MEMS 和 MOEMS 技术专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022112102

微谐振陀螺仪从半球到平面的演变

谷留涛[1,2]，张卫平[1*]，崔　峰[1]，吴雨婷[1,2]，范重阳[1,2]，卢浩琳[1,2]

（上海交通大学 1. 微米/纳米加工技术国家级重点实验室；2. 电子信息与电气工程学院 微纳电子学系，上海 200240）

摘　要： 微谐振陀螺仪是一种固体波动陀螺，常采用微纳制造工艺进行加工，具有小体积、高性能、低功耗、批量化等特点。自 1975 年世界上第一个半球谐振陀螺诞生以来，微谐振陀螺的谐振子拓扑结构经历了三维结构到二维结构的演变。文章以拓扑结构的发展脉络为主线，对微谐振陀螺的发展过程进行了梳理和总结，最后对目前存在的问题进行了分析，对未来的发展进行了展望。

关键词： 微谐振陀螺仪；微谐振器；半球陀螺仪；环形陀螺仪；四质量块陀螺仪

中图分类号： TP212　**文章编号：** 1001－5868(2022)06－1011－10

Development of MEMS Resonator Gyroscope From Hemisphere to Plane

GU Liutao[1,2], ZHANG Weiping[1], CUI Feng[1], WU Yuting[1,2], FAN Chongyang[1,2], LU Haolin[1,2]

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Micro/Nano Fabrication, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, CHN; 2. Department of Micro/Nano Electronics, School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, CHN)

Abstract: Micro-electro-mechanical (MEMS) resonator gyroscope is a kind of solid wave gyroscope, which is often fabricated by micro-nano fabrication technology, and has features of small size, low power consumption, low cost, and suitable for batch fabrication. Since the birth of the first hemispherical resonator gyroscope in the world in 1975, the structure topology of the MEMS resonator gyroscope has undergone a transformation from three-dimensional structure to two-dimensional structure. In this paper, the development of MEMS resonator gyroscope was summarized in the line of the development of topology. Finally, the current problems were analyzed and future development was prospected.

Key words: MEMS resonator gyroscope; MEMS resonator; hemisphere resonator gyroscope; ring resonator gyroscope; dual-mass resonator gyroscope

0　引言

惯性技术是一种不受干扰、实时、自主、连续的运动信息感知技术[1]。陀螺仪是惯性导航系统的核心器件之一，可以用来测量物体的运动角度或角速度。目前常见的陀螺仪按照工作原理分类可以分为基于旋转质量的定轴性和进动性的转子陀螺仪、基于光学效应的光学陀螺仪[2-4]、基于柯氏力效应的振动陀螺仪[5]和基于物质波的原子陀螺仪[6-9]等。传统的机械转子陀螺仪发展最早，理论技术最为成熟，但是其体型较大、价格昂贵、寿命较短；光学陀螺仪精度较高，特别是激光陀螺仪的精度可以达到惯性级[10]，但是其体积较大，制造工艺复杂，制造成本较高；原子陀螺仪是近年来新兴的一种陀螺仪技术，其体积小、功耗低、抗干扰能力强，有望达到惯性级精度。和其他种类的陀螺仪相比，微谐振陀螺仪具有体积小、功耗低、成本低、易于集成等优点，在航空航天、消费电子、导航制导等领域有着广泛的应用。根据谐振子的拓扑结构可以将微机械振动陀螺仪分为半球型微陀螺仪[11]、圆柱型微陀螺[12]、环型微陀螺仪[13]和质量块微陀螺仪[14]等。随着微机电系统(MEMS)技术的进步，传统的微加工工艺极大地促

收稿日期：2022－11－21.

* 通信作者：张卫平　E-mail：zhangwp@sjtu.edu.cn

进了微机械振动陀螺仪的发展。常见的微谐振陀螺的加工工艺根据加工方式的不同，可以分为三维加工工艺和平面加工工艺。随着材料加工技术的进步，微谐振陀螺仪的加工材料也越来越多样，其中单晶硅[15]、熔融石英[16]、金刚石[17]、多晶硅[18]、二氧化硅[19]等材料成为了各国研究的热点。

近几年，随着国民经济的进步，我国在智能制造、无人系统、物联网等领域取得了较好的发展，对小体积、低功耗、高精度的 MEMS 惯性传感器的需求也变得日益迫切。欧美国家近几年来斥资数千万美元开展 MEMS 惯性导航研究，主要用于解决高精度 MEMS 加工工艺技术、高 Q 值材料加工技术、高稳定性测控技术等难点。由于高精度的 MEMS 惯性器件涉及国防安全，国外在此领域长时间对我国进行技术封锁和打压，企图制约我国在该技术领域的发展。因此，要想打破目前的被动局面，就必须实现 MEMS 传感器结构设计、加工工艺和测控技术的完全自主可控。MEMS 陀螺仪是 MEMS 惯性系统的关键器件之一，其测量精度直接影响整个导航系统的性能。目前常见的高性能 MEMS 陀螺仪在谐振子方面多采用对称结构，使用高 Q 值材料加工，配合模态匹配、刚度补偿等数字闭环测控电路可以实现惯性级的测量精度。

本论文以微谐振陀螺谐振子拓扑结构为主线，梳理了微谐振陀螺的主要发展脉络，为国内相关技术的研究提供参考。

1 半球微谐振陀螺仪的发展

随着半导体技术和 MEMS 加工技术的进步，IC (Integrated Circuit)加工工艺逐渐被应用到微机电系统的加工中，微半球陀螺的研制也逐渐成为有吸引力的方向。MEMS 半球陀螺相比于传统的半球陀螺具有体积小、重量轻、功耗低、可批量生产、制造成本低等优点，在航空航天等领域逐渐得到了推广。

