DOI:10.11918/201910204

高精度小型陀螺仪关键器件加工技术研究进展

陈明君,王廷章,刘赫男,吴春亚,程 健,苏定宁

(哈尔滨工业大学精密工程研究所,哈尔滨 150001)

摘 要:主要介绍超流体陀螺仪、原子陀螺仪和微半球陀螺仪3种陀螺仪关键器件的结构特点、质量技术指标和制备技术要求,阐述高精度微小型陀螺仪核心器件的制备技术研究进展;详细综述普遍采用的 MEMS 加工技术及微纳加工技术等制造工艺;对比分析各关键器件的制备工艺,重点阐述各相关工艺存在的优势和局限性;分析微谐振器各制备工艺中模具加工技术的工艺特点及其对微谐振器制备质量的影响;探讨各关键器件的制备方法研究进展以及存在的问题与挑战,以期为后续微纳制造技术与陀螺仪技术的结合提供参考,并进一步推动相关制备技术的实际工程应用.

关键词:超流体陀螺仪;原子陀螺仪;微半球陀螺仪;关键器件;制备工艺

中图分类号: TH161 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2020)06-0218-09

Research process on fabrication techniques for high precision micro gyroscope key component

CHEN Mingjun, WANG Tingzhang, LIU Henan, WU Chunya, CHENG Jian, SU Dingning

(Center for Precision Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The superfluid gyroscope, atomic gyroscope and micro-hemispherical gyroscope have the possibility of high precision and miniaturization which make them the promising gyroscopes. The preparation quality of the key component of these three gyroscopes will directly affect their working performance, so it is necessary to perform indepth research on the status of the key component preparation processes. Firstly, the structural characteristics, quality and technical indicators and their effect, and preparation technical requirements of these key components are briefly described. On this basis, the research progress on the fabrication technology of high-precision micro gyroscope key components is described, and the manufacturing processes such as the commonly used MEMS processing technology and micro-nano processing technology are reviewed in detail. By comparatively analyzing the preparation process of each key component, the advantages and limitations of each related process are emphasized. For micro-resonators, the process characteristics of mold processing technology in each preparation process and their influence on the quality of the micro-resonator are analyzed. Through analyzing the research progress of the preparation methods of each key component, the existing problems and challenges are discussed to provide a reference for the subsequent combination of micro-nano manufacturing technology and gyroscope technology, and further to promote the practical engineering application of related preparation technologies.

Keywords: superfluid gyroscope; atomic gyroscope; micro-hemispherical gyroscope; key component; fabrication process

惯性技术是测量载体位置、速度和运动姿态的 技术,也是衡量一个国家尖端技术水平的重要标志 之一^[1],并在国防和民用方面起着不可替代的作 用^[2]. 陀螺仪是惯性技术的核心敏感器件. 基于经 典牛顿力学的微机械陀螺仪的导航精度和工作寿命 是其成为未来具有竞争力微陀螺仪的致命障碍^[3]. 对于光学陀螺仪,光波波长限制了理论灵敏度的进 一步提高,工作原理及结构限制了小型化和低成本

- 基金项目:国家重点研发计划(2018YFB1107600)
- 作者简介:陈明君(1971—),男,教授,博士生导师;
- 吴春亚(1982—),女,副教授,博士生导师 通信作者:陈明君,chenmj@hit.edu.cn

化.因此不对这两类陀螺仪进行综述.基于哥氏振 动效应的半球谐振陀螺仪具有结构简单、体积小、质 量轻、测量精度高、可靠性高^[4]等特点,已成为执行 高价值空间任务的首选.随着半球谐振陀螺精度不 受尺寸限制的验证^[5],小型化已成为另一重要发展 趋势和当前研究工作热点.

得益于量子物理技术发展,在量子领域物质波 也可以干涉,于是两类基于现代量子力学的陀螺便 应运而生,分别是超流体陀螺和原子陀螺.由于物 质波的波长远小于光波,波速又远慢于光速,所以基 于物质波的陀螺灵敏度比光波干涉陀螺仪高出约 10个数量级^[6].超流体陀螺是基于超流体的约瑟夫

收稿日期: 2019-10-30

逊效应,当微加工技术发展到几十 nm 时,超流体中 的约瑟夫逊效应研究始于³He,因其愈合长度在可 加工尺度^[7].加州大学伯克利分校先后研制了³He 和⁴He 超流体陀螺仪^[8]. 南京航空航天大学也对该 类陀螺进行了大量研究^[9].原子陀螺仪具有精度 高、可小型化、稳定性高等特点,将成为下一代高精 度陀螺仪. 原子陀螺仪主要包括原子自旋陀螺仪 (ASG)和原子干涉陀螺仪(AIG)^[10].原子自旋转陀 螺仪具有精度高和可以制造芯片级尺寸的特点,又 可分为核磁共振陀螺(NMRG)和无自旋交换弛豫陀 螺(SERFG)^[11].美国最早开始核磁共振陀螺仪的 研制,并在芯片化方面做了大量研究^[12-13],其第4 代陀螺仪体积 10 cm³,零偏稳定性优于 0.02(°)/h. 相对于核磁共振陀螺,无自旋交换弛豫陀螺测量精 度更高,普林斯顿大学研发了 SERFG 陀螺仪,并搭 建了实验平台^[14], Honeywell 公司也提出了一种芯 片级 SERFG 陀螺仪方案^[15]. 原子干涉陀螺的研究 始于 1991 年,2008 年斯坦福大学研制了小型双干 涉原子陀螺,零偏稳定性<6.6×10⁻³(°)/h^[16].2016 年法国天文台研制出首台连续型原子干涉陀螺 仪^[17],其精度为当前原子陀螺仪的国际最高水平.

高精度、低成本、轻质量、小体积和低功耗是未 来导航器件的主要发展方向^[18],原子陀螺、超流体 陀螺和微谐振陀螺是发展方向.本文阐述这3种陀 螺仪关键器件的制备技术研究现状,并分析工艺要 求和关键器件对陀螺仪工作的影响,以期能够促进 微纳加工技术与惯性导航技术的融合,从而推动惯 性导航技术的发展.

