

doi: 10.3788/gzxb20154404.0414003

激光陀螺谐振腔横模特征的测量与分析

王朋国, 张自国, 叶萍

(中航工业西安飞行自动控制研究所, 西安 710065)

摘要:为了判定被测激光的模式特征,基于激光的频率特性,提出了一种测量激光陀螺谐振腔横模特征的方法.利用 F-P 扫描干涉仪,可以实时在线测量激光模式分布特性,该方法以已知 F-P 扫描干涉仪的频率间隔和扫频速度为比例尺,将难以测量的横模频率间隔转化为易于测量的时间间隔,通过测量从扫描干涉仪给出的谱图,计算出不同横模的频率间隔与纵模间隔的比例系数,并与该陀螺的理论比例系数进行比较,从而实现激光陀螺谐振腔横模特征的精确判定.通过对某型环形激光谐振腔的测量实验,得到了该陀螺模式特征随着工作电流大小变化的规律:随着放电电流的增加,激光陀螺腔内所振荡的横模由单一的基模逐渐转变为基模和高阶模的混合模,并准确地判定出该谐振腔横模特征,其测量结果与理论结果误差小于 2%.利用该方法横模频率间隔测量准确度可达 1 MHz,重复性可达 0.4 MHz.

关键词:激光光学;激光陀螺;扫描干涉仪;激光模式;频率间隔;扫频速度;时间间隔

中图分类号:TN249

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)04-0414003-7

Measurement and Analysis of Transverse Modes Characteristic of Laser Gyro Resonator

WANG Peng-guo, ZHANG Zi-guo, YE Ping

(AVIC Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: Based on the frequency properties of laser, a novel method for measuring modes characteristic of laser gyro resonator is presented to confirm the mode characteristics of of measured laser. In which the characteristic distribution of laser modes are measured on-line by using a scanning interferometer with a con-focal resonator, take the known frequency spacing and swept rate of scanning interferometer as scale, it translates unfathomable frequency spacing into fathomable time spacing, and calculate the inverse proportion of different transverse mode frequency spacing and longitudinal mode frequency spacing. Besides it compares this value to the theoretic inverse proportion of the laser gyro, thereby the accurate mode characteristic of laser gyro resonator comes true. The experimental results of some laser gyro shows the relationship between the modes characteristic and its discharge current: the oscillating transverse mode in ring gyros cavity gradually changes from sigle fundamental mode to mixed mode with fundamental mode and high order mode. And the accurate mode characteristics is gained, the error between experimental results and theoretic value is less than 2%, The measurement accuracy and repetition of transverse mode frequency spacing and can be up to 1 MHz and 0.4 MHz respectively.

Key words: Laser optics; Laser gyro; Scanning interferometer; Laser mode; Frequency spacing; swept rate; Time spacing

OCIS Codes: 140.0140; 140.3295; 140.3430; 140.3515

0 引言

激光以其高亮度、良好的单色性、相干性及方向

性,在工业、军事、通信等诸多领域得到广泛应用^[1].激光模式是反映激光特性的一个基本参量,在不同的使用场合对激光模式参量有着不同的技术要求.基于

基金项目:总装预先研究基金(No. 51303010202)资助

第一作者:王朋国(1980.5-),男,工程师,硕士,主要研究方向为谐振腔装调技术、激光陀螺. Email:gentle0951@sina.com

收稿日期:2014-10-21;录用日期:2014-12-08

<http://www.photon.ac.cn>

Sagnac效应的激光陀螺^[2],是一种精密的光学惯性传感器,通过闭合回路内相对运行的一对行波的光程差来敏感外界的转速实现对惯性器件角速度的测量.为了实现激光陀螺良好的测量准确度和性能,激光陀螺在工作时其激光模式不仅要求基横模而且要求单纵模运行^[3],以提供高质量的光束,因此进行激光模式特征的分析 and 鉴别是一项基本而又关键的测试,准确判定激光陀螺出现多模特征时的腔参量对改进激光陀螺设计,优化产品装调工艺具有重要的参考价值.

对于激光模式特征的认识,从早期的热成像,激光烧蚀,线性扫描到后来的光电扫描、光斑观测、扫描干涉仪法以及 F-P 照相法等,人们进行了大量的研究和尝试^[4-6],其中扫描干涉仪法是目前测量激光模式特征最精确的方法.本文针对激光陀螺谐振腔输出光模式特征测量需要,利用 F-P 扫描干涉仪测量激光陀螺谐振腔输出光模式特征,提出了一种利用 F-P 扫描干涉仪来精确测量激光模式频率间隔和模式特征的精确判定的方法,并开展了大量的试验验证,结果表明该方法易于操作、测量简单、测量准确度高,能够实现激光模式特征的精确测定.