2007 年，美国加利福尼亚大学建立了一种可用于预测玻璃壳形状的分析模型，并通过玻璃吹制的方式在硅基底上成功实现了微半球谐振器的制造[20]，其制造工艺和最终样品如图 1 所示。加工结果表明，吹制的微半球半径和高度均和预测模型拟合度较好；加工样机的内表面粗糙度约为 9 nm，外表面粗糙度约为 2 nm。随着玻璃吹制工艺以及材料工艺的进步，通过玻璃吹制制成的熔融石英鸟巢型微半球陀螺仪精度已经接近惯性级。2020 年，Najafi 等[21]研制的微半球陀螺仪零偏稳定性达到了 0.001 4(°)/h，角度随机游走为 0.000 16(°)/$\sqrt{\text{h}}$，是目前已报道的性能最好的微半球陀螺仪。

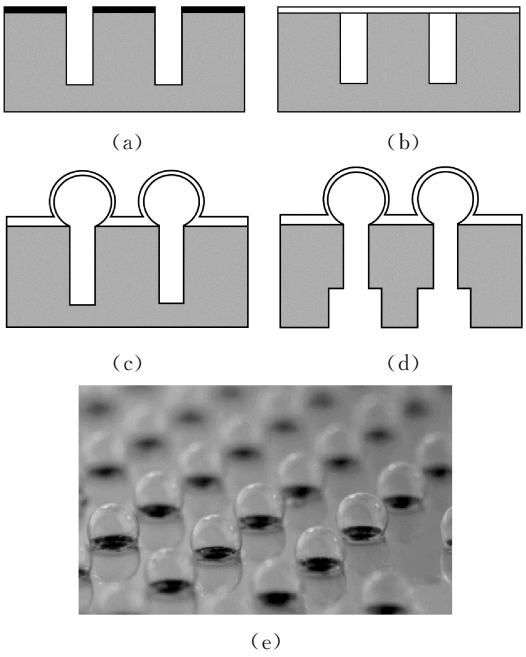


图 1 加利福尼亚大学在硅基底上的玻璃吹制工艺及样品照片。(a)使用光刻胶和深硅蚀刻(DRIE)对硅晶圆进行图形化；(b)去除光刻胶并将玻璃晶圆键合到硅晶圆上；(c)在炉中加热至 850 ℃左右；(d)蚀刻背面(可选)；(e)样品照片

2013 年，密歇根大学提出了一种基于喷灯工艺的鸟巢型半球微陀螺加工工艺，如图 2，谐振子材料为熔融石英(FS)[22]。经试验，最终加工出来的谐振子样机的归一化频差为 0.24%，衰荡时间为 8.25 s。2015 年，该机构采用微喷工艺制造了一种具有实心杆的微半球结构，该工艺采用微喷工艺形成半球型外壳，随后在受控位置将外壳焊接到实心杆上[23]。由于实心杆的长度和刚度都比较大，壳体厚度比较薄，因此该结构拥有较低的锚点损耗。最终测得该结构的品质因子为 255 万，衰荡时间为 35.9 s。2017 年，该机构通过结构优化和工艺改进，将由微喷工艺制成的熔融石英微半球谐振器的品质因子提升到了 445 万，衰荡时间提升到了 259 s[24]。

2018 年，国防科技大学提出了一种基于旋转平台和飞秒激光的熔融石英微半球谐振器加工方法，并与传统的加工方案进行了对比研究[25-26]。如图 3 所示，该加工方案将加工平台固定在旋转平台上，在进行高温加工时，通过旋转使得材料受热更加均匀，从而使得加工出来的谐振子结构更为对称。随后，

使用飞秒激光技术将谐振子进行释放，以减少释放过程导致的对器件的伤害。2019 年，该机构使用此方法加工出来的边缘具有 16 个 T 型质量块熔融石英微半球陀螺仪的角度随机游走达到 0.099(°)/$\sqrt{h}$，零偏稳定性达到 0.46(°)/h[27]。2021 年，使用同样方案加工出来的带有齿形边缘的熔融石英为半球陀螺仪的品质因子达到 118 万[28]。

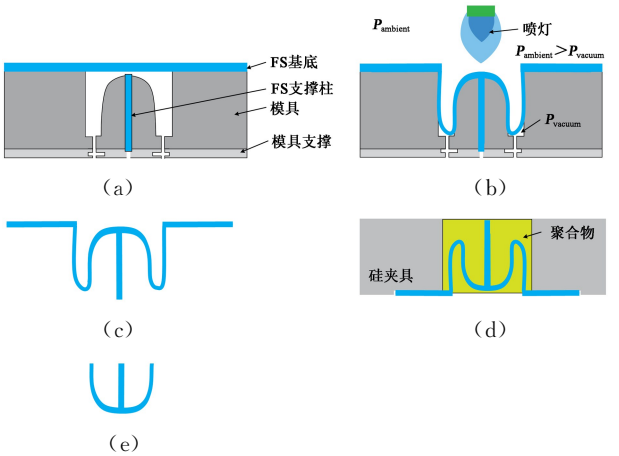


图 2　使用微喷工艺和焊接工艺加工流程[23]。(a)通过模具中心的通孔插入熔融石英支撑柱，夹紧熔融石英基板(100～200 μm)；(b)在受控的压力、温度和持续时间下使用喷灯对熔融石英基板进行塑性；(c)将外壳从模具中分离出来；(d)在 Si 夹具上安装外壳并将其嵌入聚合物中，使用研磨和化学机械抛光工艺释放谐振器；(e)溶解聚合物