1 超流体陀螺仪关键器件制备工艺

1.1 关键器件及其加工质量要求

弱连接是超流体陀螺仪的核心部分,通过在薄 膜上制备与超流体愈合长度同数量级的纳米尺寸孔 实现.因为通过单孔的质量流太小而不能用现有的 方法检测,所以采用狭缝状孔或孔阵列的方式增加 质量流^[19].多数学者采用孔阵列,薄膜主流厚度为 50 nm或 60 nm,个别学者采用70 nm.孔径主要取决 于实验要求,典型范围 30~100 nm,用于³He 的孔径 要普遍大于用于⁴He 的,例如 100 nm 孔径则主要用 于³He. 孔阵列以方形阵列为主,普遍采用 65×65 方 阵,其次是 75×75 方阵.避免相邻孔间物质波相互 干扰 的孔 间距 主要为 3 μm 或 2 μm,最小为 1 μm^[20-22],孔阵列的显微图像如图 1 所示.

在弱连接制备过程中,首先,应关注膜的完整 性,弱连接薄膜通常采用 SiN,具有薄且脆的特点, 在薄膜的制备和孔阵列的加工过程中应避免薄膜起 皱和松弛;其次,应注重孔的通透性,通透性与加工 程度有关,加工不够会导致孔没有加工透,加工过量 则会带来孔径扩大的问题;最后应该关注工艺过程 的清洁性,避免沉积物堵塞加工孔^[23].



图 1 扫描电子显微镜下弱连接孔阵列薄膜^[21]

Fig.1 Scanning electron microscopy of weak link array^[21]

1.2 弱连接结构制备工艺

弱连接的特征尺寸为几十 nm,因此其加工方式 经历了离子束加工、电子束加工和光刻加工.目前, 主流的加工方式为电子束光刻加工技术.对于狭缝 状的弱连接,Avenel 等^[24]在早期实验中采用强聚焦 离子束在 200 nm 厚的镍箔上面加工宽300 nm、长 5 μm的狭长槽.继而 2001 年 Sukhatme 等^[25]采用电 子束光刻技术在 150 nm 厚的薄膜上加工 24 条宽 170 nm、长 3 μm、间距为 10 μm 的狭长孔.该类弱连 接的特征尺寸明显大于孔阵列的特征尺寸,加工难 度相对较低,但超流体实验效果相对较差,并逐渐被 微孔阵列弱连接取代.

目前,电子束光刻技术(EBL)是弱连接孔阵列 的主要加工方式. Joshi 实验室^[23]采用电子束光刻 法在 70 nm 厚 SiN 薄膜上加工出 70 nm 孔径的阵 列. 首先,通过刻蚀法制备 70 nm 厚 SiN 薄膜,过程 见图 2. 虽然干法蚀刻更清洁彻底,但湿法蚀刻往往 更温和,更适合薄且脆的薄膜. 采用低压化学气相 沉积法在双面抛光的硅晶圆上沉积 70 nm 厚 SiN 层,然后依次去除抗蚀层、刻蚀氮化物、各向异性刻 蚀硅,获得70 nm厚 SiN 薄膜. 进一步在薄膜上涂覆 聚甲基丙烯酸甲酯作为硬掩模进行电子束光刻制备 孔阵列. 该方法虽然可以相对完整的制备弱连接结 构,但是依然存在无法进一步缩小孔的特征尺寸,无 法解决掩模清除过程中堵塞已制备孔的问题.



图 2 70 nm 厚 SiN 薄膜制备方法示意^[23]

Fig.2 Schematic diagram of preparation of 70 nm SiN film^[23] 在弱连接制备中,研究的焦点主要集中于孔阵 列的单孔尺寸和阵列间距上.在超流体流动速度很 快的情况下,孔的表面结构必然会影响临近速度. 因此需要关注加工后孔壁表面微结构变化情况,单 孔形状及尺寸偏差,阵列间距一致性等更为细致的 问题,以提高超流体陀螺仪的精度.同时改进或寻 找制备更小孔径和更多孔的孔阵列^[26]新方法,以提 高超流体陀螺的灵敏度.

2 原子陀螺仪关键器件制备工艺

2.1 关键器件及其加工质量要求

汽室是原子陀螺的心脏,汽室的制造和填充将 决定系统的性能.针对不同的应用需求,汽室的形 状主要包括金字塔形空腔、立方体、球形和平面 形^[27-29],如图3所示.汽室壁的表面粗糙度、光学透 明度和平面度对陀螺仪性能至关重要.弛豫时间是 陀螺仪的主要技术指标,影响原子核弛豫时间的主 要因素包括:汽室壁的碰撞、汽室壁材料、磁场的均 匀性.汽室壁的材料各向异性将会产生强电场梯 度,进而影响弛豫时间.汽室形状通过影响汽室中 原子产生的磁场均匀性影响原子的自磁化.而汽室 尺寸在很大程度上决定了陀螺仪的体积.



2.2 小型汽室的制备工艺

小型汽室的制备工艺主要是硅微加工技术、薄 膜沉积、阳极键合技术和吹塑技术的集成. 硅微加 工技术主要包括各向异性湿法刻蚀和深反应离子刻 蚀(DRIE). DIRE 技术能够制备最小尺寸为 2 μm 的大深宽比微结构,表面粗糙度为 50~400 nm,主要 用于制备球形汽室的吹塑模具以及平面汽室腔体. 阳极键合是在热和强电场作用下使硅和玻璃接触界 面处形成氧化物从而实现气密密封,应用于汽室的 封装和球形汽室吹塑前的准备过程中.

