

谐振腔应力对全反射棱镜式激光陀螺输出光强分布特性影响

刘健宁^{1,2} 蒋军彪² 连天虹¹ 钟 聪² 何晓莉²

(¹ 西安电子科技大学技术物理学院, 陕西 西安 710071)

(² 西安北方捷瑞光电科技有限公司, 陕西 西安 710111)

摘要 在全反射棱镜式激光陀螺中, 谐振腔应力的来源较复杂, 应力过大将影响陀螺精度。基于棱镜材料在应力作用下介电常数变化, 利用琼斯矩阵和弹光效应理论, 系统研究了应力双折射效应对陀螺实际输出的影响, 计算获得棱镜布儒斯特角位置反射光、透射光的能量场分布, 解释了反射光斑中出现干涉条纹的原因。通过改变应力场分布函数, 具体模拟棱镜与腔体光胶面内存在均匀梯度应力场、集中点应力场、复杂应力场时棱镜反射光强分布情况。进行相关实验验证了模拟结果的正确性, 提出设计了一种工程化的棱镜及相关产品应力检测工装。

关键词 相干光学; 应力检测; 环形激光器; 干涉光斑

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1102003

Intensity Distribution Properties of Output Light in Total Reflection Prisms Laser Gyro with Cavity Stresses

Liu Jianning^{1,2} Jiang Junbiao² Lian Tianhong¹ Zhong Cong² He Xiaoli²

(¹ School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

(² North Jierui Opto-Electronics Technology Limited Company, Xi'an, Shaanxi 710111, China)

Abstract The sources of cavity stress in total reflection prisms laser gyro are complex, and strong stress may seriously affect the gyro's accuracy. Based on the prism material dielectric constant change under stress, the effect of stress-birefringence on the gyro output is analyzed systematically by using Jones matrix and the elastic-optic effect theory. The energy distributions of the reflected and transmitted light are obtained at Brewster angle, and the explanation of the reflected interference speckle is given. The reflected light intensity is simulated corresponding to uniform gradient, point concentration and complex stresses fields between the prism and cavity. The related experimental results agree with the simulation. An engineered equipment for prism and other correlates stress detection is designed.

Key words coherence optics; stress detection; ring laser; interference speckle

OCIS codes 140.3370; 140.3430; 230.5480

1 引言

全反射棱镜式激光陀螺 (TRPLG)^[1-2] 是一种以全反射棱镜式气体激光器^[3] 为核心器件的高精度测角速度传感器。在激光陀螺的诸多误差中, 由应力引入的误差不能忽略^[4]。应力的主要来源有: 1)

腔镜材料内部缺陷导致的内应力; 2) 光学件加工后存在的恢复力; 3) 腔镜与腔体光胶表面, 由于微面形不平整以及不当装配产生的残余应力; 4) 为回避激光陀螺锁区, 机械抖动偏频造成的应力, 等等。应力存在于陀螺光路上, 将影响谐振腔内顺、逆时针光

收稿日期: 2013-05-15; 收到修改稿日期: 2013-06-20

基金项目: 国际科技合作专项项目(2012DFR70370)

作者简介: 刘健宁(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事光电技术方面的研究。E-mail: liu.j.n._@163.com

导师简介: 蒋军彪(1962—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事惯性技术方面的研究。

E-mail: jrcompany@163.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

行波相移的均匀性,是陀螺综合误差的主要来源之一^[1],所以针对激光陀螺谐振腔应力的分析与控制非常重要。对于棱镜式激光陀螺,全反射棱镜(TRP)在应力作用下将产生双折射效应,光路损耗增加引起陀螺精度下降,严重时甚至导致陀螺失效。文献[2]讨论了这种激光陀螺在抖动应力下光强幅值受到调制的现象。文献[5]讨论了一种克服高、低温下应力影响造成陀螺输出光强幅度减弱的方案。而激光陀螺作为高精度相干检测器件,是通过检测顺、逆时针光束的干涉条纹进行工作的,谐振腔内部光能量的分布决定着干涉条纹的明晰度以及陀螺精度,而目前针对陀螺应力与光强分布关系的研究尚不多见。

本文从 TRP 材料受应力作用产生双折射效应出发,理论计算 TRP 受应力调制的光强分布,分析研究反射光斑中产生干涉条纹的机理。依据理论计算,利用 Matlab 软件模拟存在不同应力场:包括均匀梯度应力场、带角度的集中点应力场、以及复杂应力场条件下,反射光的能量分布状态,进而提出一种通过反射光干涉条纹疏密反映应力梯度,条纹方向反映应力方向的应力检测方法,并依据理论分析设计了一种工程化的棱镜应力检测工装。

2 TRPLG 的光路设计

这里研究的 TRPLG 光路设计如图 1 所示,4 块 TRP 光胶在腔体的对应位置。谐振腔内的振荡光以布儒斯特角 θ_b 入射 TRP,这样设计的目的是为了避免谐振腔内存在椭圆偏振光。椭圆偏振光引起法拉第效应,使 TRP 对外界磁场敏感,造成光在 TRP 中产生电磁非互易,增加激光器损耗,影响陀螺精度。所以在光路设计时利用 s 态偏振光在布儒斯特表面上反射损耗较大的特点,使 s 态偏振光