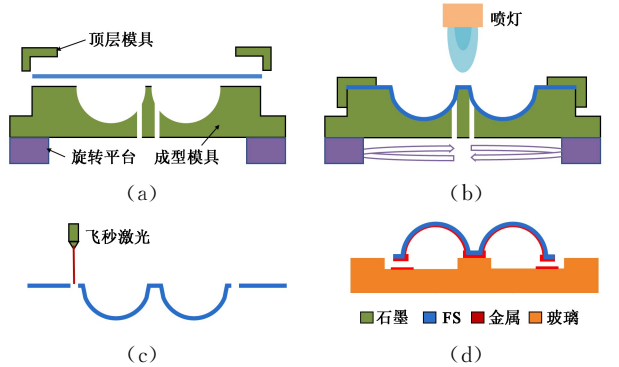


图 3　旋转平台和飞秒激光烧蚀技术加工流程[25]。(a)将熔融石英放置在顶部模具和成型模具之间；(b)通过微吹工艺对熔融石英进行重塑；(c)通过飞秒激光烧蚀将谐振器从外壳中释放出来；(d)对谐振器进行金属化并和平面外电极进行组装

2015 年，东南大学提出了一种利用发泡剂制造熔融石英微半球谐振器的方法[29]，如图 4。该方案利用发泡剂发泡之后产生的气体将熔融后的玻璃制成光滑且对称的半球形状。结果表明，使用此方法制成的谐振器具有 0.332 nm Ra 的粗糙度。2018 年，该研究机构建立了一个简化的分析模型并将其与有限元分析方法相结合，建立了一个发泡剂质量与半球谐振器高度的预测模型，实验结果与模型预测值吻合较好[30]。2011 年，康奈尔大学利用硅的各向同性腐蚀在(100)和(111)单晶硅基底上制造出微半球壳模，并最终证实了(111)硅片得到的微半球模对称性更好[31]。在此基础上，基于薄膜沉积工艺的金刚石[32]、多晶硅[33-34]、二氧化硅[35]、氧化铝[36]等微半球陀螺仪得到了快速的发展。

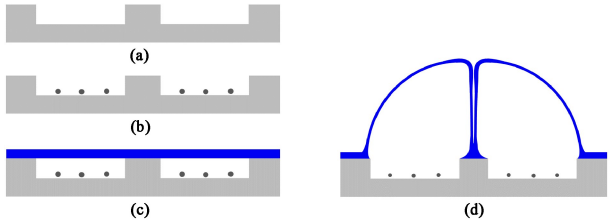


图 4　发泡过程示意图[30]。(a) 利用激光钻孔在硅片上形成对称空腔，并通过湿法蚀刻消除硅粉；(b) 将发泡剂 $CaCO_3$ 转移到空腔中；(c) 将结构玻璃片阳极键合在硅片上；(d)在高温下使玻璃层发泡形成三维壳体

2　环形微谐振陀螺仪的发展

环形微陀螺是半球微陀螺由三维结构向二维结构的演化结果。环形微陀螺采用平面加工工艺，更适合采用 MEMS 工艺进行批量化制造，且制造精度更高、成本更低。随着近几年的发展，环形陀螺仪的拓扑结构也从单环变成了嵌套环结构，并由此衍生出了蛛网状、蜂窝状、花瓣环等仿生的嵌套环结构。

1995 年，密歇根大学提出了一种单环微陀螺结构，该结构包含一个圆环结构、若干个 S 形弹簧支撑结构和一个中心支撑结构，如图 5 所示[37]。在环形谐振子的周围布置有若干个电极，用于陀螺仪的驱动、检测和校准等。在此基础上，该团队还进行了多晶硅[38]、单晶硅[39]等材料的环形谐振器研究，并取得了不错的进展。

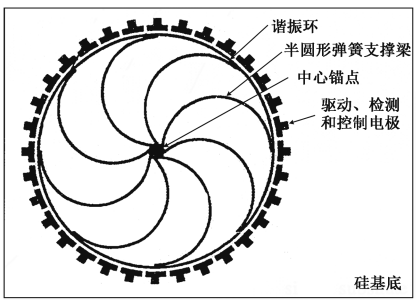


图 5　单环微机械陀螺[37]

2003 年波音公司和美国喷气推进实验室(JPL)合作提出了一种嵌套环形结构[40],如图 6 所示。该结构相比于单环谐振器,拥有多个同心圆环,不同的环之间通过辐条连接,并采用中心支撑结构。不同的环之间拥有一定的间隙,可以放置内置电极,用于刚度补偿。此外,由于环的个数有所增加,因此该结构拥有更大的有效质量和较小的有效刚度,从而拥有更好的品质因子和机械灵敏度。

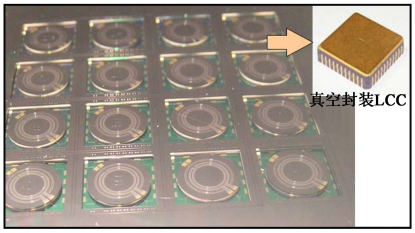


图 6 波音盘式谐振陀螺仪[40]

2014 年,加州大学欧文分校和斯坦福大学联合提出了一种新型的环形陀螺仪结构[41],如图 7 所示。该结构改变了传统的中心支撑方案,将支撑结构放在环形谐振器的外面,将驱动和感应电极放在谐振器的里面。这种结构采用 $n=3$ 振型模态作为其工作模态,可以有效地降低因制造误差导致的频率裂解。但是这种电极内置的方案也会导致电容面积变小,电极之间的分布间隙变小,导致驱动力和检测灵敏降低,寄生电容的影响变大。

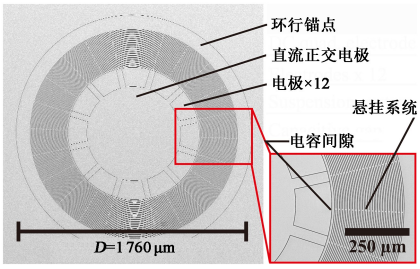


图 7 外支撑多环谐振微陀螺[41]

2016 年,国防科技大学提出了一种刚度解耦的概念,用于增加谐振器的有效质量,降低谐振频率,提升品质因子[42]。这种方法通过在结构上悬挂集总质量块来实现,并在环形微陀螺上得到了验证,如图 8 所示。通过在最外层几圈的辐条上悬挂质量块,使得环形陀螺仪的衰荡时间提升了 5 倍以上,达到 8.695 s,角度随机游走达到 0.000 9°/$\sqrt{\text{h}}$,为高性能环形微陀螺的实现提供了一种新思路。