1 激光陀螺谐振腔的模式理论

根据激光谐振腔理论,对于在腔内来回反射的光束能够形成稳定的驻波,其光波频率和波长必须满足谐振条件^[7-8],即

$$\nu_q = \frac{c}{2nL} \cdot q \quad (1)$$

$$\lambda_q = \frac{2n}{q} \cdot L \quad (2)$$

式中: c 表示真空状态下光速,取 3×10^{-8} m/s, L 表示谐振腔的腔长, n 表示腔内增益介质的折射率,通常激光陀螺谐振腔腔内增益介质的折射率 n 非常接近1,在计算时可近似取1; q 表示谐振腔的纵模序数,为正整数,通常是一个很大的数.由式(1)可知,激光陀螺的谐振频率主要取决于谐振腔的光学长度,由于激光的频率很高,一般的仪器很难直接测量,为了更好地表征激光陀螺的频率特性通常用相邻纵模的频率间隔 $\Delta\nu$ 表示其频率特性,根据式(1)可知

$$\Delta\nu_q = \nu_{q+1} - \nu_q = \frac{c}{2nL} \quad (3)$$

可以看出,相邻模频率间隔大小总是相等的.激光陀螺中能够谐振的纵模个数取决于以下几个因素:

1) 激光谱线的荧光光谱宽度

对于特定的激光陀螺谐振腔,其荧光谱线展宽越大,可能谐振的纵模个数就越多;

2) 激光陀螺谐振腔光学长度

由式(3)可知,谐振腔腔长越长,对应的纵模间隔越小,同样的谱线宽度内可能出现的纵模个数就越多;

3) 激光陀螺的增损比

在满足谐振条件下,只有那些增益大于损耗的特定模式,才能够形成稳定的振荡.增损比越大,可能出现的纵模个数就越多.

激光陀螺在工作时要求工作在单模状态,因此就要综合考虑上述三个因素,使得激光陀螺工作在某一特定的纵模,使当激光陀螺以单纵模振荡时,其纵模内还可能表现出不同的横模.激光陀螺横模特征用 TEM_{mn} 表示, m, n 表示横模序数,每一组 m, n 代表光场的一个特定分布,图1给出了方形镜下几种常见的横模光斑图样.

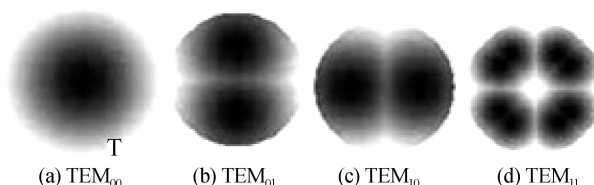


图1 激光横模光斑图样

Fig. 1 Laser transverse mode spot patterns

对于一个特定的激光模式而言,具有纵模和横模的综合特征,用 TEM_{mnq} 表示, m, n 和 q 分别表示横模序数和纵模序数.不同纵模对应不同的谐振频率,即使在同一纵模内不同横模同样也具有不同的谐振频率,通常不要求出横模的频率,而是关心不同横模之间的频率差,根据激光原理可推导出不同横模之间的频率差为

$$\Delta\nu_{\Delta m + \Delta n} = \frac{c}{2nL} \left\{ \frac{\Delta m + \Delta n}{\pi} \arccos \left[\left(1 - \frac{L}{R_1} \right) \left(1 - \frac{L}{R_2} \right) \right]^{1/2} \right\} \quad (4)$$

式中: $\Delta m, \Delta n$ 分别表示 x, y 方向上横模序数差, R_1, R_2 分别表示谐振腔两反射镜的曲率半径.

由式(4)容易得到相邻横模之间的频率间隔为

$$\Delta\nu = \frac{c}{2\pi nL} \left\{ \arccos \left[\left(1 - \frac{L}{R_1} \right) \left(1 - \frac{L}{R_2} \right) \right]^{1/2} \right\} \quad (5)$$

由式(3)和(5)可以计算得到,相邻横模与纵模频率间隔的比值为

$$f = \frac{1}{\pi} \arccos \left[\left(1 - \frac{L}{R_1} \right) \left(1 - \frac{L}{R_2} \right) \right]^{1/2} \quad (6)$$

激光陀螺工作时要求在保证单纵模时还要保证基横模,由式(1)~(6)可知,激光陀螺谐振腔相邻横模频率间隔与纵模频率间隔的比值系数与球面镜曲率半径 R 、谐振腔的光学长度 L 有关.对于环形谐振腔而言,还要考虑反射镜入射角 α ,以及球面镜的象散作用,这时式(6)可以进一步表示为

$$f_1 = \frac{1}{\pi} \arccos \left[\left(1 - \frac{L \cdot \cos \alpha}{R_1} \right) \left(1 - \frac{L \cdot \cos \alpha}{R_2} \right) \right]^{1/2} \quad (7)$$

$$f_2 = \frac{1}{\pi} \arccos \left[\left(1 - \frac{L}{R_1 \cdot \cos \alpha} \right) \cdot \left(1 - \frac{L}{R_2 \cdot \cos \alpha} \right)^{1/2} \right] \quad (8)$$

