MEMS 和 MOEMS 技术专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022092003

波浪式 MEMS 谐振陀螺的设计与研究

卢浩琳[1,2]，张卫平[1*]，谷留涛[1,2]

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

摘　要： 提出并研制了一种具有高机械灵敏度和低零偏稳定性的新型波浪式 MEMS 谐振陀螺（WDRG）。该结构的设计方法是将传统的环式 MEMS 谐振陀螺（DRG）转变为波浪式环，以提供更高的热弹性品质因数。此外，与传统 DRG 相比，WDRG 具有更高的制造误差抗扰度。通过优化结构参数，进一步提高了 WDRG 的性能。通过有限元法（FEM）给出了主要结构参数对 WDRG 性能的影响。优化后 WDRG 的热弹性品质因数、机械灵敏度和偏置稳定性分别为 450 k，1.05 μm/(°/s)和 0.076(°)/h。与传统 DRG 相比，零偏稳定性降低了 90%，热弹性品质因数和机械灵敏度分别提高了 215%和 950%。

关键词： MEMS 谐振陀螺；品质因数；机械灵敏度；偏置稳定性；有限元法

中图分类号： TN751.2　**文章编号：** 1001－5868(2022)06－1049－06

Design and Research of a Novel Wave-like MEMS Resonator Gyroscope

LU Haolin[1,2], ZHANG Weiping[1], GU Liutao[1,2]

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Micro Nano Fabrication, Shanghai 200240, CHN;
2. Department of Micro Nano Electronics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, CHN)

Abstract: In this paper, a novel wave-like disk resonator gyroscope (WDRG) with high mechanical sensitivity and low zero-bias stability was proposed and developed. The structure was designed by turning the traditional disk resonator gyroscope (DRG) rings into wavy rings, which had the potential to provide a higher thermo-elastic quality factor. In addition, the WDRG had higher fabrication error immunity compared with the traditional DRG. The performance of WDRG was further improved by optimizing the structural parameters. The influence of the main structural parameters on the WDRG's critical performances was given through finite element method (FEM). The new prototype's optimized thermalelastic quality factor, mechanical sensitivity, and bias stability are 450 k, 1.05 μm/(°/s), and 0.076°/h, respectively. Compared with traditional DRG, the zero-bias stability is significantly decreased by 90%, and the thermalelastic quality factor and mechanical sensitivity are considerably improved by 215% and 950%, respectively.

Key words: MEMS disk resonator gyroscope; quality factor; mechanical sensitivity; bias stability; finite element method

0　引言

与传统机械陀螺相比，微机电系统（MEMS）陀螺在尺寸、重量、成本和功耗方面更具有优势，因此已成为研究热点之一[1-3]。在 MEMS 陀螺中，环形 MEMS 谐振陀螺因具有低频率裂解、高电容灵敏度和高有效质量的优点，成为下一代高精度 MEMS 陀螺的有力竞争者[4]。

收稿日期：2022－09－20.
基金项目：国家自然科学基金项目(61574093).
* **通信作者：**张卫平　**E-mail:** zwp37@163.com

品质因数是陀螺的关键参数之一，它直接决定了陀螺的性能水平。提高机械灵敏度可以防止陀螺的微弱信号被噪声淹没。零偏稳定性是陀螺的关键参数，提高该参数可以提升陀螺精度。此外，由制造误差引起的结构不对称将导致频率和品质因数失配，这意味着陀螺仪的制造误差抗扰度也需要提高。

为了提高环式谐振陀螺(DRG)的性能，国内外进行了多种类型的研究。文献[5-8]中提出的蜂巢式 MEMS 谐振陀螺通过添加悬浮质量块的方法来提高品质因数，并通过结构设计提高了制造误差抗扰度。文献[9]中提出的蛛网式 MEMS 谐振陀螺通过优化结构减少了频率裂解。文献[10]中提出的齿轮式 MEMS 谐振陀螺通过降低有效刚度和频率裂解提高了机械灵敏度。文献[11]中提出的径向折叠 MEMS 谐振器通过修改环的厚度分布和径向折叠的结构设计，增强了热弹性品质因数和机械灵敏度。此外，文献[12]中通过优化热传导路径，减少了品质因子失配。