2018 年,国防科技大学借鉴自然界的蜂窝设计,提出了一种蜂窝状环形微陀螺[43],如图 9。这种拓扑几何结构形状类似于蜂窝,由交错的六角框架组成,采用中心支撑结构。在谐振子的周围分布有 16 个电极,六角槽内布置有内电极。这种结构相比于传统的圆环形结构具有较大的有效质量和电容面积,抵抗制造误差的能力提升了两倍以上,从而拥有更低的频率裂解。蜂窝状环形微陀螺拥有更高的谐振频率,在抗环境干扰方面更具优势。

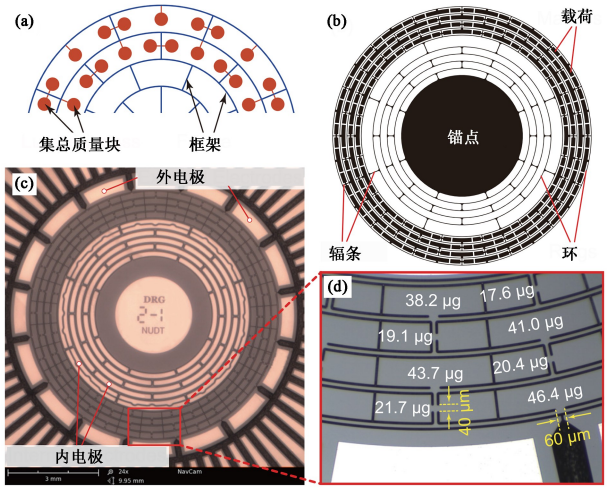


图 8 悬挂集总质量块的环形微陀螺[42]。(a)通过使用单梁将集总质量悬挂在框架上来解耦刚度和质量的示意图;(b)刚度-质量解耦圆盘谐振器结构;(c)制作的刚度-质量解耦圆盘谐振器的显微镜图像概览;(d)悬挂的集总质量的显微镜图像特写

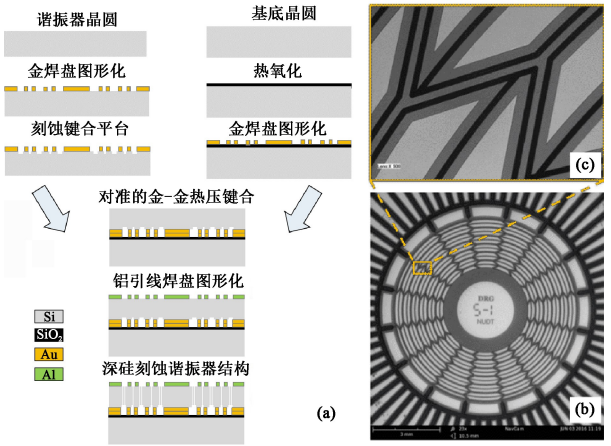


图 9 蜂窝状环形谐振微陀螺[43]。(a)制造工艺;(b)制造的蜂窝状圆盘谐振器的概述;(c)制造的蜂窝状圆盘谐振器的放大视图

2018 年,苏州大学提出了一种蛛网状环形微陀螺结构[44]。如图 10,采用十六边形环代替传统的圆环,同一层之间的直型梁首尾相接,不同层之间的环通过辐条连接,并最终连接到中央锚点上。最外层环的辐条上悬挂有集总质量块,用于实现刚度解耦。

其他层环的间隙内放置电极，用于增加驱动和检测电容面积。相比于传统的圆环形陀螺，该拓扑结构整体不包含弧形结构，谐振子部分均为线性结构，可以进一步减少加工误差，降低频率裂解。最终加工得到的样机频率裂解为 0.56 Hz，经过静电修调之后，频率裂解可以低至 0.01 Hz。

2021 年，国防科技大学提出了一种径向折叠环形微谐振器结构[45]。如图 11，该结构由同心嵌套的径向折叠环组成，环与环之间通过辐条相互连接，不同环之间的厚度不同，最外两圈的环厚度最大。通过仿真验证，该结构具有提供更高热弹性品质因数和更大振幅的潜力。优化后的径向折叠环形微陀螺仪的机械灵敏度相比于传统的圆环形微陀螺提升了 6.5 倍，机械热噪声降低了 36%。

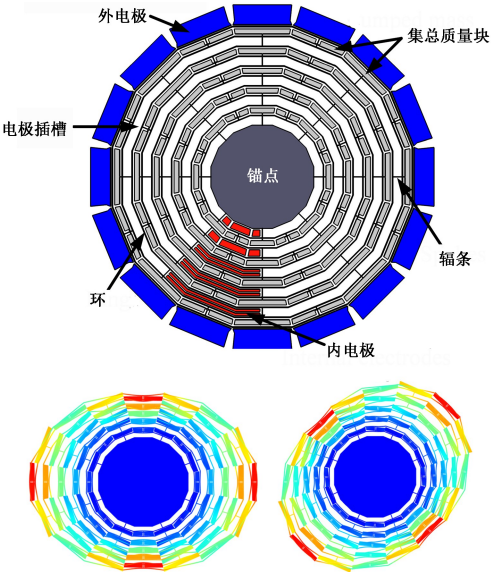


图 10　蛛网状环形微陀螺结构示意图(上)及其椭圆形工作模态[44]

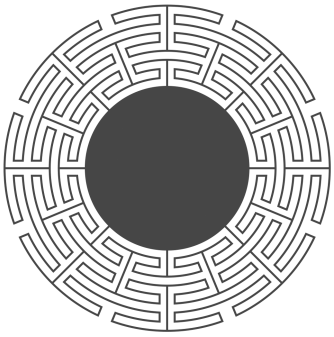


图 11　径向折叠环形微谐振器[45]