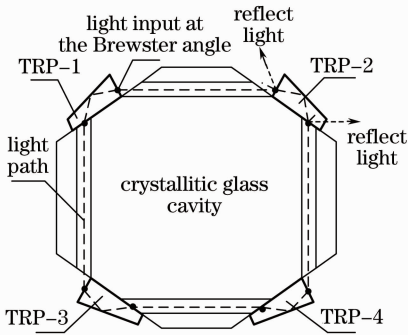


图 1 棱镜式激光陀螺光路简图

Fig.1 Sketch of laser gyro with prisms

在谐振腔内不起振,从而保证谐振腔内振荡光束的 p(线)偏态。理论上,在 4 块 TRP 组成的环腔内,相当于放置了 8 片布儒斯特窗(图 1 光路中点标注位置均为布儒斯特角入射),腔内光束线偏振度很高。但实际中,TRPLG 腔内振荡光束仍具有一定椭圆偏度,主要原因是谐振腔存在的应力导致双折射效应,而这部分损耗对陀螺精度的影响不能忽略。下面分析应力双折射效应的具体影响。

3 应力对光能量的调制

应力双折射对谐振腔的影响直接体现在对振荡光强度分布的调制上。实际中,发现部分谐振腔的个别 TRP 布儒斯特角反射光出现条纹,通过实验及分析,确定干涉条纹与谐振腔应力相关。具体理论分析从 TRP 材料的介电常数出发,TRP 的材料熔融石英属于各向同性介质,在折射率椭球主轴坐标系中,其介电张量可以表示为

$$\xi = \begin{pmatrix} n_{xx}^2 & n_{xy}^2 & n_{xz}^2 \\ n_{xy}^2 & n_{yy}^2 & n_{yz}^2 \\ n_{xz}^2 & n_{yz}^2 & n_{zz}^2 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中 $n_{xx}, n_{yy}, n_{zz}, n_{xy}, n_{xz}, n_{yz}$ 是折射率分量。由于弹光效应,熔融石英的折射率将随着所受应力的改变而变化。折射率 n 变化和应力 σ 的关系表示为

$$\begin{pmatrix} n_{xx} \\ n_{yy} \\ n_{zz} \\ n_{xy} \\ n_{xz} \\ n_{yz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_{xx0} \\ n_{yy0} \\ n_{zz0} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} C_1 & C_2 & C_2 & 0 & 0 & 0 \\ C_2 & C_1 & C_2 & 0 & 0 & 0 \\ C_2 & C_2 & C_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

式中

$$C_1 = n_0^3(p_{11} - 2\beta p_{12})/(2E), \quad (3)$$

$$C_2 = n_0^3[p_{12} - \beta(p_{11} + p_{12})]/(2E), \quad (4)$$

$$C_3 = n_0^3 p_{44}/(2G), \quad (5)$$

E, β, G 分别为材料的弹性模量、泊松比、切变模量; p_{11}, p_{12}, p_{44} 是材料应变光学常数。可见,对于确定的材料 C_1, C_2, C_3 是常数。

为了研究方便,假设光沿着 z 方向传播,只考虑与 z 方向垂直的 $x-y$ 平面内折射率随应力分布改变的问题,忽略 n_z ,将(3)~(5)式代入(2)式中,得到 n_x, n_y 为

$$n_x = n_{x_0}(x, y) - C_1 \delta_x(x, y) - C_2 [\delta_y(x, y) + \delta_z(x, y)], \quad (6)$$

$$n_y = n_{y_0}(x, y) - C_1 \delta_y(x, y) - C_2 [\delta_x(x, y) + \delta_z(x, y)], \quad (7)$$

式中 $n_{x_0}(x, y)$ 、 $n_{y_0}(x, y)$ 是无应力时的折射率, 对于各向同性的熔融石英无应力时, 有 $n_{x_0}(x, y) = n_{y_0}(x, y)$ 。取 x, y 两方向上折射率的差, 记为主折射率差, 可表示为

$$\Delta n = n_x - n_y = -(C_1 - C_2) [\delta_x(x, y) - \delta_y(x, y)]. \quad (8)$$

可见, 熔融石英在应力的作用下变为双折射介质, 主折射率差与主应力差成正比, 折射率在主轴坐标方向上是与应力分布相关的函数。折射率沿着主轴方向上大小不同, 将造成线偏振光分裂为 e_1 光、 e_2 光, 且它们在 TRP 中的传播速度不同, 这将造成它们在到达 z 方向某位置时, 能量分布受到调制。

进一步建立分析模型如图 2 所示, 假设激光器出射光依次通过理想无应力、有应力、理想无应力、共计 3 块 TRP。谐振腔内振荡光反复经过 TRP 布儒斯特窗透射, 是 p 态线偏振光, 假设其振动矢量为 $\mathbf{E}_p = \mathbf{a} \cdot \sin \omega t$ 。该光束依次通过无应力影响的 TRP-1, 偏振态不发生变化, 继续入射到受应力影响、厚度为 h 的 TRP-2 上, 在入射表面 A 点由于应力双折射效应, 沿着 A 点主应力方向 x, y 分解为两束正交的偏振光 \mathbf{E}_1 和 \mathbf{E}_2 , 如图 2(b) 所示。这两束光通过 TRP-2, 由于应力作用在 TRP 中传播速度不同, 在 TRP-2 的出射面 B 点处转为 \mathbf{E}'_1 和 \mathbf{E}'_2 , 如图 2(c) 所示。最后, 这两束线偏振光通过理想无应力的 TRP-3 后, 光的振幅矢量变为 \mathbf{E}''_p 。需要说明的是: 由于 TRP-2 存在应力双折射效应, 即使线偏振光入射该棱镜, 出射光也不再是线偏振状态。在这

