

文章编号: 0253-2239(2006)02-0259-5

激光陀螺新型槽片

金世龙 李晓红 黄云 龙兴武 周宁平

(国防科大光电工程系, 长沙 410073)

摘要: 根据激光陀螺的使用要求, 针对传统槽片在结构和材质上给加工和陀螺性能所带来的不利因素, 设计一种集微晶玻璃和熔石英玻璃的优点于一体的新型槽片结构。其基体采用与陀螺腔体材料相同的底膨胀系数的微晶玻璃, 反射片采用抛光表面特性很好的熔石英玻璃, 通过光胶接合组成一个完整的新型槽片。并针对新的槽片结构提出了与之相应的陀螺腔体贴片面加工方案, 使其既能配合新结构的槽片又不增加腔体的制造难度。同时还提出和实现了在加工中采取球面部件与槽片基体分开加工的方式, 使得新结构槽片不仅解决了长期困扰陀螺制造行业的因石英槽片易漏氦而引起的陀螺存储寿命相对较短的问题, 同时还降低了球面基片超光滑表面加工难度和加工成本。

关键词: 光纤光学; 激光陀螺; 腔长控制镜; 槽片; 超光滑表面

中图分类号: V241.5⁺58 文献标识码: A

A New Grooved Mirror of the Ring Laser Gyro

Jin Shilong Li Xiaohong Huang Yun Long Xingwu Zhou ningping

(Department of Optics and Electronics Engineering, National University of Defence Technology, Changsha 410073)

Abstract: Analyzed the shortcoming of traditional grooved mirror used on the ring laser gyro (RLG) about its material and structure, a new structure of grooved mirror was designed, which synthesized the advantages of both of glass-ceramic (zerodur) and fused quartz. The body of the mirror is made of glass-ceramic, the same material of the gyro block. The reflective stice is made of fused quartz, whose surface can be polished to higher quality. These two components are combined to become the new mirror. Accordingly a new method was put forward to machine the gyro block surface on which the grooved mirror fixed. It can make the block to suit to the new mirror without more difficulties. A new method was also put forward to polish the substrate and the spherical surface of the mirror separately. Not only has it resolved the problem that the helium leaks through the fused silica material, but also reduced the difficulties is superpolishing the surface of the mirror's substrate.

Key words: fiber optics; ring laser gyro; cavity path length control mirror; grooved mirror; ultrasmooth surface

1 引言

对激光陀螺的研究和生产表明, 在激光陀螺的制造关键因素中, 有两条是所有实用的激光陀螺都必须注意和解决的。一是腔长的稳定性^[1~6]。所有的激光陀螺研究都将陀螺腔体的材料选用为具有极低膨胀系数的微晶玻璃(zerodur)。而且所有实用的激光陀螺除了有常规的反射镜(如后面提到的平面镜)之外, 还必须拥有能主动进行腔长控制的腔长控制镜。二是高质量的反射膜片^[1~6]。它是实现高精度陀螺(尤其是二频陀螺)最重要的因素之一。而具有超光滑表面的基片是获得高质量的反射膜片的重要保证。因此具有弹性薄底的可前后微弱伸缩的且反射面是

超光滑表面的槽片是不可缺少的。通常需将其反射面做成凹球面, 因此它也是加工难度最大的一种反射镜基片。因为它所必须具有的可形变的薄底结构, 也使它成为一个问题来源较多的元件。

2 现行槽片

图 1 所示是现行激光陀螺所用槽片结构之一(其它不同形状的槽片结构上大同小异)。由于反射镜与陀螺腔体之间是光胶结合, 因此作为反射镜的基片材料, 其膨胀系数应与腔体材料的尽量一致, 以微晶玻璃作为基片材料是最理想的, 然而, 由于微晶玻璃材质所固有的不均匀性(是微晶体和玻璃体形