金字塔形汽室的主要制备工艺为各向异性湿法 刻蚀. Perez 等^[30]在实验室采用该方法在1 mm 厚 的双面抛光硅晶片上制备底部尺寸为 1.8 mm× 1.8 mm 的 倒 金 字 塔 型 腔.填 充 气 体 后 采 用 Pyrex7740 玻璃板通过阳极键合密封型腔制成汽室, 如图 4 所示.该类汽室对表面粗糙度和面间夹角精 度要求较高.各向异性湿法刻蚀是利用不同晶向刻 蚀速率不同的特点制备微结构,由于不存在完美的 各向异性刻蚀,制备高精度面间夹角便成为该类器 件加工的核心问题.未涂覆的硅表面对光的反射特 性较差,因此采用等离子体增强化学气相沉积法镀 膜型腔壁,膜的不均匀性会导致波长的光学偏移. 制备该类汽室会受较多因素影响,在几类汽室中制 造难度最大.



图 4 金字塔形汽室制备过程^[30]

Fig.4 Pyramid type vapor chamber preparation $\operatorname{process}^{[30]}$

微玻璃吹塑工艺是基于高温下玻璃黏度降低的 特点,用密闭腔内截留的气体或提前放入的发泡剂 将玻璃吹塑成形. 吹塑过程中密闭腔体主要通过 DIRE 刻蚀硅基体及阳极键合 Pyrex 玻璃与硅晶片 形成. Shkel 实验室^[31-33]对该汽室制备工艺进行了 大量研究,并于 2007 年通过理论分析和实验研究证 明了晶圆级玻璃吹塑工艺制备球形汽室的可行性, 制备的小型汽室如图 5 所示^[34].



 (a)微球形汽室
 (b)汽室截面图

 图 5 球形微小型汽室^[34]

Fig.5 Spherical micro vapor chamber^[34]

2008 年 Eklund 等^[35]制备的微小型汽室的过程 见图 6,汽室直径 0.9 mm,表面粗糙度(12±5) nm,重 叠峰值相隔 6.8 GHz. 2017 年 Noor 等^[33]采用微玻璃 吹塑法制备了直径为 1 mm 的汽室,并应用在核磁 共振陀螺仪中,获得 0.1(°)/h^{1/2}的角度随机游走.

在制备过程中气压控制是关键,压力过大会造成气室破裂,过小则产生非球形汽室.汽室成型后

应快速从炉中取出,避免玻璃壳在凝固前下垂,导致 非球形.相对其他方法,微玻璃吹塑工艺可以获得 光滑的型腔表面,内表面粗糙度低至2nm,外表面 粗糙度为9nm(外表面直接暴露于周围的氮气中). 球形微汽室具有三维对称性,可以减小原子的自磁 化,也使汽室允许几乎所有方向的光学通道,使其应 用更为广泛.



图 6 球形微小型汽室制备过程^[35]

Fig.6 Spherical micro vapor chamber preparation process^[35]

在几种汽室中,平面汽室是制备工艺最简单的 一种.基体材料主要是单晶硅,通过刻蚀或激光打 孔制造通孔型腔,也有采用机械加工玻璃形成型 腔^[36].在型腔中放入高温分解为混合工作气体的化 学物质,采用阳极键合技术将两块玻璃板与腔体键 合,形成密封汽室.平面汽室从结构上可以分为单 腔和双腔汽室,但其基本制备过程是一致的,典型的 制备过程如图7所示^[37].



图 7 典型平面汽室的制备过程^[37]

Fig.7 Typical planar vapor chamber preparation process^[37]

Knappe 等^[38]用湿法刻蚀制备了边长 1.45 mm 的方形单腔汽室. Straessle 等^[39]尝试使用低温铟气 密粘接技术制备单腔汽室,并证明了该方法清洁性 和气密性良好,拓展了汽室的密封方法. 相对于单 腔汽室,双腔汽室将工作化学物质与工作腔分离,便 于激光照射分解,因此应用更为广泛. 最初双腔汽 室的连接通道较宽,2007 年 Douahi 等^[29]采用 DIRE 技术制备了该类汽室,汽室体积为 1 mm³,吸收峰相 隔 9.2 GHz. 2011 年, Hasegawa 等^[37] 优化汽室连接 通道,将其设计为微通道,采用 DIRE 制备微通道及 汽室整体结构,其工作寿命可达3年,如图8所示. 平面汽室的结构相对简单,制备工序少,影响工作性 能的因素也较少,汽室壁的表面光洁度是主要影响 因素之一.简单的结构限制了其光学通道方向,从 而限制了其应用的广泛性.



 (a)汽室微通道
 (b)微汽室

 图 8 典型平面汽室^[37]

Fig.8 Typical planar vapor chamber^[37]

Northrop Grumman 公司开发的微核磁共振陀螺 仪^[40]及 Pétremand 等^[36]在实验中均采用了立方体 汽室,但该汽室的制备工艺未见具体报道.

3 微谐振陀螺仪关键器件制备工艺

3.1 关键器件及其加工质量要求

微谐振器是微谐振陀螺的核心器件,其结构为 半球或近似半球形薄壳,其结构分为带中心杆和不 带中心杆(图9),直径为0.5~7.0 mm,受工艺限制.



(a)不带中心杆
 (b)带中心杆
 图 9 典型微谐振器^[41]
 Fig.9 Typical micro-resonator^[41]

品质因数和频率裂解是评估谐振陀螺仪性能的 技术指标.品质因数与制备相关的影响因素是锚固 损耗和表面损耗^[42].锚固损耗可采用自对准中心杆 降低;表面损耗主要由表面粗糙度和金属化损耗引 起^[43].频率裂解主要受谐振器的对称性偏差、缺陷 和材料各向异性影响.因此,需要制备高对称性、高 表面粗糙度和理想几何形状的谐振器.谐振器材料 是影响品质因素和频率裂解的又一重要因素,高热 导率、低热膨胀系数和各向同性材料是首选.目前 使用的材料有:多晶硅、聚晶金刚石^[44]、熔融石英、 金属玻璃、Pyrex 玻璃等.其中熔融石英是一种无定 形材料,无晶界影响,热膨胀系数低,各向同性,是目 前制备微谐振器的理想材料^[45].