种情况下, 对于理想的 TRP-3, 即便棱镜加工角度仍为布儒斯特角, 其透射光中的 s 偏振分量也不再为 0。以下为了分析方便, 仍将 TRP-3 的出射光视为 p 线偏振态。

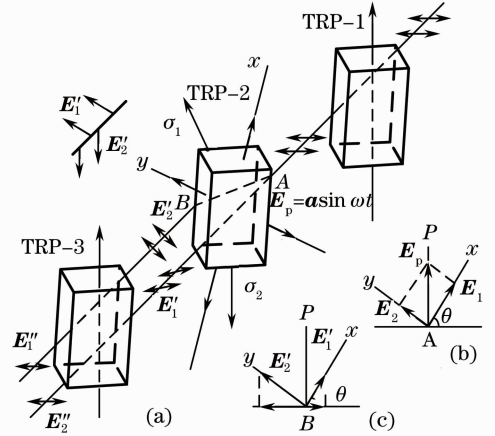


图 2 分析模型示意图。(a) 分析模型; (b) A 点光偏振状态; (c) B 点光偏振状态

Fig. 2 Model of analysis. (a) Model; (b) light polarization at A point; (c) light polarization at B point

按照光矢量复振幅的琼斯向量和琼斯矩阵算法^[6], 可得

$$\mathbf{E}''_p = \mathbf{P}_0 \cdot \mathbf{J} \mathbf{P}_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \mathbf{E}_0, \quad (9)$$

式中 $[1, 0]^T \cdot \mathbf{E}_0$ 表示谐振腔内振荡光多次经布儒斯特角透射, 为 p 态线偏振光的琼斯向量; $\mathbf{P}_0 \cdot \mathbf{J} \cdot \mathbf{P}_0$ 分别表示理想的无应力 TRP-1, 受应力 TRP-2, 理想的无应力 TRP-3 的琼斯矩阵, 具体表示为

$$\mathbf{P}_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{J} = \begin{bmatrix} n & -m \\ m & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(i\delta_1) & 0 \\ 0 & \exp(i\delta_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n & m \\ -m & n \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中 n, m 分别表示 $\cos \theta$ 和 $\sin \theta$ 。从 TRP 沿着光源的方向看, 在第一象限内主应力方向和水平方向的夹角定义为 θ 。将(10)式代入(9)式中, 得到出射光的复振幅

$$\mathbf{E}''_p = \begin{bmatrix} n^2 \exp(i\delta_1) + m^2 \exp(i\delta_2) \\ 0 \end{bmatrix} \mathbf{E}_0. \quad (11)$$

其对应的光强为

$$I = \mathbf{E}''_p^* \cdot \mathbf{E}''_p = E_0^2 \cdot [n^2 \exp(-i\delta_1) + m^2 \exp(-i\delta_2) \quad 0] \begin{bmatrix} n^2 \exp(i\delta_1) + m^2 \exp(i\delta_2) \\ 0 \end{bmatrix} =$$

$$I_0 [n^4 + n^2 m^2 \exp[-i(\delta_1 - \delta_2)] + n^2 m^2 \exp[i(\delta_2 - \delta_1)] + m^4] =$$

$$I_0 [(\cos^2 \theta + \sin^2 \theta)^2 - 2 \cos^2 \theta \cdot \sin^2 \theta + 2 \cos^2 \theta \cdot \sin^2 \theta \cdot \cos^2(\delta_1 - \delta_2)] = I_0 \left(1 - \sin^2 2\theta \cdot \sin \frac{\delta}{2} \right), \quad (12)$$

式中 $I_0 = E_0^2$ 。熔融石英在单方向应力作用下表现出单轴晶体的特性,为了方便计算,在 x, y 主轴方向上将熔融石英仍然近似认为是单轴晶体,主应力方向取 e_1 光和 e_2 光的振动方向。在应力确定的条件下, $\sin^2 2\theta$ 可看作常数。 $\delta = \delta_1 - \delta_2$ 表示应力双折射光束的相位差,当应力确定时 δ 是定值。

由此可见,在沿着 z 方向的某位置,TRP 透射光强将随着应力大小的变化(即 δ 取不同值)出现明、暗交替变化的现象^[7]。同时,考虑到应力分布一般具有非均匀性,在垂直于 z 轴的平面内,受到非均匀分布应力的影响,光强将不再是均匀的高斯型分布,光斑能量表现出强、弱非均匀分布。由于反射光强为总能量与透射光强之差,所以反射光与透射光强度分布正好相反,具备类似的规律。