2022 年，上海交通大学设计了一款花瓣环形微谐振器[46]。该环形谐振器采用线性结构代替传统的圆环形结构，增强了对制造误差和晶向误差的抗干扰能力。在相同结构参数下，与圆环形微谐振器相比，其谐振频率和频率分裂分别降低了 39.1%和 70.2%，品质因子和衰荡时间分别大幅提高了 63.8%和 172%，表现出应用于高性能微陀螺的巨大潜力。

3　四质量块微谐振陀螺仪的发展

虽然环形微陀螺具有较优的性能、更简单的加工方式，但是由于其较低的模态质量、较小的角度增益和较短的衰荡时间，导致其性能受到较高的角度随机游走的限制(ARW)。由于平面 MEMS 陀螺仪的几何形状在加工过程中是通过光刻步骤确定的，不需要组装、对准步骤，因此设计具有多个移动部件复杂的机械结构以实现低成本批量化制造、刚度和阻尼对称、品质因子大于 100 万、衰荡时间超过几分钟的目标是可行的。四质量块微机械陀螺仪(QMG)具有完全对称的结构和工作模态，可以满足以上标准。四质量块微机械陀螺仪的工作模态的角度增益为 0.75，接近理论上的 1。而对于环形微陀螺来说，$n=2$ 模态的角度增益约为 0.37，$n=3$ 模态的角度增益只有 0.17 左右。四质量块微机械陀螺仪是目前已知报道中性能上限最高的平面微机械陀螺仪[47]。

2010 年，美国加利福尼亚大学欧文分校提出了一种完全对称的四质量块微陀螺结构[48]，如图 12 所示。与双质量块微陀螺类似，四质量微陀螺仪的机械结构包括四个相同的对称解耦质量块、一对用于驱动模态和检测模态的反相位同步杠杆机构以及线性耦合齿之间的弯曲梁。四质量块微陀螺仪的架构建立在双质量设计之上，可以被认为是两个杠杆式双质量音叉陀螺仪，加上额外的线性弯曲梁和反相杠杆机构。由于器件的对称性，驱动模态和检测模态对称，可以实现全角度测量。在接下来的数年内，该机构对四质量微陀螺仪的理论设计、封装工艺、控制理论和全角度控制等进行了大量的研究[49-54]。目前该结构的陀螺仪的品质因子已从原先的 64 万提升到了 200 万以上，零偏稳定性达到了 0.065(°)/h，角度随机游走为 0.005 8(°)/$\sqrt{\text{h}}$，显示出其惯性级导航的能力[55]。

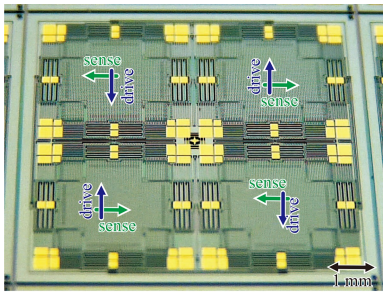


图 12 四质量块微机械陀螺仪[48]

2016 年 Taheri-Tehrani 等设计了一款大小仅有 2 mm×2 mm 的外延封装四质量块微陀螺仪，仅为之前提出的四质量块微陀螺仪样机大小的 16 分之一[56]，如图 13。该结构的品质因子约为 85 000，结合闭环幅值控制和正交补偿电路，可以实现 0.42×10^{-3}(°)/s/VHz 的角度随机游走。

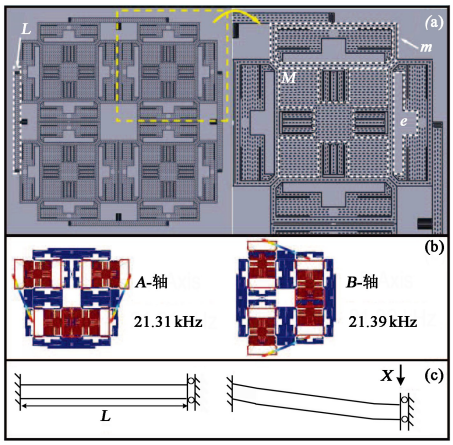


图 13 外延封装的四质量块微陀螺仪[56]

2016 年清华大学提出了一种中心对称的四质量块谐振子(CSQMG)结构[57]。如图 14，CSQMG 由四个沿圆周分布的质量块组成，不同的质量块之间采用 Y 型梁进行连接。整个机构的重心点在结构的最中心，由一个中央锚点进行支撑。每个质量块带有四种电极，用于驱动、检测和调节。随后，该机构对结构参数优化、动力学建模及分析、参数驱动等技术进行了研究，取得了不错的成果[58-61]。

2018 年，航天工业西安飞行控制研究所提出了一种环式分布的四质量块微陀螺[62]。该结构中心是一个环形的耦合梁，四个质量块沿着环形梁分布，彼此之间通过环形耦合梁进行连接。每一个质量块都包含了驱动框、集总质量块和检测框。采用完全对称的结构，可以进行差分检测。该结构的品质因子为 20 万，零偏稳定性优于 4(°)/h。

2018 年，新加坡微电子所提出了一种具有对称结构的四质量块微陀螺仪[63]。如图 15，该结够由四个完全相同的质量块组成，质量块之间采用中央耦合弹簧和四个锥形杆进行连接。该陀螺仪采用同步反相驱动方式，采用差分检测，可以在很大程度上减少由于加速度和振动引起的共模信号。

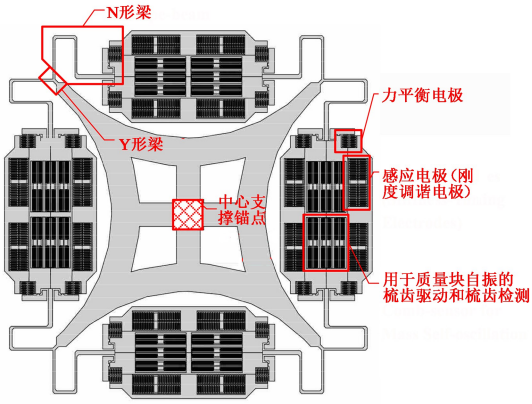


图 14 中心支撑四质量块陀螺仪[57]