3.2 微谐振器的制备工艺

三维微谐振器的高质量制备是谐振陀螺仪小型 化所面临的挑战,也是限制微谐振陀螺仪发展的重 要因素.随着 MEMS 技术的发展以及对微谐振陀螺 仪的深入研究,目前已研发多种工艺方法,按其核心 工艺类型划分为:薄膜沉积法、玻璃吹塑法、微吹炬 成型法、微超声加工和微细电火花加工、'水煮蛋' 微成型法(PEM)等.

3.2.1 薄膜沉积法在微谐振器加工中的应用

薄膜沉积法主要用于制备多晶硅和多晶金刚石 微谐振器,或用于制备 SiO₂谐振器.低压化学气相 沉积(LPCVD)是从改进化学气相沉积而来,提高了 膜厚均匀性和生产效率,主要用于制备多晶硅微谐 振器. Sorenson 等^[46]采用 LPCVD 技术在刻蚀的球 形型腔表面沉积多晶硅球壳,该球壳厚 660 nm,直 径 1.2 nm,品质因数为 8 000. 2015 年 Shao 等^[47]采 用 LPCVD 技术在硅球型腔中制备多晶硅球壳,并在 球壳周围加工具有自对准电极以实现自组装,其 Q 值为 11 100,频率裂解为 5 Hz(如图 10).



 (a)微半球模型
 (b)微半球 SEM 图

 图 10 LPCVD 技术制备的多晶硅微半球^[47]

Fig.10 Polysilicon micro hemisphere prepared by LPCVD^[47]

热丝化学气相沉积法(HFCVD)是气相沉积金 刚石薄膜的主要方法之一,具有工艺成熟、成本低等 优点,缺点是薄膜质量易受工艺稳定性影响. Heidari 等^[48]采用 HFCVD 技术在硅衬底上制备金 刚石谐振器,直径为1 mm,壁厚1 μm,品质因数 6300,频率裂解为17 Hz. 2015 年 Bernstein 等^[49]也 采用 HFCVD 法制备金刚石谐振器,但采用康宁玻 璃作为模具材料,以湿法同向刻蚀制备球形腔,品质 因数显著提升至143 000,频率裂解降低至2 Hz,如 图 11(a)所示. 溅射沉积法制备 SiO₂ 膜时,厚度可控 性高、均匀性好,是薄膜沉积法制备 SiO₂ 微谐振器 的主要方法. Pai 等^[50]采用溅射沉积法制备了直径 500 μm,壁厚1 μm 的 SiO₂谐振器,表面粗糙度为 5 nm,非球度<1%,品质因数>20 000,频率裂解4 Hz (图 11(b)).

综上所述,薄膜沉积法多用于制备小尺寸微谐 振器(直径<1.5 mm,甚至低至 0.5 mm),并可在硅 基上制备工作电极实现微谐振陀螺仪自组装以提高 装配精度,更适应于微谐振陀螺芯片化的发展趋势. 但薄膜沉积法制备的微谐振器普遍品质因数较低 (低于 20 万),频率裂解偏大.究其原因,除了结构、 尺寸以及材料的固有影响外,制备过程的影响不容 忽视. 模具是微谐振器制备的核心,模具的粗糙度 和不对称性将会复印到谐振器上,因此模具的制造 技术将会制约薄膜沉积法的发展.





Fig.11 SEM images of hemispherical resonator shells^[49-50]3.2.2 玻璃吹塑法在微谐振器制备中的应用

玻璃吹塑法可实现低表面粗糙度(低至0.23 nm)、 高对称结构,需将玻璃晶片气密地粘合到基板上,此 方法主要用于制备金属玻璃和 Pyrex7740 玻璃微谐 振器. Sarac 等^[51]基于吹塑法制备了非球形金属玻 璃谐振器,直径为 500 μm(吹塑法制备的最小谐振 器),高 400 μm,表面粗糙度 ≤ 2 nm,壁厚非均匀(在 7~15 μm 间变化). 2012 年,Zotov 等^[52]采用吹塑法 制备了主谐振器和 8 个卫星球(电极),实现微谐振 陀螺的自组装,如图 12,该谐振器的直径 1 mm,工 作频率 945 kHz,频率裂解 Δ*f/f* = 0.7%.



(a)微半球陀螺仪概念图
 (b)微半球陀螺仪
 图 12 微球陀螺仪^[52]

Fig.12 Microsphere gyroscope^[52]

2014年, Shkel 实验室^[53]采用 DRIE 加工硅基 形成型腔,加热密闭型腔内截留气体制备非球形微 谐振器,其直径为 4.2 mm、厚度 50 μ m、品质因数 40 000,频率裂解 23 Hz. 2015年, Luo 等^[54]利用发 泡剂 TiH₂增加腔内气压制备了直径为 7 mm,表面 粗糙度低至 0.332 nm 的微谐振器. 2015年, Shkel 实 验室^[55]在吹塑法制备微谐振器方面取得了突破性 进展,制备的 7 mm 谐振器具有 114 万的品质因数 和 14 Hz 的频率裂解, 如图 13.



(a)微陀螺仪概念图
 (b)微陀螺仪
 图 13 SHKEL 实验室的微陀螺仪^[55]
 Fig.13 SHKEL lab's microgyroscope^[55]
 玻璃微吹塑法可获得非常低的表面粗糙度,但
 和玻璃晶圆之间的键合温度限制了吹朔温度的

模具和玻璃晶圆之间的键合温度限制了吹塑温度的 提升,一般只能用于制备金属玻璃和 Pyrex7740 玻 璃谐振器,导致谐振器品质因数普遍不高. 而 Senkal 实验室^[55]采用吹塑法制备出 114 万高品质因数的 谐振器,原因是采用熔石英作模具制备出熔融石英 谐振器. 同时发现所有吹塑的微谐振器的裂解频率 都较高,在很大程度上说明吹塑法存在严重的精度 问题.