选取图 1 中 TRP-2 为研究对象,其光路如图 3 所示。对于在谐振腔内顺时针方向运转的光束,在每个 TRP 上有两个布儒斯特角对应反射光透出腔外。建立简化分析模型如图 4 所示,这里需要考虑光入射 TRP 时的入射角度,根据双折射定律,此时 TRP 中双折射波矢方向 k' 和 k'' 不再相同,它们在晶体中的相位差为

$$\delta = 2\pi \left(\frac{AC''}{\lambda''} + \frac{C'D}{\lambda} - \frac{AC'}{\lambda'} \right), \quad (13)$$

即

$$\delta = 2\pi h \left[\frac{1}{\cos \theta'_i} \left(\frac{1}{\lambda''} - \frac{\sin \theta_i \sin \theta''_i}{\lambda} \right) - \frac{1}{\cos \theta'_i} \left(\frac{1}{\lambda'} - \frac{\sin \theta_i \sin \theta'_i}{\lambda} \right) \right], \quad (14)$$

式中 θ_i 是光入射 TRP 的入射角; θ'_i 和 θ''_i 分别为两折射光在 TRP 内的折射角。

根据折射定律,分别用 $\sin \theta''_i/\lambda''$ 和 $\sin \theta'_i/\lambda'$ 替换 $\sin \theta_i/\lambda$,并考虑应力双折射波长与入射光波长存在关系: $\lambda' = \lambda/n'$; $\lambda'' = \lambda/n''$, n' 和 n'' 分别为两折射光在 TRP 中的折射率,可得

$$\delta = 2\pi h \left(\frac{\cos \theta''_i}{\lambda''} - \frac{\cos \theta'_i}{\lambda'} \right) = \frac{2\pi h}{\lambda} (n'' \cos \theta''_i - n' \cos \theta'_i). \quad (15)$$

由于 $|n'' - n'| \ll n', n'', |\theta''_i - \theta'_i| \ll \theta'_i, \theta''_i$, 取近似 $n'' \cos \theta''_i - n' \cos \theta'_i = d(n \cos \theta_i) =$

$$(n'' - n') \left(\cos \theta_i - n \sin \theta_i \frac{d\theta_i}{dn} \right), \quad (16)$$

式中 n 是 n' 和 n'' 的均值, θ_i 是 θ'_i 和 θ''_i 的均值。将折射定律 $\sin \theta_i = n \sin \theta_i$ 微分,代入(16)式,可得

$$n'' \cos \theta''_i - n' \cos \theta'_i = \frac{1}{\cos \theta_i} (n'' - n'). \quad (17)$$

式中 $AC' = h/\cos \theta'_i$; $AC'' = h/\cos \theta''_i$; $C'D = C'C' \sin \theta_i = h \sin \theta_i (\tan \theta'_i - \tan \theta''_i)$; h 为 TRP 沿光传播方向的厚度; λ' 和 λ'' 分别为两折射光在 TRP 中的波长, λ 为激光在空气中的波长。

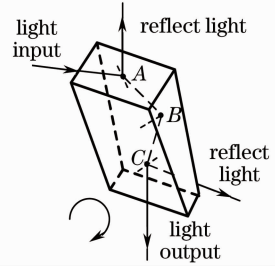


图 3 单棱镜光路示意图

Fig. 3 Light path of single TRP

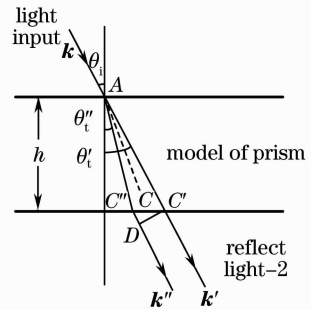


图 4 光线斜入射 TRP 分析模型

Fig. 4 Model of light tilted input TRP

所以,由应力双折射产生的两折射光波的光程差为

$$\delta = \frac{2\pi h}{\lambda \cos \theta_i} (n'' - n'), \quad (18)$$

式中 $h/\cos \theta_i$ 是 TRP 中两波法线的平均几何路程,即图 4 中 \overline{AC} 表示的几何程长,将(18)式代入(12)式,可得

$$I = I_0 \left\{ 1 - \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left\{ \frac{\pi h [n''(x, y) - n'(x, y)]}{\lambda \cos \theta_i} \right\} \right\}. \quad (19)$$

(19)式是考虑到光束斜入射 TRP,折射光的光强分布表达式。根据(8)式获得的结论:熔融石英在应力作用下,在垂直于 z 轴的平面内主折射率差与主应力差成正比,所以, $n'(x, y)$ 和 $n''(x, y)$ 在垂直于 z 轴的平面内是与应力分布 $\delta(x, y)$ 相关的函数,比例因数是熔融石英的弹光系数。进一步(19)式可以写成

$$I = I_0 \left\{ 1 - \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left[\frac{\pi h \cdot \alpha \cdot \delta(x, y)}{\lambda \cos \theta_i} \right] \right\}, \quad (20)$$

式中 α 是 TRP 材料的弹光系数, $\delta(x, y)$ 是应力分布函数。从(20)式可以得出, 由于光强分布和应力在 x - y 平面内的位置坐标有关, 即光强在不同位置坐标处出现与应力分布函数相关的强弱分布, 所以在 x - y 平面内反射光斑中出现干涉条纹。理论上, 代入不同的应力分布函数, 能够得到在此应力分布下反射光强受调制的结果。通过模拟计算, 发现这些干涉条纹的具体分布包含着应力分布的信息, 下面就一些具体的应力场分布情况进一步模拟说明。