式中 f_1 和 f_2 分别表示弧氏方向和子午方向的比例系数, 对于一阶横模而言, 分别对应 TEM_{10} 和 TEM_{01} 模, 特别地当 $R_1 = R_2 = R$ 时, 式(7)和(8)进一步简化为

$$f_1 = \frac{1}{\pi} \arccos \left(1 - \frac{L \cdot \cos \alpha}{R} \right) \quad (9)$$

$$f_2 = \frac{1}{\pi} \arccos \left(1 - \frac{L}{R \cdot \cos \alpha} \right) \quad (10)$$

环形谐振腔高阶横模频率间隔与纵模频率间隔的比值系数与模序数的关系为

$$f_{m,n} = \frac{1}{\pi} \left[m \cdot \arccos \left(1 - \frac{L \cdot \cos \alpha}{R} \right) + \frac{n}{2} \cdot \arccos \left(1 - \frac{L}{R \cdot \cos \alpha} \right) \right] \quad (11)$$

对于多纵模的抑制, 通过对腔长、出光带宽等因素的控制来实现, 对于多横模的抑制一般通过控制高阶模损耗与增益大小来进行抑制。

由式(6)~(11)可以看出, 相邻横模与纵模频率间隔的比值总是小于 1, 这说明相邻横模频率间隔总是小于纵模的频率间隔。在激光陀螺的应用中, 由于激光陀螺相邻横模的频率较纵模更为接近, 对激光多模特征的抑制多为对激光的横模的抑制^[9]。因此准确测定激光陀螺的横模特征至关重要, 通常测定激光陀螺的横模特征有两种判定方法, 即观察法和测量法。观察法是利用不同横模光斑形状的差异性进行判定, 如图 1 所示, 这种方法观察到的光斑可能是多个模式的叠加, 人眼睛和探测器无法直接分辨或者说分辨率很低, 给实际的应用造成了很大的困难。测量法利用激光陀螺不同模式之间本征频率间隔特征^[10-11], 测量不同横模频率特性实现对激光模式的准确判定。由前面的讨论可知, 只要知道不同横模的频率间隔就可以实现对横模模式特征的判定, 但由于激光的频率很高, 一般的仪器不能直接测量, 可以考虑将难以测量的频率特性转换为可测量的时间特性来实现, 本文的测量方法正是基于这一思想而建立的。

2 测量系统与测量原理

2.1 系统组成

图 2 给出了利用 F-P 扫描干涉仪测量被测谐振腔模式频率特性的测试系统装置图。整个测量系统由被测谐振腔、激光电源、光路调节系统、F-P 扫描干涉仪、锯齿波发生电路、探测器和示波器组成。

激光电源作为激光陀螺谐振腔的供电器件与被测谐振腔连接, 用于引燃谐振腔, 同时它还装有电流调节装置, 用于对陀螺放电电流的调节和控制, 可调范围为

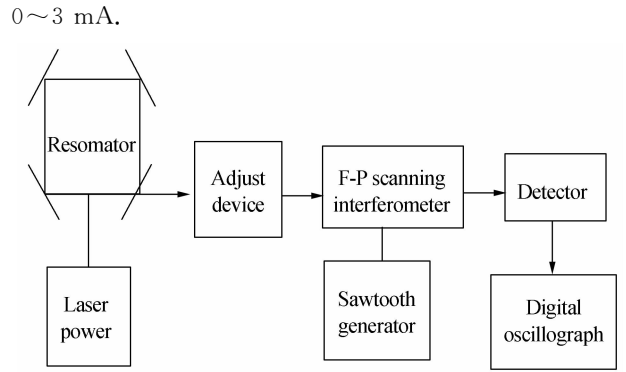


图 2 测试系统装置示意图

Fig. 2 Experiment measurement setup

光路调节系统用于将被测谐振腔输出的激光耦合至 F-P 扫描干涉仪, 当被测谐振腔输出激光的振动频率与 F-P 扫描干涉仪的频率匹配时, 该激光模式会在扫描干涉仪内形成谐振, 其间的耦合率最大, 通过干涉仪透射能量达到最大值, 光路的调节范围为 ± 2 mm。

F-P 扫描干涉仪利用其一个反射镜上压电陶瓷片, 通过调节加在压电陶瓷上的电压, 使得 F-P 扫描干涉仪的频率线性发生变化, 实现对被测激光模式激光频率的测量, 其带宽为 100 MHz, 可实现对腔长从 0~1 000 mm 的谐振腔进行定量测量, 并通过数字示波器进行观察和读数。

锯齿波发生电路通过对 F-P 扫描干涉仪中一反射镜上压电陶瓷施加锯齿波电压, 用于 F-P 扫描干涉仪的扫频, 实现与被测谐振腔频率的同步, 该锯齿波电压幅值的可调范围为 0~20 V;