本文提出并研制了一种在热弹性品质因子、机械灵敏度和零偏稳定性上具有优越性的波浪式 MEMS 谐振陀螺(WDRG)，并通过有限元仿真，系统地优化了主要结构参数。最后，在相同结构参数下，比较了优化后的 WDRG 与传统 DRG 的性能。

1 结构设计

1.1 结构设计方法

Dustin 等人证明，DRG 的主要能量损耗是热弹性损耗(TED)[13]。基于齐纳标准滞弹性模型，热弹性品质因子 Q_{TED} 与角频率 ω 之间的关系如下[14]：

$$Q_{\mathrm{TED}}=\frac{C_{\mathrm{p}}\rho}{E\alpha^{2}T_{0}}\cdot\frac{1+(\omega\tau_{z})^{2}}{\omega\tau_{z}} \tag{1}$$

式中，C_{p} 为恒压或应力下单位体积的热容，E 为杨氏模量的等温值，α 为材料的热膨胀系数，T_0 为平衡温度，机械时间常数 $\tau_z=b^2/(\pi^2\chi)$，χ 为固体的热扩散率，b 为梁的宽度。

如图 1 所示，当机械时间常数 τ_z 和热时间 $1/\omega$ 相等时，通过热弹性损耗的能量耗散达到最大值，此时 Q_{TED} 取最小值。根据波幅数目 n 的不同，陀螺的模态可以定义为 $n=1,2,3,\cdots$ 模态。MEMS 谐振陀螺通常工作在 $n=2$ 模态。在 $n=2$ 模态下运行的 DRG 处于等温状态($\omega\tau_z\ll1$)。为了改善 Q_{TED}，应将 ω 与 τ_z 进一步分离，这意味着谐振频率 $f_0=\omega/(2\pi)$ 应更低[15]。WDRG 的结构设计如图 2(a)所示。将传统的圆环修改为波浪形环可以有效降低刚度，从而降低 f_0。此外，该结构还可以增大传感电容面积。

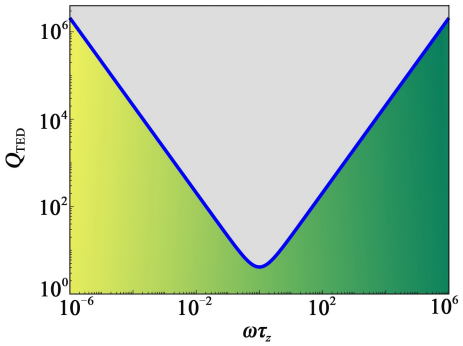
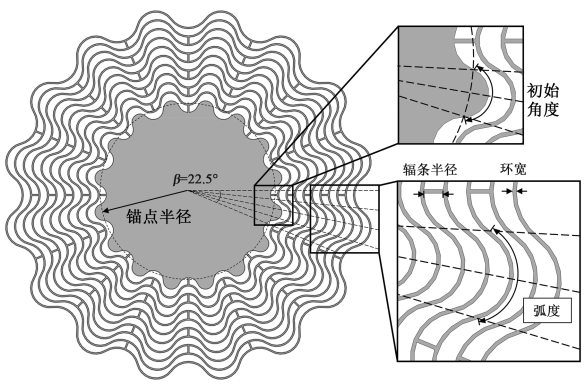


图 1 角频率 ω 与热弹性品质因子 Q_{TED} 的关系

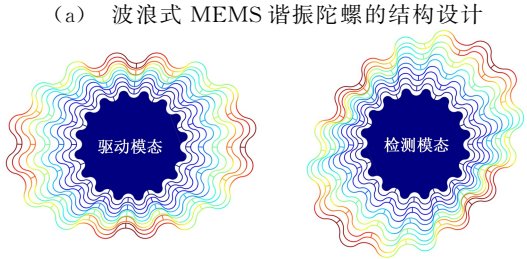
WDRG 从传统 DRG 的拓扑结构转换而来。如图 2 所示，它由 10 个波形环、一个中央锚点和连接辐条组成，角度 β 平均分为四部分，每部分角度为 5.625°，结构的厚度为 120 μm。基本结构参数包括锚点外径比 AOR、辐条长度 L_s、环宽 W 和最内圈环的初始角度 θ。此外，与内圈相比，外圈的角度逐圈减小，减小的角度为 $\Delta\theta$。图 2(a)中的弧角 θ_i 满足以下表达式：