4 模拟计算

考虑到不同来源的应力通过弹光效应影响陀螺输出光强度分布的原理基本一致, 为了说明问题方便, 在下面的模拟计算和对比实验中, 通过在 TRP 与腔体间引入光胶装配残余应力验证。这种陀螺的 TRP 和腔体通过光胶聚合在一起, 要求光胶面面型精度优于 30 nm, 粗糙度小于 1 nm, 表面晶格排布完整, 尽可能消除加工损伤层, 综合达到超光滑表面^[5]。就实际工程而言, 由于光学加工及装配环境的限制, TRP 及腔体表面不可避免地存在划痕、疵病、微颗粒, 造成光胶困难。为了完成光胶操作, 装配人员将施加某个固定方向的力, 该力将在光胶面内造成残余应力。实验发现, 光胶面内的残余应力相比较 TRP 材料内应力和光学加工后的恢复力, 对陀螺的影响更大。

根据文献[8], 弹性力学^[9-10]平面问题可以归

结为求解一个双调和方程, 在直角坐标系下该方程可表示为

$$\frac{\partial^4 \sigma}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \sigma}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \sigma}{\partial y^4} = 0, \quad (21)$$

式中应力分布函数 $\sigma(x, y)$ 是 x, y 的函数, 将其分离变量, 记为: $\sigma(x, y) = f(x) \cdot f(y)$ 。代入(21)式, 则可将求解偏微分方程转化为求解常微分方程。利用这个方法可以确定一些简单的应力分布函数。

例如: 带角度的集中点应力场分布可表达为

$$\sigma(x, y) = \frac{A}{6}xy^3 + y(Bx^3 + Cx^2 + Dx) + (Fx^3 + Gx^2), \quad (22)$$

式中 A, B, C, D, F, G 是系数^[8]。它们的取值影响应力梯度分布的疏密以及应力的方向(F, G 的取值影响应力方向)。下面通过均匀梯度应力场、带角度的集中点应力场、复杂应力场举例说明应力场分布与反射光斑干涉条纹间的关系。

4.1 均匀梯度应力场

均匀梯度应力场分布如图 5 所示, 干涉条纹计算结果如图 6 所示。

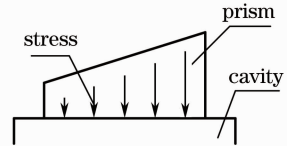


图 5 光胶面梯度应力场示意图

Fig. 5 Sketch of uniform gradient stresses in optical contact zone

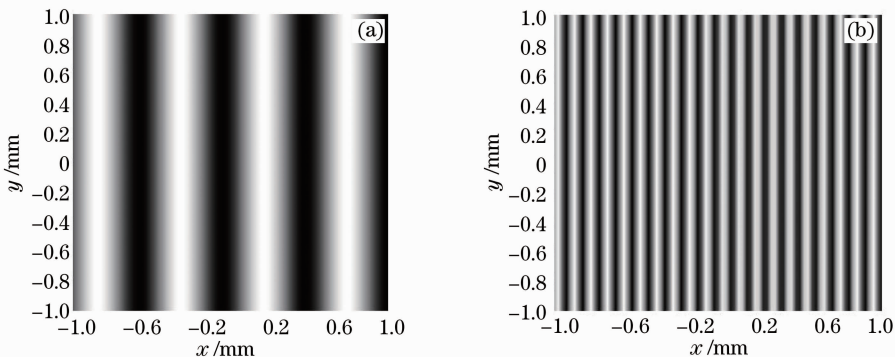


图 6 梯度应力场对应光斑干涉图。(a) 小梯度干涉条纹; (b) 大梯度干涉条纹

Fig. 6 Interference speckle under gradient stress. (a) Small gradation; (b) big gradation

在光胶面内均匀梯度应力场的作用下, 干涉光斑是均匀分布的条纹, 条纹宽度、间距与应力场梯度的变化速率成相关, 应力梯度变化快, 条纹密集; 应力梯度变化慢, 条纹稀疏。

4.2 带角度的集中点应力场

带角度的集中点应力场分布如图 7 所示, 干涉

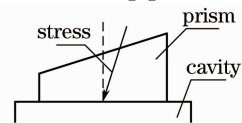


图 7 光胶面集中点应力场示意图

Fig. 7 Sketch of point concentration stresses in optical contact zone

条纹计算结果如图 8 所示。

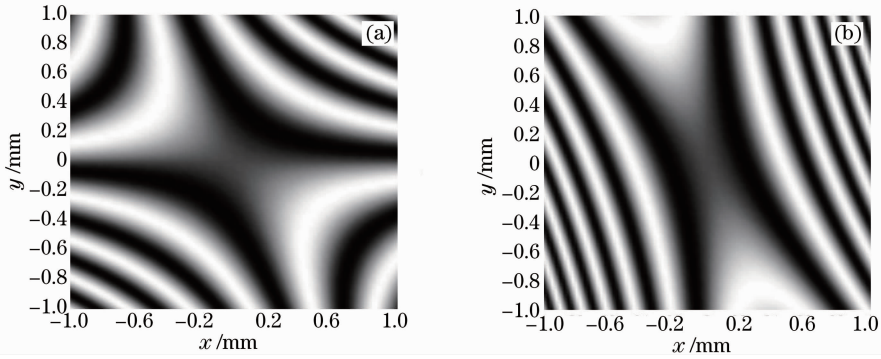


图 8 集中点应力场对应光斑干涉图。(a) 斜 45°力场干涉条纹；(b) 斜 60°力场干涉条纹

Fig. 8 Interference speckle under point stress. (a) 45° tilted stress; (b) 60° tilted stress