示波器: 通过探测器接收受迫谐振的信号, 在示波器上进行实时显示和读数, 可以对测量结果实时观察和分析。

2.2 测量原理

横模的频率间隔主要是指高阶模与基模之间频率间隔。本文提出了利用频率转换实现对横模频率的测量方法, 其测量基本原理是: 利用 F-P 扫描干涉仪测量被测谐振腔输出光的模式特征, 得到被测谐振腔的频率间隔对应的时间间隔, 再以已知 F-P 扫描干涉仪频率间隔作为比例尺, 计算得到不同横模频率间隔与纵模间隔的比例系数, 并与理论频率间隔比例系数进行对比, 实现对被测模式的精确测定。

将被测谐振腔置于图 2 所示的装置图中, 引燃谐振腔, 通过光路调节系统, 将被测谐振腔出射光耦合至 F-P 扫描干涉仪。由于扫描干涉仪的频率是线性变化的, 如果被测激光某个模式的频率与扫描干涉仪的频率一致时, 输出信号幅值达到最大, 扫描干涉仪每扫描一次, 就会对应被测光的一组纵模。如果扫描干涉仪连续扫描两次就会出现两组被测光的输出脉冲信号, 这两组信号对应的是被测激光的同一个纵模, 通过探测

器接收可以观察到示波器中出现脉冲信号^[12],其示意图如图 3.

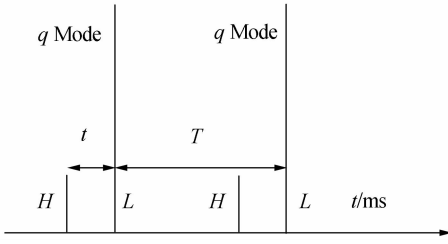


图 3 脉冲信号示意图

Fig. 3 Impulse signal sketch graph

图 3 中, H 表示高阶模脉冲信号, L 表示基模脉冲信号, 两组 q Mode 分别表示 F-P 扫描干涉仪连续扫描两次与被测激光频率一致时的输出脉冲信号, t 表示谐振腔高阶模和基模之间对应的扫描时间间隔, T 表示扫描干涉仪相邻纵模对应的扫描时间间隔. 将图 3 中各模式的时间特性以已知的比例系数 k 转换为对应的频率特性, 如图 4 所示, 其中 t 对应的为横模的频率间隔 Δv , T 对应的为纵模的频率间隔 ΔV_{scan} .

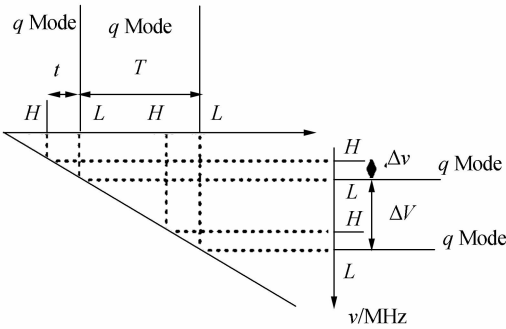


图 4 激光模式时间和频率特性转换示意图

Fig. 4 The conversion graph between time and frequency characteristic of laser Modes

上述的比例系数即 F-P 扫描干涉仪的扫描速度, 由于扫频是线性变化的, 在一个周期内扫描干涉仪频率变化为其纵模间隔, 扫描速度表示为

$$k = \frac{dv}{dt} = \frac{\Delta V_{\text{scan}}}{T} \quad (12)$$

$$\Delta V_{\text{scan}} = \frac{c}{L_{\text{scan}}} \quad (13)$$

式中 ΔV_{scan} 表示 F-P 扫描干涉仪的纵模频率间隔, L_{scan} 表示 F-P 扫描干涉仪的腔长, 于是被测模式与基模的频率间隔为

$$\Delta v = k \cdot t \quad (14)$$

式(12)~(14)中各量为已知值和测量值, 可以计算出被测模式与基模的频率间隔 Δv .

为了确定被测模式具体特征, 首先需要计算被测谐振腔纵模间隔, 可以表示为

$$\Delta V_q = \frac{c}{L_{\text{res}}} \quad (15)$$

式中 ΔV_q 表示被测谐振腔的纵模频率间隔, L_{res} 表示被

测谐振腔的腔长. 由此, 可知被测横模与基模频率间隔 Δv 占谐振腔纵模间隔的比例系数 f 为

$$f = \frac{\Delta v}{\Delta V_q} \quad (16)$$

由式(12)~(16)有

$$f = \frac{L_{\text{res}}}{L_{\text{scan}}} \cdot \frac{t}{T} \quad (17)$$

式(17)表明, 被测激光模式与基横模频率间隔与谐振腔纵模间隔比例系数与谐振腔腔长、高阶横模与基横模对应的时间间隔、相邻纵模对应的时间间隔等有关, 谐振腔腔长为已知量, t 和 T 为测试量, 可以通过示波器进行读出, 由此就可以计算 f , 再与该谐振腔对应的理论计算比例系数对比, 可以精确判断该模式是否是真实的高阶横模以及具体的阶次.

