu_1) \end{aligned} \quad (2)$$

式中,  $SFC = \frac{1}{2} (SFC_{12} + SFC_{34})$  是由频率牵引效应、模推斥效应、辐射捕获效应等而引入的比例因子修正项;  $\Delta \nu_H$ 、 $\Delta \nu_B$  是磁光元件的偏频量及漏磁引起的塞曼效应频差;  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ;  $\bar{v} = \frac{G_A v_A + G_B v_B}{G_A + G_B}$  反映了朗缪尔流动效应的影响,  $\bar{v}$  称为净流速。  $G_A$ 、 $G_B$  为增益管两臂的增益,  $v_A$ 、 $v_B$  为两臂气体流速。

$$\frac{C}{2\langle L \rangle} f(\xi) = \frac{\tau(\xi) - \rho(\xi)}{\beta(\xi) - \theta(\xi)}$$

其中,  $\tau$ 、 $\rho$  为自身及交叉模排斥频率修正系数;  $\beta$ 、 $\theta$  为自身及交叉增益饱和光强修正系数;  $(r_2 - r_1)$  为正反向行波的损耗差;  $\xi = \frac{\omega - \omega_0}{ku}$ , 这里,  $\omega - \omega_0$  是工作圆频率及原子谱线中心的圆频率;  $\frac{ku}{2\pi} = 1000$  兆赫(对  $\text{He}^{20}$  同位素)是反映多普勒宽度的参量。

从上述方程中可见,在  $\Omega = 0$  时,  $\Delta \nu_0 = \frac{4A}{\langle L \rangle \lambda} \Omega = 0$ , 但  $\Delta \nu_{\text{拍}}$  并不为零,称之为“零

位偏离”。而它又是一个变动的量，称之为“零漂”。在零漂中有一种所谓周期性零漂(或周期性不甚明显的上下漂伏)，见图3，对RLG的工作精度危害极大。理论分析与实验结果都表明，多模耦合的存在是引起这类零漂的重要原因。除此而外，腔内损耗的干涉调制效应，增益的波动，外界条件(温度、湿度、气压)的干扰，增益管内放电状态的扰动等多种因素也会引起一些周期性或类周期性的零漂。

## 2. 环形激光器多模耦合的复杂性

在一般的气体激光器中，不同模之间的竞争效应往往比较强烈，故有些即使可以出现多模的场合，也往往由于某些弱模在竞争中被“吃掉”而不能振荡，出现多模的机会相对来讲要少得多。而在RLG中为了保证输出拍频的稳定性，必须消除模竞争效应，为此采用了“双同位素氖”(Ne<sup>20</sup>: Ne<sup>22</sup>=53: 47)，然而这样会使一些处在阈值附近很弱的模也能振荡，甚至出现主模与这些模的光强比达到上百倍之大。由于在一般RLG中输出的主模功率也只有几个微瓦，故在主模与那些弱模同时振荡时，它们的强度比往往还要超过接受弱小讯号时探测器的信噪比，因而弱模被“淹没”了。但是我们却可以从弱模参与了拍频再拍频的过程来感受它们的作用，从这意义上我们称它为“虚模”。

此外，激光器在阈值附近的行为也很值得探讨<sup>[5]</sup>，有人提出在通常认为是阈值以下的一个较为靠近的区域内存在着一个不稳定区，还有不少文章提到了阈值附近的非线性理论。

四频RLG是对模工作体制，故对一般环形激光器是单模工作时，到了四频情况下仍然是多模。此外，四频RLG不但同一旋向的圆偏振光可以发生模间的耦合，而且不同旋向的模之间还会通过损耗的不均匀性产生一定程度的耦合<sup>[6]</sup>，尽管有旋光元件存在，这种耦合被大大削弱了。而 $(f_4-f_3)$ 与 $(f_2-f_1)$

这两个单陀螺的一次拍频到了环形谐振腔外，包括讯号接收处理系统中，相互耦合的可能性也依然存在<sup>[4]</sup>。

轴外模光束的横向尺寸比基模要大，故从激活介质原子那里来的贡献就更大些。这样离轴模和轴向基模的增益不一样，损耗也不一样。再之，环形腔是一种象散腔，故TEM<sub>01</sub>和TEM<sub>10</sub>对基模的频率间隔并不相等(在我们的样机中差8兆赫)，故它们的非线性频率牵引量也不相等，在多模混频时将会有极复杂的派生频谱。所有这些都使我们引入离轴模的作用时问题复杂化了。

在半经典理论中，频率的自治方程中含有 $\dot{\phi}$ 项，在作数学处理时往往被略去。但由于上述种种造成模频谱复杂化的原因及各模起振条件的不一致性，考虑多模时 $\dot{\phi}$ 不可略去，必须做为频率修正项来处理。尤其是对阈值附近的模，由于振荡的不稳定性，受到外界扰动时会时振时停，从RLG静态输出拍频的漂伏变化规律以及直腔激光器中模混合效应来看，似乎与 $\dot{\phi}$ 的关系更为密切。