作者简介: 金世龙(1965~), 湖北人, 国防科技大学教授, 主要从事光学陀螺的研究。E-mail: s_l_jin@hotmail.com

收稿日期: 2005-03-31; 收到修改稿日期: 2005-05-15

成的一种混合体),使其加工表面的粗糙度很难做到很高水准。而熔石英玻璃,由于其热膨胀系数也很小,与微晶玻璃腔体材料的很接近,加之其材质非常

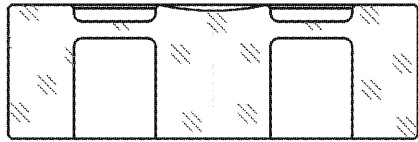


图 1 槽片示意图

Fig. 1 Illustration of the grooved mirror

好的均匀性以及较高的硬度等,容易加工出表面粗糙度极低的超光滑表面。在通常以追求高精度为主要目标的情况下(这主要针对高精度陀螺而言),表面粗糙度显得更为重要,因此熔石英玻璃一直都是制作高质量反射镜的主要基片材料。然而,目前以此种材料制造槽片时仍存在以下两个问题,1)尽管熔石英的热膨胀系数很小,但和膨胀系数更小的微晶玻璃陀螺腔体材料相比仍然相差一个数量级左右。当温度变化时,由于两种材料的膨胀量不一样而可能出现如图 2 所示的变化(图中实线槽片是室温下的槽片形状示意图,虚线所示是低温下的槽片,它由于在低温下收缩时光胶处受收缩量较小的腔体材料的限制而产生形变),这将可能导致:Ⅰ)光胶面局部开胶造成漏气;Ⅱ)由于槽片加工中可能存在的缺陷而产生歪扭。2)由于熔石英材料对激光工作物质中的氮气的透气率较大^[6],相对厚度较薄的槽底漏氮较严重,影响了激光陀螺的存储寿命。为了解决漏氮的影响,槽底厚度不能太薄,影响了腔长控制的灵敏度以及调控范围。

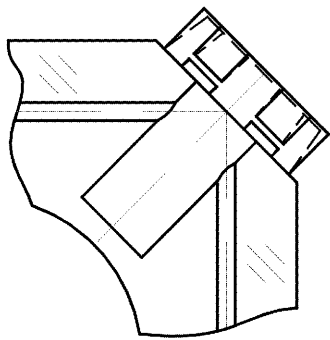


图 2 腔体上的槽片温变示意图

Fig. 2 Illustration of the change of the grooved mirror under the temperature change

另外,将槽片加工成凹球面反射镜,这就要求在同一个槽片表面同时要有球面的反射面和平面的光胶安装面。这两种不同的面形目前还不可能一次加工成型,通常需分两道工序分别加工,这样就会出现

在进行第二道工序加工第二种面形时破坏前一道工序完成的表面质量。这种功能与工艺的矛盾一直没有得到很好的解决,通常也只能抓主要矛盾,而不能做到两全其美。若能使球面片的表面质量也能达到平面片的水平,这无疑又将使高精度激光陀螺的精度向前推进一大步。