3 实验结果和分析

3.1 横模特征随电流大小变化实验与分析

对某型腔长为 360 mm, 两个球面镜的曲率半径均为 7 m 的环形样品陀螺进行了实验, 选取样品陀螺 #1 进行多模特征实验, 光阑尺寸为 1.52 mm × 1.29 mm. 根据式(11)的计算方法, 计算样品陀螺一阶横模与基模的频率间隔 Δv 占纵模间隔 ΔV_q 的比例系数 f_{th} , 取 $R = 7\,000$ mm, $L = 360$ mm, $\alpha = 45^\circ$, 结果如表 1.

表 1 腔长为 360 mm 的高阶模与基模频率间隔与纵模间隔比例系数 f 理论计算值

Table 1 The theory value of transverse mode frequency spacing scale coefficient f_{th} with cavity length 360 mm

Mode	01-00	10-00	02-00	11-00	12-00
f_{th}	0.060 6	0.087 0	0.122	0.148	0.235

实验中所用的激光电源具有电流可调节功能, 可以实现 0~3 mA 范围内的电流调节; 所用的 F-P 扫描干涉仪可以对被测谐振腔进行扫频, 其自由光谱范围 $F_{\text{sr}} = 1.5$ GHz, 分辨率 $\Delta v_{\text{FSR}} = 20$ MHz; 示波器选用 Tektronix TDS220 型, 带宽为 100 MHz, 锯齿波发生电路电压在 0~20 V 范围内可以调节, 保证示波器中能够至少同时出现两组纵模.

实验时先设一初始电流 0.2 mA, 结果发现多次引燃陀螺都不能引燃, 这说明此时腔内的增益不足以维持激光振荡, 各个模式都不能谐振; 继续增大电流, 当电流增加到 0.35 mA 时陀螺即可以引燃, 这时陀螺刚刚出光, 陀螺即可以保证基模运转, 这时腔内增益与损耗基本相等, 陀螺出光处于临界阈值状态, 这时示波器中的模式特征扫描脉冲信号 a 和 a' , 如图 5(a) 所示, 此时的电流称为该陀螺样品的阈值电流; 进一步增加电流到 0.9 mA, 图 5(a) 扫描脉冲信号 a 和 a' , 一直在加强, 见图 5(b); 当电流增加到 1.25 mA 时, 在两组模式峰前面各出现一个小尖峰 b 和 b' , 如图 5(c), 这主要是由于随着电流增加, 腔内增益也在增加, 增加到一定的

值时, 腔内增益足以让某个高阶横模也能够谐振; 继续增加电流, 该尖峰强度一直在增加; 当电流增加到 2.4 mA 时, 可以看出在出现小尖峰 b 和 b' 的前边又出现了一个小尖峰 c 和 c' , 如图 5(d) 所示, 也就是说此时腔内分配给第三个模式的增益也足以让其谐振; 当电流继续增加时, 这些模式信号强度也在进一步的增强。

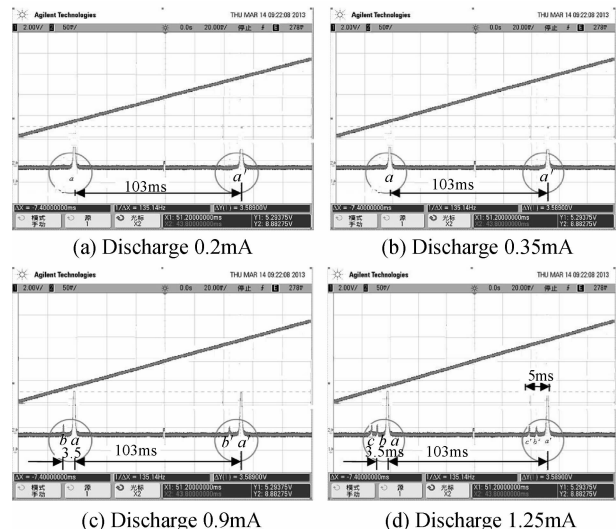


图 5 不同放电电流下环形模式特征扫描脉冲曲线
Fig. 5 The scanning graph of mode characteristics on different discharge

为了说明图 5 中出现的小尖峰的模式特征, 在示波器上分别对这几个脉冲信号之间的时间间隔进行了测量和读数. 在图 5(c) 中, 容易通过示波器测量得到相邻纵模间隔对应的时间 $T_{ax'} = 103$ ms, 高阶模与基横模频率间隔对应的时间 $T_{ab} = 3.5$ ms, 并考虑到 $L_{res} = 360$ mm, $L_{scan} = 200$ mm, 由式(17)得到被测的横模与基横模频率间隔与纵模频率间隔比例系数 $f_{m1} = 0.0612$, 对比表 1 的理论值, 发现该值与 01-00 很接近, 因此判定该模式为 TEM_{01} 模; 在图 5(d) 中在 TEM_{01} 模前面又出现了一个小脉冲信号, 同样测量得到被测高阶模与基横模频率间隔对应的时间 $T_{ca} = 5$ ms, 由式(17)得到被测的横模与基横模频率间隔与纵模频率间隔比例系数 $f_{m2} = 0.0874$, 对比表 1 的理论值, 发现该值与 10-00 很接近, 因此断定该模式为 TEM_{10} 模。