存在多模耦合时，激光束的口径及能量中心是变动的<sup>[4]</sup>，这样光束在经过增益管孔径时，由于管内原子、离子流速分布的不均匀性(即朗缪尔流动效应)，必然会因介质流速分布的不均匀性带来额外的频移，造成零漂。

## 二、实验分析

对于多纵模，只要控制腔长(即环路的周长)以及增益管的激发功率，一般说来是易于避免多模状态的。对于离轴模(横向多模)的影响情况要复杂得多。这一方面是因为不能凭光斑的能量分布或扫描干涉仪来断定是否存在离轴模，另一方面也是由于目前对横模的解析方法大多带有一定的近似性。对于电磁波开式谐振腔的理论分析所依据的基尔霍夫衍射积分方程，不论采用计算机迭代求解，或者是对方形孔径的自治场积分方程求解，所



得到的结果往往出入甚大。对于我们的样机, 由于环形激光器象散性不太大 ( $W_{0x}/W_{0y} = 1/1.07$ ), 可以近似地看成一个直腔。例如毛细管  $d=1.10$  时, 不同的参考书上所给的 TEM<sub>00</sub> 模之衍射损耗从 0.06~0.3%, 对于一般激光器影响不大, 而对 RLG, 它的总增益只 2% 至 1%, 而增益损耗比不能太高 (一般损耗为 1.03 左右), 故衍射损耗值一定要准确估计, 才能有效地抑制离轴模。我们在实验中曾加入一个  $d=0.9$  的圆形光阑, 按一些表格曲线, 此时的 TEM<sub>00</sub> 模的衍射在 1% 以上, 加上别的损耗 (还有 12 个透、反射面有损耗), 早已不能形成激光振荡, 但实际上仍能出光。所以我们并未简单地依据目前流行的各种曲线、表格去推算衍射损耗值, 因为它们并不能保证有效地抑制 TEM<sub>01</sub> 模。此外还应注意毛细孔直径的不圆度、弯曲以及与腔轴线的非一致性、环形腔调整精度不佳等都是影响衍射损耗的活跃因素。在实验中发现用控制附加衍射损耗的办法, 可以防止一般手段不易发现的离轴模的混入。图 3 中所示为 I# 样机在新制得增益管时不加以附

加衍射损耗的周期性零漂曲线。图 4 为加以附加衍射损耗后的零漂曲线。

在表 1 中则给出了附加衍射损耗控制离轴模混入所进行的多次实验结果。

对各实验结果, 可以做如下分析:

(1) 在不加以附加衍射损耗时, 环形激光器的激光束不论用光斑能量分布测量或扫描干涉仪都无明显的横模, 这时的零漂曲线如图 3 所示, 多次实验表明这时的零漂比加以适当的附加衍射损耗后的漂移率一般要大

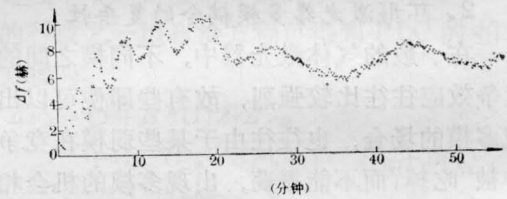


图 3

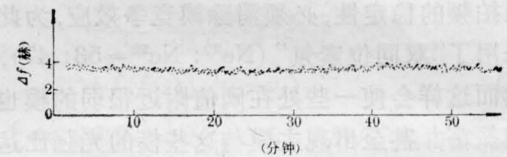


图 4

(下转第 174 页)

表 1

| 实验日期      | 编 号                  | 附加衍射损耗的大小  | 漂移率方差(取样 $\tau=10$ 秒)   | 备 注                               |
|-----------|----------------------|------------|---|-----------------------------------|
| 1980.4.25 | I# 样机<br>80.1 制增益管   | 较 大        | $\sigma=0.19$ 度/小时 (70 分钟)                                      | 随机散发较大, 它的影响已包含在 $\sigma$ 内       |
| 1980.5.8  | 同 上                  | 较 大        | $\sigma=0.25$ 度/小时 (在 6 小时内)                                    | 同 上                               |
| 1980.5.9  | 同 上                  | 打乱后重复前一次实验 | $\sigma=0.24$ 度/小时 (在 3 小时内)                                    | 同 上                               |
| 1980.12.4 | II# 样机<br>80.11 制增益管 | 较 大        | $\sigma=0.09$ 度/小时 (1 小时内)                                      | 随机散发降至 I# 样机的 1/2~1/3             |
| 1981.1.15 | 同 上                  | 较 大        | $\sigma=0.08$ 度/小时 (1 小时内)                                      | 同 上                               |
| 1981.2.23 | 同 上                  | 中 等        | $\sigma=0.07\sim 0.11$ 度/小时 (1 小时)<br>$\sigma=0.14$ 度/小时 (6 小时) | 创长时间漂移率最佳值                        |
| 1981.3.7  | 同 上                  | 较 小        | $\sigma=0.05$ 度/小时 (1 小时)                                       | 增益管使用 4 个多月后, 增益已有明显下降, 创 1 小时最佳值 |