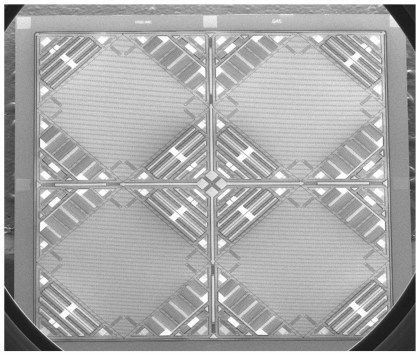


图 15 具有对称结构的四质量块微陀螺仪[63]

2020 年，上海交通大学提出了一种新型的结构解耦四质量块微陀螺仪结构[64]。如图 16，该结构采用梳齿电极的设计和推挽法的方式消除了静电驱动力的二倍频分量，对折叠梁结构进行仿真分析和优化，通过二自由度的设计达到了理想的解耦效果。

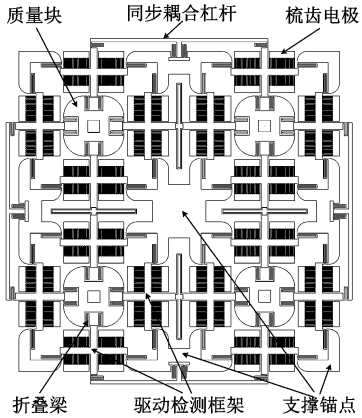


图 16 上海交通大学四质量块微陀螺仪[64]

4　总结和展望

半球陀螺仪拥有最佳的性能和最成熟的理论，也是发展时间最长的机械振动陀螺仪。但是由于其三维结构，加工方式较为复杂，且对加工精度的要求比较高。环形微陀螺采用平面设计，是半球陀螺的结构演化结果。其不仅具有较好的性能，同时其结构较为简单，加工成本较低，是目前最具有吸引力的微机械陀螺仪之一。特别是近几年对微陀螺的模态耦合动态调制[65]、非线性[66]等理论研究逐渐成熟，更一步地促进了环形微陀螺的商业化应用进程。四质量块微陀螺相比于环形微陀螺具有更高的角度增益和模态质量，因此拥有更低的角度随机游走。其采用完全对称的结构设计和两个简并的工作模态，同样可以工作在全角度模式，是目前已知的性能最好的平面微机械陀螺仪，成为了近几年研究的热点。

参考文献：

[1] 淦述荣，刘志强，宋丽君，等. 2021 年国外惯性技术发展与回顾[J]. 导航定位与授时，2022，9(3)：23-30.
Gan Shurong，Liu Zhiqiang，Song Lijun，et al. Development and review of inertial technology abroad in 2021[J]. Navigation Positioning and Timing，2022，9(3)：23-30.

[2] 李　慧，青　晨，冯昌坤，等. 微光学陀螺技术发展[C]// 第五届全国自主导航学术会议(CCAN2021)论文集——下一代轻小型、快响应惯性导航技术，2021：38-46.
Li Hui，Qing Chen，Feng Changkun，et al. Development of micro-optical gyro technology[C]// Proc. of the 5th National Conference on Autonomous Navigation (CCAN2021)-Next Generation Lightweight，Compact and Fast Response Inertial Navigation Technology，2021：38-46.

[3] Broslavets Y Y，Ambartsumyan D M，Semenov V G，et al. Multifrequency solid-state ring laser gyroscope based on YAG_Cr4＋[C]// 2021 28th Saint Petersburg Inter. Conf. on Integrated Navigation Systems (ICINS)，2021：1-8.

[4] John R H. Thin-film waveguides for inertial sensors[J]. Proc. SPIE，1983.

[5] Shkel A M. Type Ⅰ and type Ⅱ micromachined vibratory gyroscopes[C]// Proc. of IEEE/ION PLANS，2006：586-593.

[6] 严吉中，李　攀，刘元正. 原子陀螺基本概念及发展趋势分析[J]. 压电与声光，2015，37(5)：810-817.
Yan Jizhong，Li Pan，Liu Yuanzheng. Analysis of the basic concept and development trend of atomic gyroscope[J]. Piezoelectricity and Acousto Optics，2015，37(5)：810-817.

[7] 刘院省，阚宝玺，石　猛，等. 原子陀螺仪技术研究进展[C]// 第四届航天电子战略研究论坛论文集(新型惯性器件专刊)，2018：11-7，23.
Liu Yuansheng，Kan Baoxi，Shi Meng，et al. Research progress of atomic gyroscope technology[C]// Proc. of the 4th Aerospace Electronics Strategic Research Forum (Special Issue of New Inertial Devices)，2018：11-7，23.

[8] Adams B，Macrae C，Entezami M，et al. The development of a high data rate atom interferometric gravimeter (HIDRAG) for gravity map matching navigation[C]// 2021 IEEE Inter. Symp. on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL)，2021：1-4.

[9] Fuchs G D. Quantum control of spin and orbital states with a diamond MEMS resonator[C]// 2021 21st Inter. Conf. on Solid-State Sensors，Actuators and Microsystems (Transducers)，2021：295.

[10] 沈玉芃，杨文钰，朱　鹤，等. 2020 年国外惯性技术的发展与展望[J]. 飞航导弹，2021(4)：7-12.
Shen Yupeng，Yang Wenyu，Zhu He，et al. Development and prospect of foreign inertial technology in 2020[J]. Aerodynamic Missile J.，2021(4)：7-12.

[11] Liu Z，Zhang W，Cui F，et al. Fabrication and characterisation of microscale hemispherical shell resonator with diamond electrodes on the Si substrate[J]. Micro & Nano Lett.，2019，14(6)：674-677.

[12] Saito D，Yang C，Heidari A，et al. Microcrystalline diamond cylindrical resonators with quality-factor up to 0.5 million[J]. Appl. Phys. Lett.，2016，108(5)：1157-1178.