$$\theta_N=\theta+N\cdot\Delta\theta \tag{2}$$

其中，N 为环数。



(a) 波浪式 MEMS 谐振陀螺的结构设计



(b) 二阶模态

图 2 波浪式 MEMS 谐振陀螺的结构设计和二阶模态

第 2 节将讨论 WDRG 的基本参数对陀螺性能

的影响。WDRG 在 $n=2$ 模态下运行，如图 2(b)所示，该模态包括两个简并模态，它们有相同的谐振频率和类似的振型，分别作为陀螺的驱动模态和检测模态，两个模态互成 45°。

1.2　仿真分析

本文使用 COMSOL Multiphysics 通过有限元法（FEM）计算比较 DRG 和 WDRG 的特性。WDRG 的结构参数，如环宽、辐条长度、锚点半径和陀螺的结构高度，与 DRG 相同。为了提高结果的可靠性，设置了两种辐条长度的陀螺结构。Ⅰ型陀螺的辐条长度为 100 μm，Ⅱ型陀螺的辐条长度为 150 μm。与传统 DRG 相比，WDRG 具有更高的机械灵敏度、更小的零偏稳定性和更高的制造误差抗扰性。

机械灵敏度 S_{mech}（单位为(m/(°/s))）定义为每个单位转速输入下检测模态的位移振幅，可由如下公式[16]表示：

$$S_{\mathrm{mech}}=\frac{4A_{\mathrm{g}}Qx_0}{2\pi f_0}\cdot\frac{\pi}{180} \tag{3}$$

式中，A_{g} 是角度增益，x_0 是驱动振幅，Q 是主要由 Q_{TED} 决定的品质因子。在本研究中，假设驱动振幅为常数 2 μm。可以在 COMSOL Multiphysics 中仿真得到 $n=2$ 模态的谐振频率 f_0、角度增益 A_{g} 和热弹性品质因子 Q_{TED}。基于机械噪声（布朗噪声）的机械角随机游走（ARW_{mech}，单位为(°)/$\sqrt{h}$）由以下公式[4]表示：

$$ARW_{\mathrm{mech}}=\frac{1}{2A_{\mathrm{g}}x_0}\sqrt{\frac{k_{\mathrm{B}}T}{m_{\mathrm{eff}}2\pi f_0 Q}}\times\frac{180}{\pi}\times 60 \tag{4}$$

式中，k_{B} 是玻耳兹曼常数，T 是绝对温度，m_{eff} 是有效质量，可由 COMSOL Multiphysics 计算[10]。根据等式(3)和(4)，增加 Q，m_{eff} 和 A_{g} 可以改善陀螺的机械性能。

表 1 总结了 DRG 和 WDRG 的计算结果。在相同结构参数下，WDRG 中的 S_{mech} 约为 DRG 的 5 倍。由于 f_0 的减小与 Q 的增大可比，因此 WDRG 的 ARW_{mech} 几乎与 DRG 相同。

表 1　WDRG 和 DRG 的性能计算结果对比

Types	DRG Ⅰ	DRG Ⅱ	WDRG Ⅰ	WDRG Ⅱ
f_0/Hz	33 660	22 394	14 976	11 440
A_{g}	0.395	0.395	0.397	0.395
m_{eff}/mg	0.22	0.25	0.24	0.26
Q_{TED}	46 255	67 455	104 310	136 700
S_{mech}/(μm/(°/s))	0.012	0.026	0.061	0.105
ARW_{mech}/(°/$\sqrt{\mathrm{h}}$)	0.003 0	0.002 8	0.002 8	0.002 7