3 新型槽片的设计与制造

3.1 设计

为了克服原有槽片的缺点,通过对槽片材料及加工难点的分析,提出了一种集多种有利因素于一体的新型复合槽片设计方案。

3.1.1 新型槽片基体

微晶玻璃具有不漏氮的性质^[6]且与腔体材料一致,用此材料设计了满足这些功能的槽片基体,其胶合面(A面)为满足光胶需要的平面光胶面(如图 3 所示)。

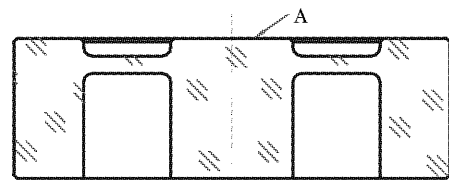


图 3 槽片基体示意图

Fig. 3 Illustration of the main body of the grooved mirror

3.1.2 反射片

为了保证反射面的极低表面粗糙度的要求,仍采用熔石英。为了使其具有较高的抗温度急剧变化及高强度机械振动冲击的能力,将其设计为薄形结构。直径与槽片中心柱的一样,厚度为 0.5~1 mm。此时,即使遭受 100 g 的冲击,所形成的冲击力也要小于 8.3×10^{-2} N,在整个的使用温度范围内,热应变产生的拉力也在 10 N 量级^[6],与结合强度与材料自身强度相当的深化光胶^[7]相比仍要相差几个数量级。纵向热变形小于二十分之一波长,面形变化也小,对陀螺影响不大,尤其是在有恒温控制的条件下。其反射表面(C面)为满足陀螺设计要求的具有一定曲率的超光滑球面,背面(B面)则是满足光胶需要的平面光胶面(如图 4 所示)。

3.1.3 复合式新型槽片

为了增加槽片在真空环境下抗温度急剧变化及高强度机械振动冲击的能力,反射片同槽片基体采用深化光胶的方式连接成为一体^[7],如图 5 所示。由于反射片尺寸薄重量轻,温度变化引起的变形拉



图 4 球面反射片放大示意图

Fig. 4 Illustration of the spherical surface reflective slice

力以及振动造成的冲击力并不很大。因此,对使用环境并不是太恶劣的陀螺,其槽片的反射片和基体之间只须普通的光胶结合即可。

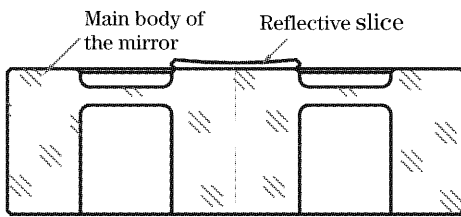


图 5 新结构槽片示意图

Fig. 5 Illustration of the new structural grooved mirror

3.2 制造

将其分成了两个零件进行加工,最后将两个零件胶合在一起。尤其是增加了薄形零件的加工,工艺上的确变得更为复杂了。但是它使得该元件中加工难度最大的超光滑表面的加工难度得以降低、加工质量得以提升,使总体加工难度得以降低。

3.2.1 槽片基体

在机械加工阶段,方法同原结构的完全一样。由于新结构中的微晶玻璃比原结构中的石英玻璃具有更好的化学抛光特性,可用化学抛光代替原来的机械抛光对环槽进行抛光,其效率及成品率可大幅度提高。在光学加工阶段,对表面光洁度的要求降低,抛光时间大大减少,效率提高 10 倍左右。图 6 是加工出的微晶玻璃槽片基体。微晶玻璃材质较石英玻璃软,机加工阶段,更容易被金刚石工具所磨削,反而不容易出现较大的加工应力和裂纹,也不容

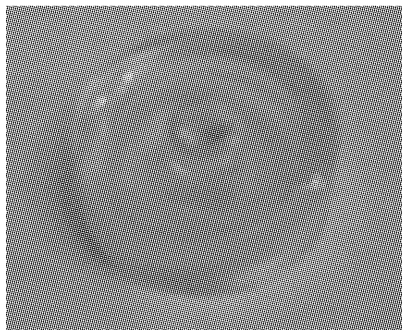


图 6 新结构槽片基体

Fig. 6 The substructure of the new grooved mirror

易损坏金刚石工具,表现出很好的加工性能。对环槽内的抛光,机械抛光和化学抛光两种方法,结果都能达到要求;尽管化学抛光的表面光洁度不如机械抛光的,但化学抛光不易破坏槽内精磨后的面形,且抛光效率高。光学加工阶段,也由于微晶玻璃材质较石英玻璃软特别是此时基体表面粗糙度要求不高(不必是超光滑表面),因此磨砂和抛光效率都大幅度提高。