可以看出, 随着放电电流的增加, 激光陀螺腔内所振荡的横模由单一的基模逐渐转变为基模和高阶模的混合模, 通常情况下一阶横模优先起振. 因此, 为了保证激光陀螺工作在基横模状态下, 就应该保证激光陀螺在工作电流下, 陀螺的一阶横模不能出现振荡, 那么, 如何准确测量和判定激光陀螺在工作电流下的横模特征是研究的关键。

3.2 激光陀螺多模特征的测量与分析

这里对编号依次为 #2、#3 和 #4 的样品陀螺进

行了多模特征测试实验, 其光阑尺寸依次为 1.58 mm \times 1.33 mm、 1.51 mm \times 1.28 mm、 1.59 mm \times 1.34 mm, 根据激光陀螺工作时的要求, 调节激光电源放电电流为 0.8 mA, 并对锯齿波电压幅值大小进行调整, 保证示波器中能够至少同时出现两组纵模^[13], 对 3 只陀螺进行多模特征测试, 结果如图 6。

从图 6 中的扫描曲线图可以看出, 样品陀螺 #3 对应的扫描谱线图中只有两组基模, 因此, 陀螺未出现多模特征, 在 F-P 扫描干涉仪扫描速度一定的情况下, 这两组纵模对应的时间间隔 T 与相邻纵模频率间隔一一对应^[14]. 样品陀螺 #2 和 #4 的扫描结果出现了如图 5(c) 中高阶模脉冲信号, 根据前面的分析可以初步判定该陀螺出现多模振荡. 样品陀螺 #2 和 #4 在基模前面分别出现了一个小尖峰, 通过示波器进行测量和读数, 得到图 6(a) 和图 6(c) 中高阶模与基模频率间隔对应的时间间隔 $t_2 = 7.6$ ms, $t_4 = 11$ ms, 同时测量两相邻模频率间隔对应的时间间隔 $T = 224.1$ ms。

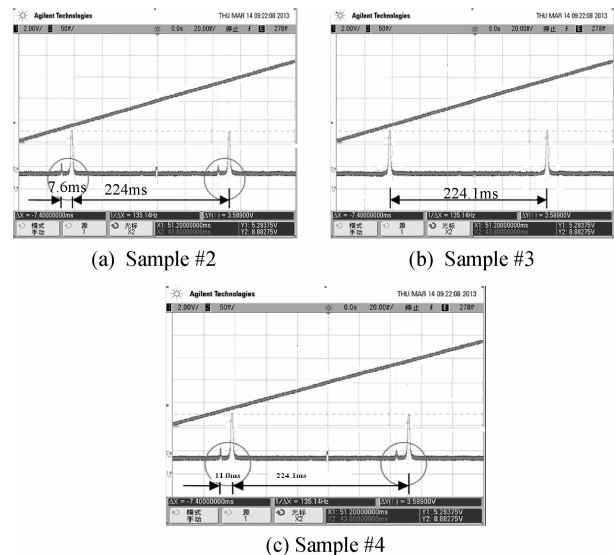


图 6 环形激光谐振腔模式特征扫描脉冲曲线
Fig. 6 The scanning graph of mode characteristics of ring laser resonator

由式(16)计算样品陀螺 #2 和 #4 中被测模式与基模频率间隔与相邻纵模频率间隔的比例系数, 计算结果如表 2。

表 2 不同样品陀螺横模频率间隔与纵模频率间隔的比例系数测量值

Table 2 The transverse mode frequency spacing and scale coefficient of different sample

Sample	Δv /MHz	f_m
#2	87.1	0.0611
#4	113	0.0883

对比表 2 中样品陀螺横模频率间隔与纵模频率间隔的比例系数测量值和表 1 中的理论计算值, 不难发现: #2 样品陀螺 01 模与 00 模频率间隔与纵模频率间隔的比例系数为 0.0611, 而理论比例系数理论值为 0.

060 7,两者非常接近,其相对误差 Δf 可以表示为

$$\Delta f = \frac{f_m - f_{th}}{f_{th}} \cdot 100\% \quad (18)$$

将相关数值代入式(18)中,计算该陀螺横模频率间隔与纵模频率间隔的比例系数测量值与理论值之间的相对误差 $\Delta f = 0.82\%$,考虑到设备测试误差和人为读数误差等,因此可以判定该模式为 01 模,同样容易得到 #4 样品陀螺模频率间隔与纵模频率间隔的比例系数测量值为 0.083 3,对比表 1 的数据发现这个测量值与 10-00 的比例系数理论值很接近,两者之间的相对误差为 1.49%,因此可以判定为 10 模。