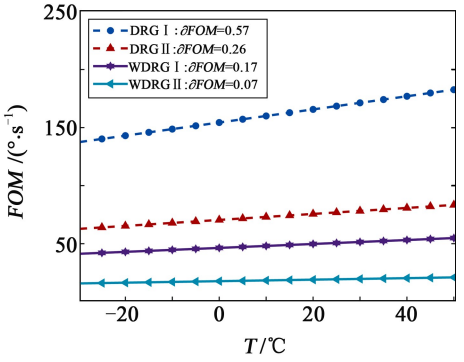
零偏定义为陀螺在零转速输入下的输出。零偏由以下公式[4]表示：

$$\Omega_{\mathrm{bias}}=FOM\times P=\frac{360f_0}{4A_{\mathrm{g}}Q}\times P \tag{5}$$

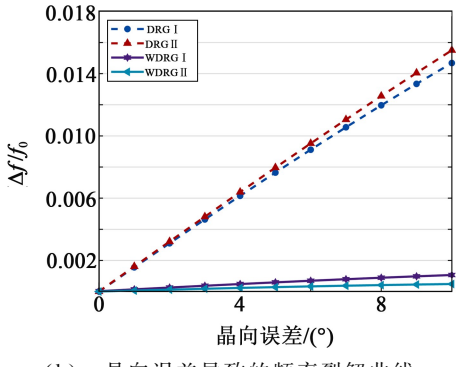
其中，FOM 是优值指标，P 是相对精度，它取决于由 MEMS 工艺能力决定的整体机械不对称性。对于典型的硅陀螺工艺[4]，P 为 3 000 ppm。零偏稳定性表示由于环境因素引起的零偏漂移，通常是由环境温度变化引起的。零偏稳定性表示为零偏关于温度的导数[4]：

$$\partial\Omega_{\mathrm{bias}}=\partial(FOM\times P)=\partial FOM\times P+FOM\times\partial P \tag{6}$$

其中，∂P 假定为常数 0.8 ppm，FOM 可以通过 FEM 计算。FOM 相对于温度的曲线如图 3(a)所示，其中曲线的斜率表示 ∂FOM。由公式(6)可知，在实验室环境温度(20 ℃)下，Ⅰ型和Ⅱ型 DRG 的 $\partial\Omega_{\mathrm{bias}}$ 分别为 6.58 和 3.01(°)/h，而Ⅰ型和Ⅱ型 WDRG 的 $\partial\Omega_{\mathrm{bias}}$ 分别为 1.98 和 0.76(°)/h。计算结果表明，在实验室环境温度下，WDRG 的零偏稳定性分别是传统 DRG 的 2.3 倍和 3 倍。



(a)　FOM 随温度变化的曲线



(b)　晶向误差导致的频率裂解曲线

图 3　FOM 随温度变化的曲线和晶向误差导致的频率裂解曲线

目前，MEMS 谐振陀螺主要由(111)硅晶片制成。晶向误差是(111)器件常见且不可避免的制造

误差来源[17]。晶向误差将导致陀螺不对称，因此，晶向误差可由 $n=2$ 模态的频率裂解 Δf 表示。使用 FEM 可计算 WDRG 和 DRG 由晶向误差导致的频率裂解，结果如图 3(b)所示，表明在给定的晶向误差下，WDRG 的 $\Delta f/f_0$ 比传统 DRG 小约 7 倍。

综上所述，WDRG 的设计可以有效地降低结构刚度并提高结构的品质因子。此外，与传统的 DRG 相比，它在机械灵敏度、偏置稳定性和制造误差抗扰度方面具有更大的优势。