3.2.3 微吹炬成型在微谐振器制备中的应用

由于微吹塑不适用于加工熔融石英等耐高温材料,微吹炬成型便应运而生.微吹炬成型中,可回流材料薄板夹持在模具之间,下模具具有通孔以控制腔内压力,采用喷灯可控地将被模塑材料加热至其软化温度以上,在受控压力梯度作用下使材料局部区域回流到微模具中,其基本原理如图 14^[56].



图 14 微吹炬成型工艺基本原理^[56]

Fig.14 Basic principle of micro-blowing forming process^[56]

Cho 等^[57] 对微吹炬成型制备微谐振器进行了 大量研究工作,于 2013 年制备了'鸟巢'型微谐振器,外径尺寸为 2.5 mm,高 1.55 mm,壁厚 70 μm,品 质因数为 24.9 万,随机游走为 0.106(°)/h^{1/2}(图 15 (a));同年,研究了微半球谐振器的制备工艺,表面 粗糙度为 0.53 nm,获得 21 万左右的品质因数^[56]; 2015 年,基于微吹炬制备的谐振器,研究了表面粗 糙度及镀膜对品质因数的影响^[58];同年,结合微吹 炬和微焊工艺制备了带有中心杆的微半球谐振器, 半径为 2.8 mm,中心杆半径为 0.5 mm,模具为球形, 最终品质因数为 255 万,是目前微谐振器的最高品 质因数^[59],如图 15(b)所示.



(a) 鸟巢谐振器
 (b)半球谐振器
 图 15 鸟巢形和半球形微谐振器^[57,59]

Fig.15 Birdbath and hemisphere micro-resonator^[57, 59]

为便于降低裂解频率,2017 年 LU 等^[60] 采用微 吹炬成型工艺制备了具有 8 个 T 形质量块的谐振器, 见图 16,将裂解频率降至 12.1 Hz,品质因数 3.7 万.

微吹炬成型关键参数易于控制;火焰温度高达 2500 ℃,高于许多高 Q 值材料的熔点;加工耗时 短,成本低,可扩展至晶圆级批处理;控制压差可以 调整模塑方向;可制造具有超光滑表面的 3D 结构^[56].但是,目前微吹炬成型制备的谐振器特征尺寸大,频率裂解大,所以应缩小特征尺寸并提高加工 精度才能用于芯片级谐振陀螺.微吹塑法和微吹炬 成型法制备的谐振器壁厚存在不均匀现象.



Fig.16 Resonator with T-type mass^[60]

3.2.4 其他制备工艺方法研究

Visvanathan 等^[61]采用微超声加工和微电火花 加工技术制备了微谐振器,微电火花用于制备加工 工具,其直径为0.8 mm,真球度0.625 µm;基于微超 声加工技术在高精度和高光洁度的玻璃球上制备直 径1 mm 的微谐振器,型腔深350 µm,见图17. 控制 结构对称性的关键是精确控制刀具与玻璃球球心处 于同一直线.由于该法在精度和球壳壁厚均匀性的 控制方面难度很大,因此未见后续报道.



(a)带中心杆谐振器(b)不带中心杆谐振器

图 17 微超声加工和微电火花加工的谐振器^[61]

Fig. 17 Microsonic processing and micro-EDM resonators^[61]

'水煮蛋'微成型法(PEM)是薄膜沉积法的发展技术,在微球表面沉积薄膜制备微谐振器.2012 年 Xie 等^[62]首次在高精度蓝宝石球透镜上制备牺 牲层和玻璃层,通过刻蚀获得半球形谐振器(见图 18),其直径为1 mm,厚度为1.2 μm,真球度为 ±0.125 μm,品质因数为20000.



图 18 PEM 法制备谐振器^[62]

Fig.18 PEM method for preparing resonator^[62]

2014 年, Xie 等^[63]进一步发展该技术, 在高精 度滚珠轴承上溅射玻璃薄膜制备微谐振器, 实现电 极间的自对准. PEM 法和薄膜沉积法都需要紧密地 结合 MEMS 技术, 微谐振器的精度和表面质量对模 具具有很强的依赖性. 不同点是 PEM 法使用的凸 模不是 MEMS 技术制备的,模具的精度相对更容易 控制,但很难实现批量生产.

3.2.5 制备工艺中模具的加工技术

对于薄膜沉积法,模具的精度和表面粗糙度会 复印到微谐振器上.模具材料主要是硅,少数为玻 璃,通过湿法刻蚀或 SF6 等离子体刻蚀型腔,SF6 等 离子体刻蚀的模具对称性和表面光洁度良好^[45];微 细电火花技术也用于模具加工,但表面粗糙度较差, 需要抛光处理^[48].微吹塑法加工谐振器时,模具结 构简单,一般为圆形通孔或圆环形盲孔.模具的表 面粗糙度不会对微谐振器产生影响,但孔的对称性 会影响谐振器的对称性.DRIE 技术和激光打孔技 术主要用于硅材料模具孔的制备;湿法刻蚀用于玻 璃材料模具.

微吹炬成型法制备非球形谐振器时,模具结构 主要为圆环形盲孔,对谐振器的影响与吹塑法相同. 制备球形谐振器时,模具为半球形,其粗糙度和精度 会影响谐振器的制备质量.材料主要为耐高温石 墨,采用微铣削加工.因此,为了提高品质因数,降 低裂解频率,需要改善现有模具加工方法,探寻新的 加工技术以制备更高精度的模具.

哈尔滨工业大学是国内开展半球谐振子超精密 加工技术研究最早的院校之一.围绕谐振子超精密 加工,开展了谐振子超精密磨抛机床研制、砂轮在位 修整、谐振子超精密磨削和磁流变抛光等相关工 作^[64-67],研制的谐振子超精密磨抛机床如图 19.