[13] Gu L T，Zhang W P，Feng J，et al. Development of a novel gear-like disk resonator applied in gyroscope[J]. Appl. Sciences，2022，12(14)：7342.

[14] Prikhodko I P，Zotov S A，Trusov A A，et al. Foucault pendulum on a chip：angle measuring silicon MEMS gyroscope[C]// 2011 IEEE 24th Inter. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems，2011.

[15] Koenig S，Rombach S，Gutmann W，et al. Towards a navigation grade Si-MEMS gyroscope[C]// 2019 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS)，2019：1-18.

[16] Asadian M H，Wang D，Shkel A M. Fused quartz dual-shell resonator gyroscope[J]. J. of Microelectromechanical Systems，2022，31(4)：533-545.

[17] Liu Z，Zhang W，Cui F，et al. Micro-manufacturing Technology of A Three-dimensional Curved Surface Diamond Structure for Gyroscope Applications[M]. IOP Publishing，2019.

[18] Sorenson L D，Gao X，Ayazi F. 3-D micromachined hemispherical shell resonators with integrated capacitive transducers[C]// 2012 IEEE 25th Inter. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)，2012.

[19] Pai P，Chowdhury F K，Mastrangelo C H，et al. MEMS-based hemispherical resonator gyroscopes[C]// Sensors，2012 IEEE，2012：1-4.

[20] Eklund E J，Shkel A M. Glass blowing on a wafer level[J]. J. of Microelectromechanical Systems，2007，16(2)：232-

239.

[21] Cho J Y, Singh S, Woo J, et al. 0.000 16°/$\sqrt{h}$ angle random walk (ARW) and 0.001 4°/h bias instability (BI) from a 5.2 M-Q and 1 cm precision shell integrating (PSI) gyroscope [C]// 2020 IEEE Inter. Symp. on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), 2020: 1-4.

[22] Cho J Y, Yan J, Gregory J A, et al. 3-dimensional blow torch-molding of fused silica microstructures [J]. J. of Microelectromechanical Systems, 2013, 22(6): 1276-1284.

[23] Cho J Y, Najafi K. A high-Q all-fused silica solid-stem wineglass hemispherical resonator formed using micro blow torching and welding[C]// 2015 28th IEEE Inter. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2015: 821-824.

[24] Nagourney T, Cho J Y, Shiari B, et al. 259 second ring-down time and 4.45 million quality factor in 5.5 kHz fused silica birdbath shell resonator[C]// 2017 19th Inter. Conf. on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS), 2017: 790-793.

[25] Li W, Hou Z, Shi Y, et al. Application of Micro-blowtorching Process with Whirling Platform for Enhancing Frequency Symmetry of Microshell Structure [M]. IOP Publishing, 2018.

[26] Li B, Xi X, Lu K, et al. Frequency split suppression of fused silica micro shell resonator based on rotating forming process [J]. Microsystem Technologies, 2021, 27(3): 789-799.

[27] Li W, Xi X, Lu K, et al. A novel high transduction efficiency micro shell resonator gyroscope with 16 T-shape masses using out-of-plane electrodes[J]. IEEE Sensors J., 2019, 19(13): 4820-4828.

[28] Shi Y, Lu K, Li B, et al. Micro hemispherical resonators with quality factor of 1.18 million fabricated via laser ablation [C]//2021 IEEE 34th Inter. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2021: 6-9.

[29] Luo B, Shang J, Zhang Y. Hemispherical glass shell resonators fabricated using chemical foaming process[C]// 2015 IEEE 65th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 2015: 2217-21.

[30] Luo B, Shang J, Su Z, et al. Predicting height and determining mass of foaming agents for glass shell resonators [C]// 2018 IEEE Inter. Symp. on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), 2018: 1-2.

[31] Fegely L C, Hutchison D N, Bhave S A. Isotropic etching of 111 SCS for wafer-scale manufacturing of perfectly hemispherical silicon molds[C]// 2011 16th Inter. Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conf., 2011: 2295-2298.

[32] Liu Z, Zhang W, Cui F, et al. Three-dimensional micromachined diamond birdbath shell resonator on silicon substrate[J]. Microsys. Technol., 2020, 26(4): 1293-1299.

[33] Shao P, Tavassoli V, Mayberry C L, et al. A 3D-HARPSS polysilicon microhemispherical shell resonating gyroscope _ design, fabrication, and characterization[J]. IEEE Sensors J., 2015, 15(9): 4974-4985.

[34] Wan Q, Gu H, Fan B, et al. A high symmetry polysilicon micro hemispherical resonating gyroscope with spherical electrodes[C]// 2017 IEEE Sensor, 2017: 1-3.

[35] Tavassoli V, Hamelin B, Ayazi F. Substrate-decoupled 3D micro-shell resonators[C]// 2016 IEEE Sensors, 2016: 1-3.

[36] Gray J M, Houlton J P, Gertsch J C, et al. Hemispherical Micro-resonators from Atomic Layer Deposition [M]. IOP Publishing, 2014.

[37] Putty M W. A micromachined vibrating ring gyroscope[D]. University of Michigan, 1995.

[38] Ayazi F, Najafi K. A HARPSS polysilicon vibrating ring gyroscope[J]. J. of Microelectromechanical Systems, 2001, 10(2): 169-179.

[39] He G, Najafi K. A single-crystal silicon vibrating ring gyroscope[C]// Technical Digest of Fifteenth IEEE Inter. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems (Cat No02CH37266), 2002: 718-721.

[40] Challoner A D, Howard H G, Liu J Y. Boeing disc resonator gyroscope[C]// 2014 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium-PLANS 2014, 2014: 504-514.

[41] Senkal D, Askari S, Ahamed M J, et al. 100 K *Q*-factor toroidal ring gyroscope implemented in wafer-level epitaxial silicon encapsulation process[C]// 2014 IEEE 27th Inter. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2014: 24-27.