2 结构优化

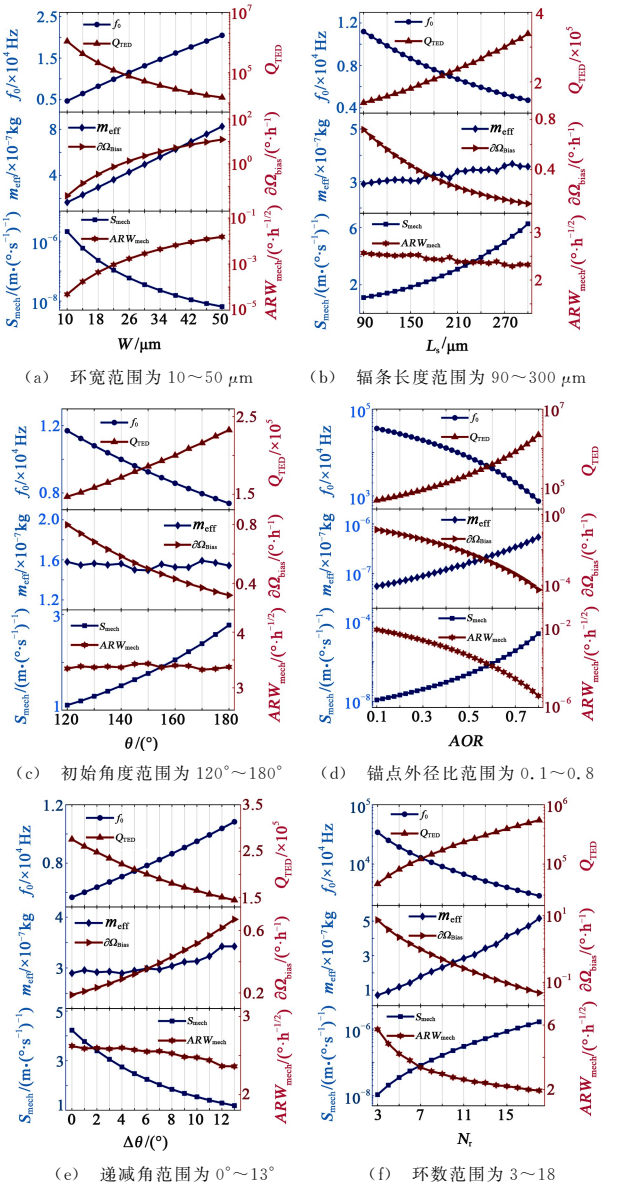
为分析 WDRG 结构参数对性能的影响，使用有限元法计算陀螺主要结构参数对关键性能的影响。谐振环是 WDRG 的主要振动结构，环长度 L_s 会改变陀螺的传热通道，从而影响性能[13]，锚点外径比(AOR)是确定陀螺仪尺寸的重要参数，也会影响陀螺仪的性能。本文对 WDRG 的上述六个结构参数进行了优化。讨论了它们对谐振频率 f_0、热弹性品质因子 Q_{TED}、有效质量 m_{eff}、偏置稳定性 $\partial\Omega_{\mathrm{bias}}$、机械灵敏度 S_{mech} 和机械角随机游走 ARW_{mech} 的影响。在研究过程中，除优化参数外，其他参数均保持不变。

如图 4(a)所示，随着环宽的增加，陀螺的有效刚度上升导致 f_0 增加、Q_{TED} 和 S_{mech} 下降。Q_{TED} 和 S_{mech} 的下降率随着环宽的增加而减小，说明在环宽较小的情况下，陀螺的性能受环宽的影响更为显著。同时，$\partial\Omega_{\mathrm{bias}}$ 和 ARW_{mech} 随着环宽的增加而增加。结果表明在制造工艺允许的条件下应尽量减小环宽。

如图 4(b)所示，Q_{TED} 随着辐条长度的增加而增加，主要原因是辐条长度的增加导致通过它的热通量减少。由于谐振环是提供 m_{eff} 的主要来源，辐条长度对 m_{eff} 的影响并不明显。由于 f_0 的下降与 Q_{TED} 的增加相当，ARW_{mech} 主要由 m_{eff} 决定。综上所述，辐条长度应尽可能大，但随之而来的是样品尺寸增大、成本和制造故障率的增加，将辐条长度设置为 120～150 μm 较为合适。

如图 4(c)所示，初始角度主要影响陀螺仪的 f_0，Q_{TED}，$\partial\Omega_{\mathrm{bias}}$ 和 S_{mech}。初始角度的增加可以有效降低陀螺仪的有效刚度，从而有利于提高性能。总体而言，初始角度应保持在 160°～180°。

在分析 AOR 的影响时，辐条长度和环的数目保持不变。通过改变锚点的尺寸可改变 AOR，陀螺的外径会随着锚点的增大而增大。如图 4(d)所示，随着 AOR 的增加，各方面的性能都有所提高，主要原因是外径增加引起的有效刚度降低。增加 AOR 可以有效增加 m_{eff}，原因是增加 AOR 会使更多层数的环对 m_{eff} 有贡献($AOR=0.1$ 时为 5 圈环，$AOR=0.8$ 时为 9 圈环)。总体而言，应尽可能提高 AOR。然而，考虑到外半径通常是有限的，可接受的 AOR 范围在 0.4～0.6。