假设矩形光胶面的中央存在点应力,且该应力与光胶面法线方向有一定角度,图 8(a)是该角度为 45°时的干涉光斑图,图 8(b)是该角度为 60°时的干涉光斑图。可见,在集中点应力场作用下,干涉光斑沿着应力在光胶面的投影方向分布。

4.3 复杂应力场

复杂应力场^[11]分布如图 9 所示,干涉条纹计算

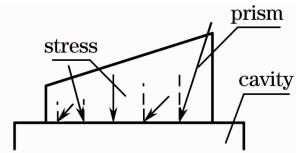


图 9 光胶面复杂应力场示意图

Fig. 9 Sketch of complex stresses in optical contact zone
结果如图 10 所示。

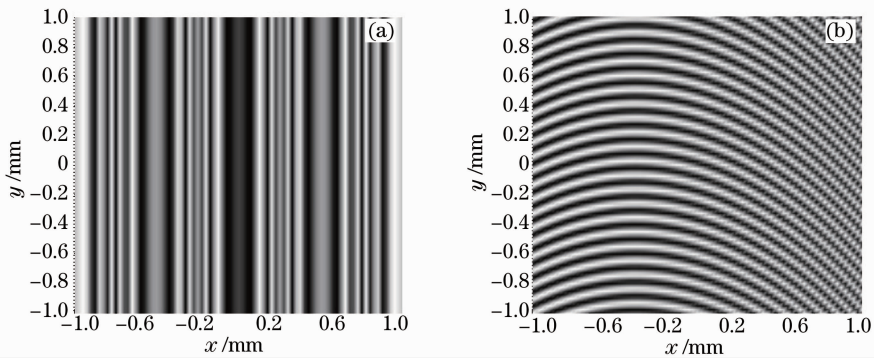


图 10 复杂应力场对应光斑干涉图。(a) 干涉光斑-1；(b) 干涉光斑-2

Fig. 10 Interference speckles under complex stresses. (a) Interference speckle-1; (b) interference speckle-2

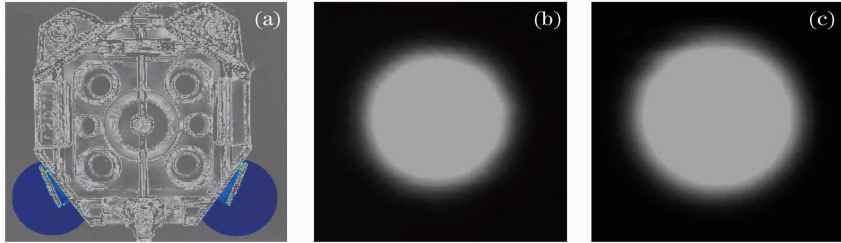
若光胶面内存在方向垂直于光胶面,仅大小不等的应力场,其干涉光斑如图 10(a)所示,为明、暗相间的竖直条纹,但条纹间距不等。若光胶面内存在方向、大小完全随机分布的应力场,其干涉光斑如图 10(b)所示,随着应力分布函数的选取,干涉光斑的图样也随着改变。

综上所述,通过干涉条纹的形态,可以基本确定应力场的类型;通过条纹间距,可以确定应力梯度大小,从而间接确定应力大小;通过条纹的方向,可以确定应力方向,这对应力过大的谐振腔进行针对性返修有指导意义。为了验证上述对应力的认识,下面通过实验比较同一谐振腔在不同应力条件下反射光斑的图样,验证谐振腔应力对陀螺输出光强分布

5 实验验证

实验选取一个合格腔体及与该腔体匹配的 TRP,操作人员通过控制擦拭光胶区的次数,即控制光胶区的洁净度,从而控制在光胶面引入不同大小的应力。如果光胶面擦拭次数少,在光胶过程中,操作人员需要施加较大的力,这将造成棱镜内存在较大的残余应力。如果保证了适当的擦拭次数,光胶区洁净度满足要求,则只需将腔体和 TRP 轻轻靠在一起,就能通过分子间的吸附力瞬间完成光胶,从而使棱镜内残余应力较小。图 11(a)是按照上述方法装配,并利用偏光计检测 TRP 内部残余应力较小

的情况,其中腔体两侧圈中的 TRP 在偏光计下呈现蓝色,表明残余应力较小[对比图 12(a)]。腔体其余部分由于存在不透明部件,故偏光计无法检测应力。图 11(b)、(c)分别是用 CCD 实测的图 11(a)中左、右两侧 TRP 布儒斯特角反射光斑的能量分布情