图 19 谐振子超精密磨抛数控机床

Fig.19 Resonator ultra-precision grinding and polishing CNC machine tool

超精密磨抛后谐振子的粗糙度低于 5 nm(如图 20),已用于尖端装备.实验室未来工作重点是进一 步优化谐振子超精密加工工艺,重点关注加工效率, 探索多能场复合磨抛工艺;开展高精度微小型陀螺 仪关键器件的研制工作,辅助先进陀螺仪的研发.



图 20 谐振子超精密磨抛前后对比

Fig.20 Comparison of resonators before and after ultra-precision grinding and polishing

4 总结与展望

本文对超流体陀螺仪、原子陀螺仪和微谐振陀 螺仪的关键器件的制备工艺研究现状进行了综述. 由于这些关键器件加工要求高,加工难度大,虽然研 究多种制备工艺,但依然存在很多不足,难以满足实 际工程需求.

弱连接的研究工作聚焦在单孔尺寸和孔阵列间 距上,应进一步探索极限孔径的加工技术和更多孔 数量阵列的加工工艺,深入研究极限尺寸下孔结构 特征的表征方法,探究孔壁微观结构对超流体的影 响规律.对于微汽室,金字塔型汽室制备难度大,影 响因素多,应探索替代的结构形式;微球形汽室多采 用吹塑法制备,应进一步控制结构的对称性,探索晶 圆级、批量化生产工艺. 制备微谐振器时,薄膜沉积 法可以制备更小尺寸的谐振器,实现自组装,但存在 品质因素低、频率裂解大的问题,未来应重点关注薄 膜沉积厚度的均匀性和高精度、高表面质量模具的 加工工艺;吹塑法的优点是可以制备高表面质量的 谐振器,但只能用于低软化温度材料,品质因素低, 频率裂解高,因此应探索耐高温材料的吹塑工艺和 吹塑精度的控制方法;微吹炬成型具有诸多优点,制 备的谐振器品质因素较高,但尺寸相对较大,应探索 更小尺寸谐振器的制备工艺;目前微谐振器普遍存 在结构对称性差的问题,应优化模具制备方法,考虑 融入微机械加工如微铣削以提高模具的加工精度.

综上所述,为了促进高精度微小型陀螺仪的研究,需要将微纳加工技术与陀螺仪的关键技术紧密结合,积极开展微纳加工工艺的深入研究,加工质量 表征方法的研究,加工装备的研制工作.以便推动 惯性导航技术的快速发展.

参考文献

- PASSARO V, CUCCOVILLO A, VAIANI L, et al. Gyroscope technology and applications: A review in the industrial perspective [J]. Sensors, 2017, 17(10): 2284. DOI: 10.3390/s17102284
- [2] LIU Kai, ZHANG Weiping, CHEN Wenyuan, et al. The development of micro-gyroscope technology [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2009, 19 (11): 113001. DOI: 10.1088/ 0960-1317/19/11/113001
- [3] CAO Huiliang, LIU Yu, KOU Zhiwei, et al. Design, fabrication and experiment of double U-beam MEMS vibration ring gyroscope [J]. Micromachines, 2019, 10(3): 186. DOI: 10.3390/mi10030186
- [4] ROZELLE D M, MEYER A D, TRUSOV A A, et al. Milli-HRG inertial sensor assembly: a reality [C]// IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems. Hapuna Beach: IEEE Press, 2015:1
- [5] BOYD C, WOO J K, CHO J Y, et al. Effect of drive-axis displacement on MEMS birdbath resonator gyroscope performance[C]//4th

IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems. Kauai: IEEE, 2017: 1

- [6] 郑睿,赵伟,方明星,等.超流体陀螺的原理和最新发展[J]. 传感器与微系统,2017,36(7):1
 ZHENG Rui, ZHAO Wei, FANG Mingxing, et al. Principle and new development of superfluid gyroscope[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2017,36(7):1. DOI: 10.13873/J.1000-9787(2017)07-0001-04
- [7] SATO Y, PACKARD R. Superfluid helium interferometers [J]. Physics Today, 2012, 65(10): 31. DOI: 10.1063/ PT.3.1749
- [8] 赵玉龙, 沈怀荣, 任元, 等. 超流体量子干涉陀螺的研究现状与应用[J]. 装备学院学报, 2017, 28(1):67
 ZHAO Yulong, SHEN Huairong, REN Yuan, et al. Research status and application of super-fluid quantum interference gyroscope[J]. Journal of Equipment Academy, 2017, 28(1):67. DOI: 10.3783/j.issn.2095-3828.2017.01.014
- [9] 刘建业,谢征,冯铭瑜,等.超流体陀螺仪的发展概况与研究进展[J].航空学报,2012,33(1):1

LIU Jianye, XIE Zheng, FENG Mingyu, et al. Current status and development of superfluid gyroscope [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(1): 1. DOI: 1000-6893(2012)01-0001-10