上述 3 只陀螺在相同的工作电流下模式特征表现有所差异,这与它们的腔参量密切相关。由 3.1 中可知,陀螺的多模状态与腔内的增益和损耗大小密切相关,当某个高阶模的增益大于其损耗时,该模式就能够谐振,陀螺就会出现多模。上述 3 只样品陀螺在工作电流大小一定的情况其腔内增益大小一致,但是由于样品陀螺 #2 和 #4 的光阑尺寸明显大于样品陀螺 #3,导致样品陀螺 #2 和 #4 的衍射损耗较小,从而导致高阶模谐振。因此,在激光陀螺设计中,根据腔内增益的大小设计合适的光阑尺寸和球面镜曲率半径是保证腔内不出现多模特征的一个关键。

从本文实验结果可以看出,利用该方法可以精确测量和判定激光陀螺的多模特性,实验中测试的 3 只激光陀螺中有两只出现了多模,仅有一只未出现多模,这说明该型激光陀螺在腔参量设计与控制方面需要进一步优化和改进,才能保证其在单模状态。

3.3 测试系统误差分析

在 3.2 的实验中,横模频率间隔与纵模频率间隔的比例系数的测量值与理论值有一点的偏差,由式(11)~(13)可以得到测量横模频率间隔与示波器读数的关系为

$$\Delta v = \frac{c}{L_{scan}} \cdot \frac{t}{T} \quad (19)$$

F-P 扫描干涉仪的腔长 L_{scan} 在测试过程中基本为定值,由式(19)可知,示波器读数 t 和 T 是由人为因素引入实验误差的主要来源,故而 Δv 的误差 δ_v 可以进一步表示为

$$\delta_v = \left| \frac{c}{L_{scan}} \cdot \frac{1}{T} \right| \delta_t + \left| \frac{c}{L_{scan}} \cdot \frac{t}{T^2} \right| \delta_T = \delta_{vt} + \delta_{vT} \quad (20)$$

可以看出, δ_v 受到示波器读数 t 和 T 的读数误差 δ_t 和 δ_T 影响程度是不同的,考虑到公式中第二项 T 有平方因子,由 T 读数误差 δ_T 引起的 Δv 的误差要较 t 引起的误差小得多。取 $\delta_t = 0.1 \text{ ms}$, $\delta_T = 0.2 \text{ ms}$, $T = 224 \text{ ms}$,由式(19)计算后得到

$$\delta_v = \delta_{vt} + \delta_{vT} \approx 0.669 \text{ MHz} + 0.007 \text{ MHz} = 0.676 \text{ MHz}$$

从计算结果可知由读数误差 δ_T 引起的误差仅为由读数误差 δ_t 引起的误差的 1% 左右,通常可以忽略。

另一方面, δ_v 还受到 T 测量值大小的影响,在示波器读数准确度一定的情况下, T 越大,测试误差越小,准确度越高;若取 $\delta_t = 0.1 \text{ ms}$, $\delta_T = 0.2 \text{ ms}$, T 分别取 $T_1 = 224 \text{ ms}$ 和 $T_2 = 103 \text{ ms}$,由式(20)计算后得到 $\delta_{vt} \approx 0.67 \text{ MHz}$, $\delta_{vT} \approx 0.31 \text{ MHz}$,可见两者测试误差达到 50%。为此,为了提高测量准确度,需要采用高分辨率的 F-P 扫描干涉仪和适合的数据板卡以提高测试灵敏度^[15],同时还应该尽量使得 F-P 扫描干涉仪扫描速度慢一些,在数据测量和处理方面,应该将两组模式尽量展宽,以增加 t 读数的误差。

按照上述方法,对样品陀螺 #2 和 #4 高阶模与基模频率间隔进行多次重复性测试,结果见表 3。

表 3 样品陀螺 #2 和 #4 横模频率间隔多次测试实验结果
Table 3 The measure results of transverse mode frequency spacing of sample #2 and #4

Sample	Measured value						Mean $\Delta v_{av}/\text{MHz}$	Variance σ/MHz
	$\Delta v_m/\text{MHz}$							
#2	87.3	86.9	87.2	87.3	86.8		87.1	0.20
#4	112.9	113.5	112.7	113.2	112.9		113.0	0.31

从测量的数据看出,利用该方法测量横模频率间隔准确度可达 1 MHz,重复性优于 0.4 MHz。

4 结论

激光模式特性是激光应用过程中的一个重要特性,本文根据激光陀螺对激光模式的要求,详细推导了激光陀螺横模频率间隔及其与纵模频率间隔的理论关系,并利用 F-P 扫描干涉仪,提出一种激光横模特征的测量方法,并实时测量了某型激光陀螺谐振腔的多模特征。研究结果表明:该方法能够较为精确地完成激光模式频率间隔的测量以及模式特征的判定,测量结果与理论值基本一致,最大误差小于 2%。实验中 F-P 扫描干涉仪的频率非理想线性以及测量和读数的误差是影响测量结果的主要因素,提高 F-P 扫描干涉仪的测量准确度和测量误差可以有效地提高该方法的测量灵敏度。该方法适用于各类型激光陀螺模式特征的测定。本文的研究方法和研究结果对于激光陀螺的腔参量设计以及工艺改进具有重要的参考价值。