况。可见,在谐振腔小应力状态下反射光斑的能量分布趋于均匀。实际中需要通过检测反射光斑能量分布的均匀性,挑选不同加工批次的 TRP 与待装配腔体进行匹配,本质上是匹配 TRP 与腔体光胶面微面型,减小谐振腔装配残余应力。

图 11 实测 TRP 应力较小的情况。(a) 偏光仪实测棱镜应力情况;(b) 左侧 TRP 应力光斑;(c) 右侧 TRP 应力光斑
Fig. 11 Measured situation of small stresses in prisms. (a) Stresses in prisms detected by polarimeter;
(b) speckle detected from left prism; (c) speckle detected from right prism

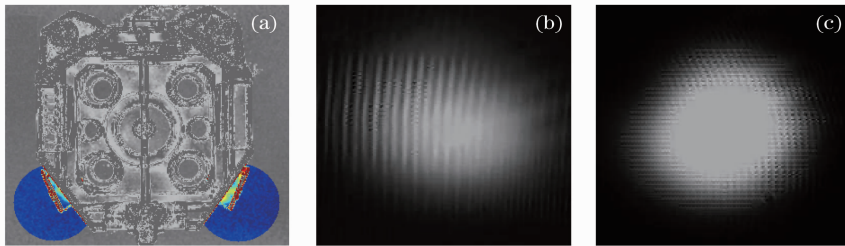


图 12 实测 TRP 应力较大的情况。(a) 偏光仪实测棱镜应力情况;(b) 左侧 TRP 单方向应力光斑;
(c) 右侧 TRP 复杂方向应力光斑

Fig. 12 Measured situation of large stresses in prisms. (a) Stresses in prisms detected by polarimeter; (b) speckle under the single direction stresses detected from left prism; (c) speckle under the complex directions stresses detected from left prism

图 12(a)是偏光计实测光胶面擦拭次数较少,TRP 存在较大应力时的情况,可见两侧 TRP 在偏光计下呈现青绿色甚至红色,右侧 TRP 应力大于左侧 TRP。图 12(b)、(c)分别是在此情况下采集到的左、右两侧 TRP 的反射光斑。在装配大应力情况时,装配人员人为控制应力的方向,左侧 TRP 装配时施加单一方向的应力,右侧 TRP 装配时施加的两个垂直方向的应力。因此,图 12(b)、(c)分别对应着图 6 均匀梯度应力场情况以及图 10 复杂应力场情况的模拟结果,实测光斑图样与模拟结果基本一致。

图 13 是经由谐振腔的合光棱镜检测的腔体在小应力、大应力不同状态下的合光光斑。由图 13 对比可见,在谐振腔小应力情况下,陀螺合光光斑中央暗条纹明晰,光斑能量对称均匀分布。在谐振腔大应力情况下,到达合光面的顺、逆时针光束能量分布受到应力分布的调制,合光光斑带毛刺,中央暗条纹边缘的明晰度不理想,这会对激光陀螺工作时光电探测器条纹计数造成一定的影响。对于精度要求较高的陀螺,好的合光光斑是稳定工作的必要条件,如

果谐振腔内部存在应力,在环境温度变化的情况下,应力的变化方向、变化量都不确定,严重时甚至破坏陀螺的正常工作。所以,设计适合工程应用的应力检测装置,对高精度 TRPLG 的研究有重要意义。

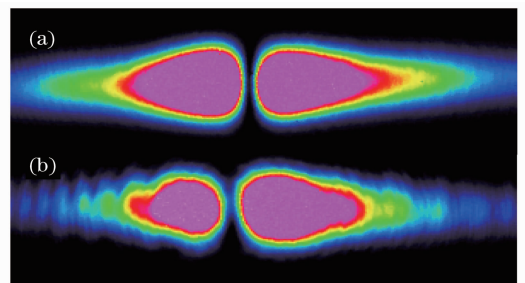


图 13 实测不同应力下陀螺合光输出光斑。
(a) 小应力情况;(b) 大应力情况

Fig. 13 Measured laser gyro's combination speckle in different stresses situations. (a) Small stresses situation; (b) large stresses situation

6 工程化应用

传统的偏光计只能用于检测透明或半透明的平面

零件,通过观察双折射线颜色近似地评估应力在被测物件中的位置和大小。受到双折射线方向性的制约,检验者从不同方向看,往往观察到的颜色不同,检测结果受主观影响较大。另外,高精度偏光计价格高昂,在微应力检测方面,偏光计精度往往不满足要求。

依据上述理论分析及实验结果,设计了棱镜应力^[12]检测工装,该工装的突出特点是直接反映棱镜光路上应力分布的情况,利用相干光检测精度较高。基本方案是利用激光器、多个标准棱镜或反射镜与待检棱镜构成环形光路,保证光束依布儒斯特角入射标准棱镜及待检棱镜,通过对布儒斯特角反射光椭圆偏度及光能量分布的检测,反映待检棱镜的应力状态。设计检测工装如图 14 所示。为了配合这套检测工装,设计了不同光束转角的标准棱镜如图 15 所示,要求标准棱镜的光入射角均为布儒斯特角,标准棱镜可与待检棱镜配合组成环形光路。这套系统已申请专利,在实际的全反射棱镜生产中使用,表现出较好的筛选效果。