[42] Zhou X, Xiao D, Wu X, et al. Stiffness-mass decoupled silicon disk resonator for high resolution gyroscopic application with long decay time constant (8.695 s)[J]. Appl. Phys. Lett., 2016, 109(26): 263501.

[43] Xiao D, Zhou X, Li Q, et al. Honeycomb-like disk resonator with high immunity to fabrication error for gyroscopic application[C]// 2017 IEEE 30th Inter. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2017: 1126-1129.

[44] Fan B, Guo S, Yu L, et al. A novel sixteen-sided cobweb-like disk resonator gyroscope with low as-fabricated frequency split between drive and sense modes [C]// 2018 IEEE Sensors, 2018: 1-4.

[45] Ren X, Zhou X, Tao Y, et al. Radially pleated disk resonator for gyroscopic application [J]. J. of Microelectromechanical Systems, 2021, 30(6): 825-835.

[46] Gu L, Zhang W, Lu H, et al. Flower-like disk resonator for gyroscopic application[J]. Review of Scientific Instruments, 2022, 93(11): 115006.

[47] Trusov A A, Atikyan G, Rozelle D M, et al. Flat is not dead: Current and future performance of Si-MEMS quad mass gyro (QMG) system[C]// 2014 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium-PLANS 2014, 2014.

[48] Trusov A A, Prikhodko I P, Zotov S A, et al. Ultra-high Q silicon gyroscopes with interchangeable rate and whole angle modes of operation[C]// 2010 IEEE Sensors, 2010.

[49] Trusov A A, Prikhodko I P, Zotov S A, et al. Low-dissipation silicon tuning fork gyroscopes for rate and whole angle measurements[J]. IEEE Sensors J., 2011, 11(11): 2763-2770.

[50] Zotov S A, Prikhodko I P, Trusov A A, et al. Frequency modulation based angular rate sensor[C]// 2011 IEEE 24th Inter. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems, 2011.

[51] Prikhodko I P, Zotov S A, Trusov A A, et al. Foucault pendulum on a chip: Rate integrating silicon MEMS gyroscope[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2012, 77: 67-78.

[52] Zotov S A, Simon B R, Sharma G, et al. Utilization of mechanical quadrature in silicon MEMS vibratory gyroscope to increase and expand the long term in-run bias stability [C]// 2014 Inter. Symp. on Inertial Sensors and Systems (ISISS), 2014.

[53] Askari S, Asadian M H, Kakavand K, et al. Vacuum sealed and getter activated MEMS quad mass gyroscope demonstrating better than 1.2 million quality factor[C]// 2016 IEEE Inter. Symp. on Inertial Sensors and Systems, 2016.

[54] Asadian M H, Askari S, Shkel A M. An ultrahigh vacuum packaging process demonstrating over 2 million Q-factor in MEMS vibratory gyroscopes[J]. IEEE Sensors Lett., 2017, 1(6): 1-4.

[55] Askari S, Asadian M H, Shkel A M. Performance of quad mass gyroscope in the angular rate mode[J]. Micromachines-Basel, 2021, 12(3): 266.

[56] Taheri-Tehrani P, Kline M, Izyumin I, et al. Epitaxially-encapsulated quad mass gyroscope with nonlinearity compensation[C]// 2016 IEEE 29th Inter. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2016.

[57] Zhou B, Zhang T, Yin P, et al. Innovation of flat gyro: Center support quadruple mass gyroscope[C]// 2016 IEEE Inter. Symp. on Inertial Sensors and Systems, 2016.

[58] Zhang T, Zhou B, Yin P, et al. Optimal design of a center support quadruple mass gyroscope (CSQMG)[J]. Sensors-Basel, 2016, 16(5): 613.

[59] Zhang T, Zhou B, Yin P, et al. Multi-order system dynamic model of the center support quadruple mass gyro (CSQMG) [C]// 2016 IEEE Sensors, 2016.

[60] Song M, Zhou B, Zhang T, et al. Parametric drive of a micro rate integrating gyroscope using discrete electrodes [C]// 2017 IEEE Inter. Symp. on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), 2017.

[61] Zhang T, Zhou B, Song M, et al. Structural parameter identification of the center support quadruple mass gyro[J]. IEEE Sensors J., 2017, 17(12): 3765-3775.

[62] 王　永，孟　冰，陈旭辉，等. 一种环式分布的四质量块微机械陀螺研究[C]// 2018 惯性技术发展动态发展方向研讨会，2018.
Wang Yong, Meng Bing, Chen Xuhui, et al. Research on a ring distributed four mass micromechanical gyroscope[C]// 2018 Seminar on Dynamic Development Direction of Inertial Technology, 2018.

[63] Wu G, Chua G L, Singh N, et al. A quadruple mass vibrating MEMS gyroscope with symmetric design[J]. IEEE Sensors Lett., 2018, 2(4): 1-4.

[64] 李敏阳，张卫平，谷留涛，等. 结构解耦四质量块微陀螺仪的设计与制备[J]. 半导体光电，2020，41(2)：177-181.
Li Minyang, Zhang Weiping, Gu Liutao, et al. Research on design and fabrication of structure-decoupled quadruple mass MEMS gyroscope[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2020, 41(2): 177-181.

[65] Zhou X, Zhao C, Xiao D, et al. Dynamic modulation of modal coupling in microelectromechanical gyroscopic ring resonators[J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 4980.

[66] Miao T, Zhou X, Wu X, et al. Nonlinearity-mediated digitization and amplification in electromechanical phonon-cavity systems[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 2352.

作者简介：

谷留涛(1994—)，男，河南省周口市人，博士，主要研究方向为微惯性传感器及其应用；

张卫平(1971—)，男，教授，博士生导师，主要从事先进微型机器人与微型无人机、先进微纳惯性技术、微机电系统(MEMS)、精密仪器、电路控制与嵌入式系统及其集成技术的研究。