3.2.2 反射片

薄形光学零件在加工上的确增加了一些难度,主要是零件下盘后的光圈变形^[8]。通过增厚和“毛光”毛坯的办法先加工平面光胶面,再光胶上盘加工球面,使得零件下盘后的光圈变化减小;另外,由于该薄形反射片最终是光胶在槽片基体上使用的,只要其球面面形在盘上时是合格的,即使在下盘后有一点变形,但在光胶到槽片基体上后又恢复到下盘前的合格面形,影响并不太大。其次,作为超光滑元件,在对其超光滑表面进行加工时,虽然其加工难度及加工周期与原结构相比并没有减小,但由于需要超抛的元件的尺寸减小了,使得每盘的零件数量增加了 10 倍左右,因此生产效率也提高了 10 倍左右。更为重要的是,由于加工表面不必经历可能造成损伤的二次加工,和平面片一样其表面粗糙度就相对容易达到优于 0.08 nm 的水平。图 7 所示为曲率半径为 8 m 的凹球面表面的原子力显微镜测量图,其表面粗糙度(RMS)为 0.069 nm。

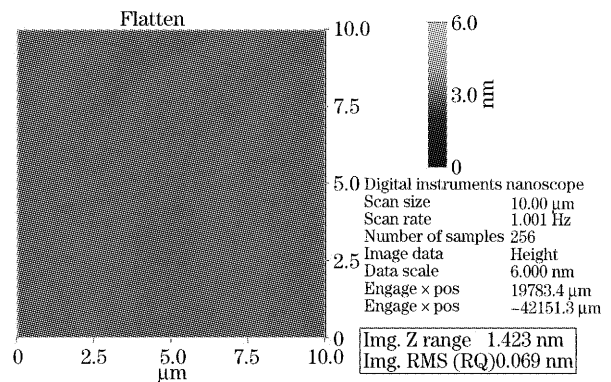


图 7 石英片球面表面粗糙度图

Fig. 7 Surface roughness of fused silica's concave surface

3.2.3 深化光胶

在槽片基体中心柱的光胶表面蒸镀 150 nm 的 SiO_2 薄膜,将球面反射片光胶到镀了膜的基体中心,再经红外加热(150~250 °C)处理后,反射片与基体成为一体、不可拆卸。元件在高真空、高温(500 °C)、低温(-190 °C)条件下仍具有很高的抗

振动、耐冲击性能^[7],而激光陀螺通常只需要工作在 $-40\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$,因此它完全满足激光陀螺的使用要求。熔石英材料热膨胀系数很小,在陀螺使用的温度范围内平均热膨胀系数小于 $3\times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$,温变引起的形变很小。况且对于很多高精度陀螺应用领域,使用环境都可以得到很好保证(比如可以采取恒温控制等),但陀螺精度必须得到保证,这就进一步地强调了高质量反射面的重要性。这种槽片的特点正是在于它有利于获得高水准的反射面以及防止漏氦等方面上。

3.3 优点

本结构槽片不仅在材料上融合了微晶玻璃和熔石英玻璃的优点,克服了各自的缺点,更重要的是在工艺上,使加工难度降低,成品率提高。首先槽片基体和反射片分开加工,其表面都不存在二次加工的问题,避免了再被损伤的可能。其次槽片基体和反射面表面质量要求不一样,加工时可分别对待^[9,10]。表面光洁度要求不高的槽片基体可快速加工完成。而反射片由于其现有尺寸比原有槽片尺寸小很多,每盘的加工数量可比以前增加10倍左右,加工效率大大提高,使总体难度大大降低。

由于微晶玻璃所具有的良好机械加工性能和适于化学抛光特性,在槽片基体成型阶段的合格率达100%(这虽只是到目前的统计结果,并不能保证总能保持,但其合格率确实比加工石英玻璃的高)。基体光学加工光胶面的合格率也接近100%。尽管由于在超光滑表面的加工时受影响的因素较多且较复杂(有很多对常规光学表面加工并无太大影响的因素在超光滑表面加工时都显的很重要了),使得合格率起伏较大,但总的来说,只需一道工序就能加工完毕的要比需要两道工序才能加工完毕的合格率高,最高时一盘的合格率能达到80%以上。而大量事实也证明基片反射面的粗糙度对激光陀螺的精度的是相当重要,通过对某种型号的机抖陀螺的装调和测试表明,只要其反射镜基片的反射面表面粗糙度优于 0.08 nm 且均匀的陀螺,其精度都能达到优于 $0.01^{\circ}/\text{h}$ 的水平。