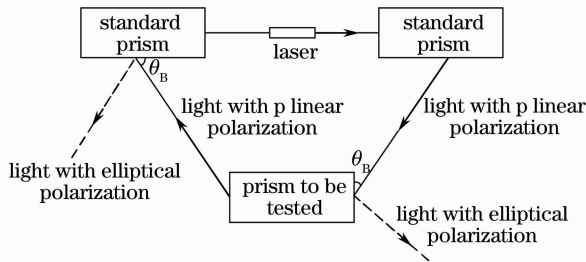


图 14 棱镜应力检测装置示意图

Fig. 14 Sketch of prism stress detection

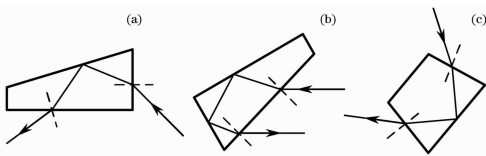


图 15 标准棱镜示意图。(a) 90°转角棱镜;
(b) 180°转角棱镜;(c) 60°转角棱镜

Fig. 15 Sketch of standard prism. (a) Prism makes beam rotate 90°; (b) prism makes beam rotate 180°; (c) prism makes beam rotate 60°

7 结 论

谐振腔应力将改变 TRP 材料各向同性的光学特性,引起弹光效应并造成谐振腔振荡光能量的非均匀分布,谐振腔应力严重时将破坏陀螺的正常工作。通过对谐振腔 TRP 反射光斑的筛选,可以准确确定存在较大应力的 TRP,可以指导 TRP 和腔体微面型的互补匹配。根据反射光斑中干涉条纹的间距及方向

能够判断应力梯度分布的大小及方向,指导操作人员按照应力的反方向返修,针对应力控制方案的研究对进一步提高这种激光陀螺的精度有重要意义。

参 考 文 献

- 1 Y V Bakin, G N Ziouzev, M B Lioudimirski. Laser Gyros with Total Reflection Prisms [R]. Optical Gyros and Their Application, 1999.
- 2 Yao Chengkang, Zeng Xiaodong, Cao Changqing. Intensity properties of output light in prism laser gyro with mechanical dither bias[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(9): 094216. 姚呈康, 曾晓东, 曹长庆. 机械抖动棱镜式激光陀螺出射光强度特性[J]. 物理学报, 2012, 61(9): 094216.
- 3 Liu Jianning, Jiang Junbiao, Shi Shunxiang, et al.. Analysis of total reflection prism ring laser's output characteristic and gyroscope's accuracy [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0102002. 刘健宁, 蒋军彪, 石顺祥, 等. 全反射棱镜式环形激光器合光输出及陀螺精度特性分析[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0102002.
- 4 Jin Shilong, Long Xingwu, Wang Fei, et al.. Technology research for ring laser gyro to overcome the environmental temperature variation [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(3): 409-410. 金世龙, 龙兴武, 王 飞, 等. 激光陀螺克服高、低温冲击技术研究[J]. 光学学报, 2006, 26(3): 409-410.
- 5 Ma Zhanlong, Liu Jian, Wang Junlin. Development and application of ultra-smooth optical surface polishing technology [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(8): 082202. 马占龙, 刘 健, 王君林. 超光滑光学表面加工技术发展及应用[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(8): 082202.
- 6 Shi Shunxiang, Zhang Haixing, Liu Jinsong. Physical Optics and Applied Optics [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2000. 230-231. 石顺祥, 张海兴, 刘劲松. 物理光学与应用光学[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000. 230-231.
- 7 Liao Yanbiao. Polarization Optics [M]. Beijing: Science Press, 2003. 140-142. 廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003. 140-142.
- 8 Jiang Yuchuan. A simple method of obtaining stress function [J]. Mechanics and Practice, 2004, 24: 62-63. 蒋玉川. 确定应力函数的一种简单方法[J]. 力学与实践, 2004, 24: 62-63.
- 9 Li Zhicheng, Tang Zhilie, Chen Ping, et al.. Study of photoelastic stress distribution and imaging method based on Stokes parameters [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0512005. 李志诚, 唐志列, 陈 萍, 等. 基于斯托克斯参量的光弹性应力分布及成像方法研究[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0512005.
- 10 Wang Qiyu, Li Qianghua. Simultaneous measurement of temperature and lateral force based on polarization dependent loss of fiber Bragg grating [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(12): 1205003. 王启宇, 励强华. 基于光纤布拉格光栅偏振相关损耗的温度与侧向力的同时测量[J]. 中国激光, 2012, 39(12): 1205003.
- 11 Wang Kai, Yang Haiou, Liu Fencheng, et al.. Element method simulation of thin wall part with pre-deformation substrate during laser solid forming [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(6): 0603002. 王 凯, 杨海鸥, 刘奋成, 等. 基板预变形下激光立体成形直薄壁件应力和变形的有限元分析[J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0603002.
- 12 Zhang Dejiang, Liu Liren, Sun Jianfeng, et al.. The research on wavefront error induced by the deformation of prisms under gravity [J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(4): 618-621. 张德江, 刘立人, 孙建锋, 等. 棱镜自重变形对波面影响的研究[J]. 光子学报, 2006, 35(4): 618-621.

栏目编辑:何卓铭