- [10] KITCHING J, KNAPPE S, DONLEY E A. Atomic sensors: a review[J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11:1749. DOI: 10.1109/ JSEN.2011.2157679
- [11] LIU Y, SHI M, WANG X. Progress on atomic gyroscope [C]// 24th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS). Saint Petersburg: IEEE Press, 2017: 1
- [12] KANEGSBERG E. Polarization analyzer orientation with nuclear magnetic resonance gyroscope: 7936169[P]. (2011-05-03)
- [13] LARSWN M, BULATOWICX M. Nuclear magnetic resonance gyroscope: for DARPA's micro-technology for positioning, navigation and timing program[C]//66th International Frequency Control Symposium (IFCS). Baltimore: IEEE Press, 2012: 1
- [14] VASILAKIS G. Precision measurements of spin interactions with high density atomic vapors[D]. Princeton:Princeton University, 2011
- [15] TAKASE K. Precision rotation rate measurements with a mobile atom interferometer[D]. Stanford: Stanford University, 2008
- [16] ROMALIS M V. Atomic sensors: chip-scale magnetometers [J]. Nature Photonics, 2007, 1(11):613. DOI: 10.1038/ nphoton.2007.209
- [17] DUTTA I, SAVOIE D, FANG B, et al. Continuous cold-atom inertial sensor with 1 nrad/sec rotation stability [J]. Physical Review Letters, 2016, 116(18): 183003. DOI: 10.1117/12.2228533
- [18] FANG Jiancheng, QIN Jie. Advances in atomic gyroscopes: a view from inertial navigation applications [J]. Sensors, 2012, 12(5): 6331. DOI: 10.3390/s120506331
- [19] SATO Y, PACKARD R E. Superfluid helium quantum interference devices: physics and applications[J]. Reports on Progress in Physics, 2011, 75(1): 016401. DOI: 10.1088 /0034-4885/75/1/016401
- [20] HOSKINSON E, PACKARD R E. Thermally driven Josephson oscillations in superfluid ⁴ He [J]. Physical review letters, 2005, 94(15):155303. DOI: 10.1103/PhysRevLett. 94.155303
- [21] SATO Y. Fiske-amplified superfluid interferometry [J]. Physical Review B, 2010, 81(17): 172502. DOI: 10.1103/ PhysRevB.81. 172502
- [22] NARAYANA S, SATO Y. Superfluid quantum interference in multiple-turn reciprocal geometry [J]. Physical Review Letters, 2011, 106(25): 255301. DOI: 10.1103/PhysRevLett. 106.255301

- [23] JOSHI A, SATO Y, PACKARD R. Fabricating nanoscale aperture arrays for superfluid helium-4 weak link experiments [J]. Journal of Physics Conference Series, 2009, 150 (1): 012018. DOI: 10. 1088/1742-6596/150/1/012018
- [24] AVENEL O, VAROQUAUX E. Josephson effect and phase slippage in superfluids [J]. Physical Review Letters, 1988, 60(5): 416. DOI: 10.1103/PhysRevLett.60.416
- [25] SUKHATME K, MUKHARSKY Y, CHUI T, et al. Observation of the ideal Josephson effect in superfluid ⁴He [J]. Nature, 2001, 411 (6835): 280. DOI: 10.1038/35077024
- [26] PACKARD R E, SATO Y. Superfluid helium quantum interference devices: principles and performance [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2014, 568 (1): 012015. DOI: 10.1088/1742 – 6596/568/1/012015
- [27] PEREZ M A, KITCHING J, SHKEL A M. Design and demonstration of PECVD multilayer dielectric mirrors optimized for micromachined cavity angled sidewalls[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2009, 155:23. DOI: 10.1016/j.sna.2008.10.007
- [28] LIEW L A, MORELAND J, GERGINOV V. Wafer-level filling of microfabricated atomic vapor cells based on thin-film deposition and photolysis of cesium azide [J]. Applied Physics Letters, 2007, 90 (11): 114106. DOI: 10.1063/1.2712501
- [29] DOUAHI A, NIERADKO L, BEUGNOT J C, et al. New vapor cell technology for chip scale atomic clock [C]//2007 IEEE International Frequency Control Symposium Joint with the 21st European Frequency and Time Forum. Geneva: IEEE Press, 2007: 58
- [30] PEREZ M A, NGUYEN U, KNAPPE S, et al. Rubidium vapor cell with integrated Bragg reflectors for compact atomic MEMS[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2009, 154(2): 295. DOI: 10. 1016/j.sna.2009.06.001
- [31] EKLUND E J, SHKEL A M. Self-inflated micro-glass blowing: 8151600[P]. (2012-04-10)
- [32] NOOR R M, SHKEL A M. MEMS components for NMR atomic sensors [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2018, 27 (6): 1148. DOI: 10.1109/ JMEMS.2018.2874451
- [33] NOOR R M, GUNDETI V, SHKEL A M. A status on components development for folded micro NMR gyro[C]//4th IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL). Kauai: IEEE Press, 2017: 156
- [34] EKLUND J, SHKEL A M. Glass blowing on a wafer level[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2007, 16(2): 232. DOI: 10.1109/JMEMS.2007.892887
- [35] EKLUND E J, SHKEL A M, KNAPPE S. Glass-blown spherical microcells for chip-scale atomic devices [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2008, 143(1): 175. DOI: 10.1016/j.sna.2007.10.006
- [36] PÉTREMAND Y, AFFOLDERBACH C, STRAESSLE R, et al. Microfabricated rubidium vapour cell with a thick glass core for small-scale atomic clock applications [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2012, 22 (2): 025013. DOI: 10.1088/ 0960-1317/22/2/025013
- [37] HASEGAWA M, CHUTANI R K, GORECHI C, et al. Microfabrication of cesium vapor cells with buffer gas for MEMS atomic clocks
 [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2011, 167 (2): 594. DOI: 10.1016/j.sna.2011. 02. 039
- [38] KITCHING J, KNAPPE S, LIEW L, et al. Micro fabricated atomic frequency references [J]. Metrologia, 2005, 42(3): 100. DOI: 10. 1088/0026-1394/42/3/S11
- [39] STRAESSLE R, PELLATON M, PETREMAND Y, et al. Low-tem-

perature indium hermetic sealing of alkali vapor-cells for chip-scale atomic clocks[C]//IEEE 25th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. Paris: IEEE Press, 2012: 361