4 槽片与陀螺腔体的连接

新型槽片的反射面与光胶面不是处于同一平面内,原有的腔体结构已不适应,为此重新设计了陀螺腔体结构,对槽片贴片面的位置进行了调整,使其高出反射点位置,以弥补反射面与光胶面的错位(如

图8所示)。在陀螺贴片面的加工过程中,从机械加工开始就要留有足够的余量,使得贴片面在光学加工完成时,贴片面到两光路孔中心的交点的距离刚好等于石英反射片的厚度。这样,陀螺完成调腔,槽片的微晶玻璃光胶面与陀螺腔体的贴片面光胶后,槽片的反射面刚好处于两光路孔中心的交点上。

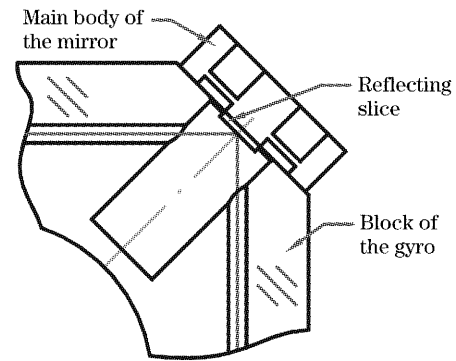


图8 新结构槽片应用示意图

Fig. 8 Illustration of application of the new structural grooved mirror

新方式不仅省去了补偿片的加工,而且不需在考虑其加工上薄形结构的难度,直径较小的反射片就可以加工得更薄了一些。使其总体加工难度降低、成品率提高,且由于使用了微晶玻璃材质的槽片基体,消除了石英玻璃导致的不良后果,使得陀螺生产在总体上得到了改进。

5 结 论

在本文的设计方案中,首先从材料出发,充分利用了微晶玻璃的低膨胀系数和不漏氦的特点以及熔石英玻璃的均匀性及相对容易获得超光滑表面的加工特点,相互取长补短,然后在加工中,将光洁度要求极高的球面反射基片与表面光洁度要求不太高的槽片基体分开加工,不仅解决了长期困扰陀螺制造行业的因石英槽片易漏氦而引起的存储寿命相对较短的问题,同时还降低了球面基片超光滑表面加工难度和加工成本。

参 考 文 献

- 1 Gao Buolong, Li Shutang. *Ring Laser Gyro* [M]. Changsha: National University of Defence Technology Press, 1984 (in Chinese)
高伯龙,李树棠. 光学陀螺[M]. 长沙:国防科学技术大学出版社, 1984
- 2 Yang Peigeng, Gong Zhibing. *Optical and Electrical Inertial Techniques* [M]. Beijing: Weapon Industry Press, 1999 (in Chinese)
杨培根,龚智炳. 光电惯性技术[M]. 北京:兵器工业出版社,