参考文献

- [1] LIU Xian-zhuo, WANG Shu-kui, CHEN jin-sheng, *et al.* Technology of laser measurement and application [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2003, 3(1): 95-97. 刘先卓, 王树奎, 陈锦生, 等. 激光测量技术及其应用[J]. 机械设计与制造, 2003, 3(1): 95-97.
- [2] 高伯龙, 李树棠. 激光陀螺[M]. 长沙: 中国人民解放军国防技术大学出版社, 1984.
- [3] XIE Chun-xia, DUAN Yun-feng, DONG Fa-jie. Semiconductor laser spectrum emitter [J]. *Physics Experimentation*, 2004, 24(5): 23-25. 谢春霞, 段云锋, 董法杰. 半导体激光器发射光谱实验仪[J]. 物理实验, 2004, 24(5): 23-25.
- [4] CHENG Cheng, MA Hang-chao, XU Zhou-su, *et al.*

- Measurement of temporal depending lasing modes of a high power transverse-flow CO₂ laser processor [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, **35**(4): 549-554.
- 程成,马行超,许周速,等. 高功率横流 CO₂ 激光横模随时间变化的测量[J]. 中国激光, 2008, **35**(4): 549-554.
- [5] CHEN Hong, WU Shi-kai, ZHANG Zheng-wei, *et al.* The effect of laser beam characteristics on laser processing [J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(6): 834-837.
- 陈虹,吴世凯,张正伟,等. 高功率激光光束特性对激光加工的影响[J]. 光学技术, 2006, **32**(6): 834-837.
- [6] YANG Hai-jing, WANG Yan-hua, ZHANG, Tian-cai, *et al.* Modulation free frequency stabilization of a laser based on a confocal Fabry-Perot cavity [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2006, **33**(3): 316-320.
- 杨海菁,王彦华,张天才,等. 基于共焦法布里-珀罗腔的无调制激光频率锁定[J]. 中国激光, 2006, **33**(3): 316-320.
- [7] 陈钰清,王静环. 激光原理[M]. 杭州:浙江大学出版社, 1992: 56-70.
- [8] 周炳琨,高以智,陈倜嵘,等. 激光原理[M]. 第5版. 北京:国防工业出版社, 2005: 26-27.
- [9] WANG Wen-peng, XU Zhou-su, XU Jun, *et al.* Measurement and analysis of the characteristics of transverse modes of a sealed-off He-N₂-CO₂ laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(8): 5423-5428.
- 王文鹏,许周速,徐军,等. 封离式 He-N₂-CO₂ 激光器横模特性的测量与分析[J]. 物理学报, 2009, **58**(8): 5423-5428.
- [10] LEI Yin-sheng, WANG Nuo. Analysis of laser modes and determination of the intermode spacing [J]. *Journal of Northwest University*, 1981, **16**(1): 6-11.
- 雷印生,王诺. 激光的模式分析与模间距的测定[J]. 西北大学学报, 1981, **16**(1): 6-11.
- [11] ZHANG Jing, WANG Run-lin, MA Hong-liang, *et al.* Investigation of frequency tuning characteristics of LD-pumped single frequency ring Nd:YVO₄ lasers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(4): 473-477.
- 张靖,王润林,马红亮,等. LD泵浦环形单频 Nd:YVO₄ 激光器的频率调谐特性研究[J]. 光子学报, 2001, **30**(4): 473-477.
- [12] JING Yong-xing, SHEN Wei-min, SHAO Zhong-xing. Measuring the laser longitudinal mode based on the confocal resonator [J]. *Physics Experimentation*, 2007, **27**(7): 31-33.
- 金永兴,沈为民,邵中兴. 基于 F-P 的激光器纵模测量实验装置[J]. 物理实验, 2007, **27**(7): 31-33.
- [13] QU Yan-ling, ZHANG Ping, WANG Li-mei, *et al.* The research to the experiment of mode of He-Ne laser instrument [J]. *Journal of Dezhou University*, 2010, **26**(4): 19-21.
- 曲艳玲,张萍,王丽梅,等. 基于 He-Ne 激光器模式分析实验研究[J]. 德州学院学报, 2010, **26**(4): 19-21.
- [14] CHEN Rui-qiang, JIANG Yue-song. Method of measurement on time-interval in pulsed laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(2): 99-104.
- 陈瑞强,江月松. 脉冲激光测距的时间间隔测量方法[J]. 光学学报, 2013, **33**(2): 99-104.
- [15] YANG Cheng-wei, CHEN Qian-song, LIN Yan, *et al.* Measurement on time-interval in pulsed laser ranging and error ansys [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, **32**(2): 123-126.
- 杨成伟,陈千颂,林彦,等. 脉冲激光测距时间间隔测量及误差分析[J]. 红外与激光工程, 2003, **32**(2): 123-126.