- [40] MEYER D, LARSEN M. Nuclear magnetic resonance gyro for inertial navigation [J]. Gyroscopy and Navigation, 2014, 5(2): 75. DOI: 10.1134/S2075108714020060
- [41] DARVISHIAN A, NAGOURNEY T, CHO J Y, et al. Thermoelastic dissipation in micromachined birdbath shell resonators [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2017, 26: 758. DOI: 10.1109/ JMEMS.2017.2715319
- [42] TAVASSOLI V, HAMELIN B, AYAZI F. Substrate-decoupled 3D micro-shell resonators [C]//15th IEEE Sensors Conference. Orlando: IEEE Press, 2016: 1
- [43] SORENSON L, SHAO P, AYAZI F. Bulk and surface thermoelastic dissipation in micro-hemispherical shell resonators [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2015, 24: 486. DOI: 10.1109/ JMEMS.2014.2333528
- [44] BERNSTEIN J J, BANCU M G, COOK E H, et al. A MEMS diamond hemispherical resonator [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2013, 23: 125007. DOI: 10.1088/0960-1317/ 23/12/125007
- [45]SHAO P. Microscale hemispherical shell resonating gyroscopes[D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2014
- [46] SORENSON L D, GAO X, AYAZI F. 3D micromachined hemispherical shell resonators with integrated capacitive transducers [C]//IEEE 25th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. Paris: IEEE Press, 2012: 168
- [47] SHAO P, TAVASSOLI V, MAYBERRY C L, et al. A 3D-HARPSS polysilicon microhemispherical shell resonating gyroscope: Design, fabrication, and characterization[J]. Sensors, 2015, 15(9): 4974. DOI: 10.1109/JSEN. 2015.2431857
- [48] HEIDARI A, CHAN M L, YANG H A, et al. Micro-machined polycrystalline diamond hemispherical shell resonators [C]//17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems. Barcelona: IEEE Press, 2013: 2415
- [49] BERNSTEIN J J, BANCU M G, BAUER J M, et al. High Q diamond hemispherical resonators: fabrication and energy loss mechanisms[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2015, 25(8): 085006. DOI: 10.1088/0960-1317/25/8/085006
- [50] PAI P, CHOWDHURY F K, MASTRANGELO C H, et al. MEMSbased hemispherical resonator gyroscopes [C]//11th IEEE Sensors Conference. Taipei: IEEE, 2012: 1
- [51] SARAC B, KUMAR G, HODGES T, et al. Three dimensional shell fabrication using blow molding of bulk metallic glass[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2011, 20 (1): 28. DOI: 10. 1109/JMEMS. 2010.2090495
- [52] ZOTOV S A, TRUSOV A A, SHKEL A M. Three dimensional spherical shell resonator gyroscope fabricated using wafer-scale glassblowing[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2012, 21 (3): 509. DOI: 10.1109/JMEMS.2012.2189364
- [53] SENKAL D, AHAMED M J, KRUSOV A A, et al. Electrostatic and mechanical characterization of 3D micro-wineglass resonators
 [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2014, 215: 150. DOI: 10.1016/j.sna.2014.02.001
- [54] LUO Bin, SHANG Jintang, ZHANG Yuzhen. Hemipherical wineglass shells fabricated by a chemical foaming process[C]//16th International Conference on Electronic Packaging Technology. Changsha: IEEE Press, 2015: 951

- [55] SENKAL D, AHAMED M J, ASKARI S, et al. 1 million Q-factor demonstrated on micro-glassblown fused silica wineglass resonators with out-of-plane electrostatic transduction [C]//2014 Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Workshop. Hilton Head Island: Transducer Research Foundation, 2014: 68
- [56] CHO J, YAN J, GREGORY J A, et al. High-Q fused silica birdbath and hemispherical 3D resonators made by blow torch molding [C]//26th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). Taipei; IEEE Press, 2013; 177
- [57] CHO J, WOO J K, YAN J, et al. A high-Q birdbath resonator gyroscope (BRG) [C]//17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems. Barcelona: IEEE CS, 2013: 1847
- [58] NAGOURNEY T, CHO J Y, DARVISHIAN A, et al. Effect of metal annealing on the Q-factor of metal-coated fused silica micro shell resonators [C]//2015 IEEE International Symposium on Inertial Sensors & Systems. Hapuna Beach: IEEE Press, 2015: 1
- [59] CHO J Y, NAJAFI K. A high-Q all-fused silica solid-stem wineglass hemispherical resonator formed using micro blow torching and welding[C]//28th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. Estoril: IEEE Press, 2015: 821
- [60] LU Kun, LI Wei, XIAO Dingbang, et al. Micro shell resonator with T-shape masses fabricated by improved process using whirling platform and femtosecond laser ablation [C]//4th IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems. Kauai: IEEE Press, 2017: 102
- [61] VISVANATHAN K, LI T, GIANCHANDANI Y B. 3D-soule: A fabrication process for large scale integration and micromachining of spherical structures [C]// IEEE 24th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. Estoril: IEEE Press, 2011: 45
- [62] XIE Y, HSIEH H C, PAI P, et al. Precision curved micro hemispherical resonator shells fabricated by poached-egg micro-molding [C]//11th IEEE Sensors Conference. Taipei: IEEE, 2012: 1
- [63] RAHMAN M M, XIE Y, MASTRANGELO C, et al. 3D hemispherical micro glass-shell resonator with integrated electrostatic excitation and capacitive detection transducers [C]//27th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. San Francisco; IEEE Press, 2014; 672
- [64] LIU Henan, CHEN Mingjun, YU Bo, et al. Configuration design and accuracy analysis of a novel magnetorheological finishing machine tool for concave surfaces with small radius of curvature [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2016, 30 (7): 3301. DOI: 10.1007/s12206-016-0639-y
- [65] CHEN Mingjun, LIU Henan, SU Yinrui, et al. Design and fabrication of a novel magnetorheological finishing process for small concave surfaces using small ball-end permanent-magnet polishing head [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 83:823. DOI: 10.1007/s00170-015-7573-5
- [66] CHEN Mingjun, LIU Henan, CHENG Jian, et al. Model of the material removal function and an experimental study on a magnetorheological finishing process using a small ball-end permanent-magnet polishing head [J]. Applied optics, 2017, 56: 5573. DOI: 10. 1364/AO.56.005573
- [67] CHEN Mingjun, LI Ziang, YU Bo, et al. On-machine precision preparation and dressing of ball-headed diamond wheel for the grinding of fused silica[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(5): 982. DOI: CNKI:SUN:YJXB.0.2013-05-016

(编辑 杨 波)