表 5

| 型号及尺寸                       | 制造单位      | 极限负载能量<br>(焦耳/厘米 <sup>3</sup> ) | 单次能量<br>(焦耳) | 重 复 率<br>(p.p.s) | 寿 命             | 光强下降 |                     |
|-----------------------------|-----------|---------------------------------|--------------|------------------|-----------------|------|---------------------|
| DMXD $\phi 3 \times 100$    | 上海光机所     | 876                             | 10           | 40~100           | $1 \times 10^7$ | 20%  | 1980                |
| L-2339 $\phi 3 \times 100$  | 美国 ILC 公司 | 56                              | 10           | 40               | $1 \times 10^7$ | 50%  | 1979 <sup>[2]</sup> |
| 4 D 6 $\phi 4 \times 150$   | 美国 ILC 公司 | 75                              | 82           | —                | $10^4$          | —    | [6]                 |
| 10 F 6 $\phi 10 \times 150$ | 美国 ILC 公司 | 17                              | 60           | 10               | $>10^5$         | —    | 1980 <sup>[5]</sup> |

表 6

| 型号及尺寸                                | 点 燃 方 式 | 光辐射效率(相对) | 灯光峰值(相对) | 上升前沿(微秒) |
|--------------------------------------|---------|-----------|----------|----------|
| DMXD 3/100<br>$\phi 3 \times 100$ mm | 外 触 发   | 2.90      | 3.7      | 0.85     |
| FX-139 C<br>$\phi 3 \times 100$ mm   | 外 触 发   | 1.85      | 3.1      | 0.90     |
| DMXD 3/100                           | 预 电 离   | 5.18      | 7.0      | 0.90     |
| FX-139 C                             | 预 电 离   | 4.52      | 4.6      | 1.05     |

## 参 考 文 献

- [1] К. Гюлтер; *Опн. и спекр.*, 1973, **34**, № 6, 1070.  
 [2] Steven *et al.*; *Opt. Commun.*, 1979, **28**, No. 2, 221.

- [3] M. H. Ornstein *et al.*; *Appl. Opt.*, 1974, **13**, No. 9, 2100.  
 [4] T. K. Yee *et al.*; *Appl. Opt.*, 1979, **18**, No. 8, 1131.  
 [5] A. Hirth *et al.*; *Opt. Commun.*, 1980, **35**, 225.  
 [6] ILC Technical Bulletins, No. 1 and No. 5.

(上接第 178 页)

一倍到几倍。

(2) 虽然目前半径理论的环形激光理论尚难以将离轴模的作用反映进去,因而理论上的定量分析仍存在着困难。但从我们的实验中似乎可以得到一些定量的结果,所加的附加衍射损耗基本上是限制  $TEM_{01}$  模所需的量,计算时所对比的各模理论衍射损耗值是按计算机数值求解法所给的结果(从其它的实验中也可以发现这种方法所给的衍射损耗值近似性较好)。

(3) 出于工程上的考虑,目前不宜将所加的附加衍射损耗直接采用缩小毛细管孔径的办法代替,这样做会因毛细管的变形、不圆度等而带来复杂的误差因素。

(4) 由于增益管增益的下降,会使限制  $TEM_{01}$  模所需的附加衍射损耗逐渐减小。

(5) 由于采用了附加衍射损耗的方法,使 RLG 工作在朗缪尔流动效应处于现行理论认为是不利的状态下,但多次实验表明,

综合的零漂曲线却达到了较好的水平,表明现阶段多模耦合是影响 RLG 精度的最主要效应之一。

本文所引用的大部分实验数据,是在苏州第一光学仪器厂与中国计量科学研究院、清华大学联合研制的四频环形激光陀螺原理样机上取得的。在实验研究过程中得到了国防科技大学高伯龙教授和中国科学院高能物理所朱起鹤教授的指导和帮助,特此致谢。

## 参 考 文 献

- [1] W. E. Lamb; *Phys. Rev.*, 1964, **A-134**, 1429.  
 [2] W. R. Bennett; "The Physics of Gas Laser", 1977, New York.  
 [3] D. H. Auston; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1968, **QE-4**, 241.  
 [4] 中国计量科学研究院,清华大学,苏州第一光学仪器厂(朱勤执笔);“四频环形激光的周期性零漂(详细摘要)”,第五届全国激光学术报告会(1980年,南京).  
 [5] S. T. Dembinski *et al.*; *Phys. Lett.*, 1978, **68**, No. 1, 20.  
 [6] 高伯龙,“四频环形激光的第二类闭锁效应”,全国环形激光陀螺学术交流会(1981年,苏州)。