(a) 环宽范围为 10～50 μm　(b) 辐条长度范围为 90～300 μm

(c) 初始角度范围为 120°～180°　(d) 锚点外径比范围为 0.1～0.8

(e) 递减角范围为 0°～13°　(f) 环数范围为 3～18

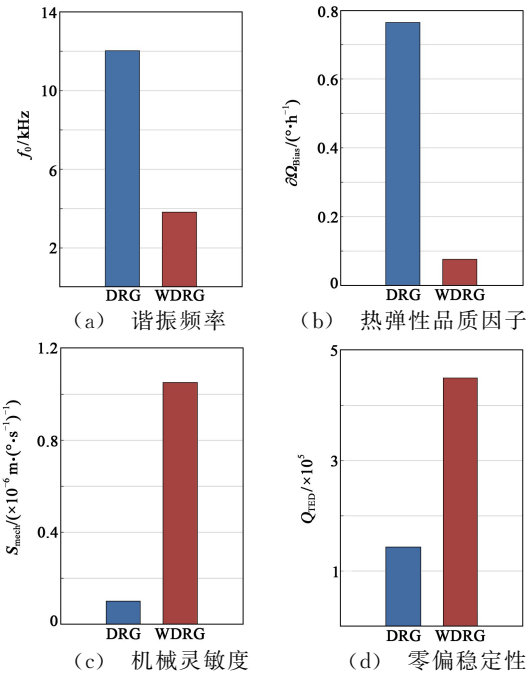
图 4 结构参数对 f_0，Q_{TED}，M_{eff}，$\partial\Omega_{\mathrm{bias}}$，$S_{\mathrm{mech}}$ 和 ARW_{mech} 的影响

如图 4(e)所示，随着 $\Delta\theta$ 的增加，f_0 和 Q_{TED} 增加，导致 $\partial\Omega_{\mathrm{bias}}$ 增加，S_{mech} 减小。同时，m_{eff} 略有增加。可能的解释是 $\Delta\theta$ 的增加使具不同层环的刚度

分布均匀，导致更多环对 m_{eff} 产生贡献。综合考虑工艺条件和性能，应将 $\Delta\theta$ 设置为 3°～5°。

在分析环数的影响时，将 $\Delta\theta$ 设置为 0°，以保证每个环的角度相同，避免其对结果产生影响。如图 4(f)所示，随着环数的增加，陀螺的性能提高，增长速度随着环数的增加而减慢。超过 13 环后，增长率趋于平缓。综合考虑到尺寸和性能，适当的环数范围在 9～13。

根据以上分析，优化后的 WDRG 参数设置为如下数值：环宽 18 μm，辐条长度 120 μm，锚点直径 4 200 μm($AOR=0.525$)，初始角度为 170°，递减角度为 4°，环数为 11。参考文献[18,19]给出了传统 DRG 的结构参数与性能的关系，其在环宽、辐条长度、环数和 AOR 变化规律与 WDRG 相似。为了更好地比较结构设计对陀螺性能的影响，将 WDRG 和 DRG 的所有结构参数设置为相同。图 5 总结了相同参数下优化的 WDRG 和 DRG 的性能。WDRG 的谐振频率、热弹性品质因子、机械灵敏度和零偏稳定性分别为 3 820 Hz，450 k，1.05 μm/(°/s) 和 0.076(°)/h。与 DRG 相比，WDRG 的 f_0 和 $\partial\Omega_{\mathrm{bias}}$ 分别显著降低了 68.2% 和 90%。同时，Q_{TED} 和 S_{mech} 分别大幅提升了 215% 和 950%。上述分析表明，WDRG 具有成为高性能陀螺的潜力。