- 1999
- 3 Guo Xiuzhong. *Inertial Navigation System & Theory of Gyro* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1996 (in Chinese)
郭秀中. 惯导系统陀螺仪理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996
- 4 Xie Yuanping, Song Zhangqi, Yao Qiong *et al.*. Influence of phase modulator non-linearities on measurement of work point and signal demodulation in open-loop fiber optics gyroscope[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(7): 848~850 (in Chinese)
谢元平, 宋章启, 姚琼等. 相位调制非线性对开环光纤陀螺工作点测量与信号解调的影响[J]. 中国激光, 2004, **31**(7): 848~850
- 5 Yuanhong Yang, Xeixu Zhang, Jing Ma *et al.*. Low cost, practical, all-digital open-loop fiber-optics gyroscope[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(10): 567~569
- 6 Cao Zhifeng. *Special Type Optical Glass* [M]. Beijing: Weapon Industry Press, 1993 (in Chinese)
- 曹志峰. 特种光学玻璃[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1993
- 7 Wang Zhijiang. *The Enchiridion of Optical Techniques* [M]. Beijing: China Machine Press, 1994 (in Chinese)
王之江. 光学技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994
- 8 Tian Shouxin, Ma Renyong, Guo Baojin. *The Manufacture and Measure of High Precision and Special Optical Component* [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1991 (in Chinese)
田守信, 马仁勇, 郭宝金. 高精度及特种光学零件制造与检测[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1991
- 9 Xin Qiming, Sun Yunan, Xie Jinghui. *Neoteric Optical Manufacturing Technology* [M]. Beijing: Weapon Industry Press, 1997 (in Chinese)
辛企明. 近代光学制造技术[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1997
- 10 Yang Li. *Advanced Optical Manufacturing Technology* [M]. Beijing: Science Press, 2001 (in Chinese)
杨立. 先进光学制造技术[M]. 北京: 科学出版社, 2001

上海交通大学生物医学工程系招聘启事

由国家 973 项目首席科学家任秋实教授领衔的上海交通大学激光与光子生物医学研究所是一个与国际接轨, 专业从事激光与光子生物医学研究的学术机构, 拥有上海市激光医学重点实验室。该研究所隶属于上海交通大学生命科学技术学院生物医学工程系。该系为国家重点一级学科, 博士点, 博士后流动站。研究所的主要研究方向为: 1) 激光与生物组织相互作用; 2) 医学光学检测, 成像, 与测量技术; 3) 激光微创、智能化内窥镜手术; 4) 眼科与视觉光学。研究所在研项目之一:《视觉功能修复的基础理论与关键科学问题》2005 年 7 月获得了国家重大基础研究计划(973 计划)2500 万元的资助。

为了更好地开展研究所的各项科研工作, 将研究所建设成为国际一流的激光与光子生物医学研究中心, 争创国家重点实验室及国家激光医学工程中心, 现公开招聘若干名具有丰富科研经验的优秀学者来研究所担任副教授职位的学术骨干, 具体要求如下:

1. 国内外知名大学毕业, 在激光, 光电子, 应用物理, 生理物理, 或解剖学等方面具有博士学位, 并有五年以上独立科研工作经验者, 其中, 在眼科生物物理机制, 波面像差理论在激光屈光手术与视光学的应用, 视觉功能修复, 以及眼科新技术与新方法方面有研究经验的申请者将优先考虑;
2. 以第一作者或通讯作者身份发表过 5 篇以上被 SCI 收录的科学论文, 能独立开展科研工作, 并以主要研究者的身份负责组织至少 1 项以上的国家自然科学基金或相关科研课题的申请;
3. 具有较好的中英文写作和表达能力;
4. 具有优良的职业道德和思想素质, 强烈的责任心、进取心、和忘我的科学献身精神, 为人正派, 思维敏捷, 具有较好的团队协作精神。

上海交通大学激光与生物光子医学研究所将根据入选者的条件提供具有竞争力的待遇。研究所还将招聘若干名具有相关经验的博士后及博士研究生参与研究所正在开展的各项科研工作, 欢迎有志从事激光与光子生物医学研究的杰出人才前来申请。

联系方式:

请有意申请者将中英文简历, 三篇代表性文章, 两年内拟定科研计划及个人研究发展规划, 三封推荐信(应注明推荐人的姓名, 职位, 联系电话, 及 EMAIL 地址)寄往:

地 址: 上海交通大学生物医学工程系激光与光子生物医学研究所
上海市乐山路 33 号慧谷科技楼 1 号楼 200 室(200030)

联 系 人: 任秋实教授 电 话: +86 21 6447 7466

传 真: +86 21 6447 7467 电子邮件: renqsh@sytu.edu.cn