(a) 谐振频率　(b) 热弹性品质因子

(c) 机械灵敏度　(d) 零偏稳定性

图 5　DRG 和 WDRG 的性能对比

3　结论

本文提出了一种有利于提高热弹性品质因子和零偏稳定性的新型波浪式 MEMS 谐振陀螺。通过 FEM 计算主要结构参数对 WDRG 关键性能的影响。根据仿真结果得到了优化后的 WDRG 结果参数。新结构的热弹性品质因子、机械灵敏度和零偏稳定性分别为 450 k，1.05 μm/(°/s)和 0.076(°)/h。与传统的 DRG 相比，零偏稳定性降低了 90%，热弹性品质因子和机械灵敏度分别提高了 215% 和 950%。综上所述，WDRG 在零偏稳定性、热弹性品质因子和机械灵敏度方面显示出更好的特性。

参考文献：

[1] Passaro V M N, Cuccovillo A, Vaiani L, et al. Gyroscope technology and applications: A review in the industrial perspective[J]. Sensors, 2017, 17(10): 2284.

[2] Fischer A C, Forsberg F, Lapisa M, et al. Integrating MEMS and ICs[J]. Microsystems & Nanoengineering, 2015, 1(1): 15005.

[3] Ren X, Zhou X, Yu S, et al. Frequency-modulated MEMS gyroscopes: A review[J]. IEEE Sensors J., 2021, 21(23): 26426-26446.

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

[5] Li Q, Xiao D, Zhou X, et al. A novel honeycomb-like disk resonant gyroscope[C]// 2017 19th Inter. Conf. on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers), 2017: 532-535.

[6] Xu Y, Li Q, Zhou X, et al. Stiffness-mass decoupled honeycomb-like disk resonator gyroscope[C]// 2019 IEEE 32nd Inter. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2019: 656-659.

[7] Zhang Y, Yu S, Sun J, et al. A rate-integrating honeycomb disk resonator gyroscope with 0.038°/h bias instability and 7 000°/s measurement range[J]. IEEE Electron Device Lett., 2021, 42(4): 581-584.

[8] Wang P, Sun J, Gao K, et al. Multi-electrode electrostatic tuning theory and method of a honeycomb-like disk resonator gyroscope[C]// 2018 IEEE Sensors, 2018: 1-4.

[9] Fan B, Guo S, Cheng M, et al. A novel high-symmetry cobweb-like disk resonator gyroscope[J]. IEEE Sensors J., 2019, 19(22): 10289-10297.

[10] Feng J, Zhang W, Gu L, et al. Design of a novel gear-like disk resonator gyroscope with high mechanical sensitivity[J]. Microsystem Technologies, 2021, 27(7): 2715-2722.

[11] 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.

[12] Abdelli H, Tsukamoto T, Tanaka S. Quality factor trimming method using thermoelastic dissipation for multi-

ring resonator[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2021, 332: 113044.

[13] Gerrard D D, Rodriguez J, Ortiz L C, et al. Manipulation of heat flux paths in thermo-elastically damped resonators for *Q* optimization[C]// 2017 IEEE 30th Inter. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2017: 1130-1133.

[14] Lifshitz R, Roukes M L. Thermoelastic damping in micro- and nanomechanical systems[J]. Phys. Rev. B, 2000, 61(8): 5600-5609.

[15] Zhou X, Xiao D, Wu X, et al. Mitigating thermoelastic dissipation of flexural micromechanical resonators by decoupling resonant frequency from thermal relaxation rate [J]. Phys. Rev. Appl., 2017, 8(6): 064033.

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

[17] Li Q, Xiao D, Zhou X, et al. Research on the high fabrication error immunity of the honeycomb-like disk resonator gyroscope [C]// 2018 IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2018: 1016-1019.

[18] Zhou X, Xiao D, Hou Z, et al. Influences of the structure parameters on sensitivity and brownian noise of the disk resonator gyroscope [J]. J. of Microelectromechanical Systems, 2017, 26(3): 519-527.

[19] Gerrard D D, Ahn C H, Flader I B, et al. *Q* factor optimization in disk resonator gyroscopes via geometric parameterization[C]// 2016 IEEE 29th Inter. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2016: 994-997.

作者简介：

卢浩琳(1997—)，女，广东省中山市人，硕士研究生，主要研究方向为 MEMS 谐振陀螺的设计与工艺制造；

张卫平(1971—)，男，博士，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。