

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413525

基于模态局部化效应的高分辨力微型电场传感器*

王若航¹, 杨鹏飞^{1,2,3}, 顾羽¹, 李晓南¹, 彭春荣³

(1. 北京信息科技大学理学院 北京 100192; 2. 北京信息科技大学北京市传感器重点实验室 北京 100192;
3. 中国科学院空天信息创新研究院传感器技术全国重点实验室 北京 100190)

摘要:模态局部化效应是提高 MEMS 物理量传感器灵敏度和分辨力的有效途径。然而,由于没有深入研究电场引入方法,导致目前已报道的模态局部化 MEMS 电场传感器的分辨力没有达到弱电场探测需求。为此,基于模态局部化效应提出一种高分辨力 MEMS 电场传感器。传感器主要由电场引入结构、三自由度弱耦合谐振系统及封装基座构成,采用浮动分立式高分辨力电场引入结构设计方案,建立理论模型优化结构参数;以三自由度弱耦合谐振器振幅比的算术平方根作为电场传感器的输出,解决非线性输出问题;基于有限元仿真,分析了传感器的振动模态,并研究了电场感应电极的旋转对电场测量带来的影响。在真空条件下对已制备的电场传感器样片进行测试,结果表明:在 0~7 kV/m 待测电场范围内,传感器的灵敏度为 $0.068 / (\text{kV} \cdot \text{m}^{-1})$,本底噪声为 $0.0121 (\text{V} \cdot \text{m}^{-1}) / \sqrt{\text{Hz}}$;传感器的分辨力优于 0.4 V/m,是目前国内外报道的最好水平。此外,在待测电场中旋转电场感应电极,对其灵敏度进行测试;并对传感器的三自由度弱耦合谐振器的模态局部化现象进行深入研究,发现可以通过驱动和扰动不同谐振器控制模态局部化现象发生在特定的谐振器和特定的模态上。

关键词: MEMS; 模态局部化现象; 电场引入结构; 灵敏度; 分辨力

中图分类号: TH73 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.10

High resolution micro electric field sensor based on mode localization effect

Wang Ruohang¹, Yang Pengfei^{1,2,3}, Gu Yu¹, Li Xiaonan¹, Peng Chunrong³

(1. School of Applied Science, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China; 2. Beijing Key Laboratory for Sensors, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China; 3. State Key Laboratory of Transducer Technology, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The mode localization effect is a proven approach for enhancing the sensitivity and resolution of MEMS physical quantity sensors. However, the lack of in-depth research on electric field introduction methods has limited the resolution of currently reported mode-localized electric field microsensors, preventing them from meeting the requirements for weak electric field detection. This study proposes a high-resolution electric field microsensor leveraging mode localization. The sensor consists of an electric field introduction structure, a three-degree-of-freedom weakly coupled resonator, and a packaging base. A floating and discrete high-resolution electric field introduction design is adopted, supported by a theoretical model for optimizing structural parameters. The arithmetic square root of the amplitude ratio of the weakly coupled resonator is used as the output of the sensor to address nonlinear output challenges. Finite element simulations are utilized to analyze the vibration modes of the sensor and investigate the impact of the rotation of the electric field induction electrode on measurement accuracy. Experimental testing of the fabricated sensor under vacuum conditions demonstrates a sensitivity of $0.068 / (\text{kV} \cdot \text{m}^{-1})$ and a background noise level of $0.0121 (\text{V} \cdot \text{m}^{-1}) / \sqrt{\text{Hz}}$ within the measured electric field range of 0~7 kV/m. The sensor achieves a resolution better than 0.4 V/m, representing the highest level reported domestically and internationally to date. Additionally, the sensitivity of the electric field induction electrode is tested by rotating it within the measured

收稿日期: 2024-11-22 Received Date: 2024-11-22

* 基金项目: 国家自然科学基金(62101054, 62031025)、传感技术联合国家重点实验室开放研究基金(SKT2201)、北京市教育委员会科学研究计划(KM202211232005)、北京市科技计划(Z231100006623012)、北京信息科技大学“勤信人才”培育计划(QXTCBP202409)项目资助

electric field; An in-depth study of the mode localization phenomenon in the resonator revealed that this phenomenon can be precisely controlled by selectively exciting and perturbing specific resonators to induce localization in targeted modes.

Keywords: MEMS; mode localization phenomena; electric field introduction structure; sensitivity; resolution

0 引言

电场传感器是电场探测的关键器件,在航空航天、智能电网、气象监测、石油化工等多个领域具有重要的应用需求^[1-5]。基于微机电系统(micro-electro-mechanical systems, MEMS)技术的电场传感器由于体积小、功耗低、成本低、易批量生产等优点,已被国内外许多研究机构和团队报道^[6-7]。MEMS 电场传感器根据其工作原理的不同,可分为电荷感应式^[7-8]、静电力式^[9-10]、光学式^[11]、基于逆压电效应式^[12]、真空电子束偏转式^[13]、模态局部化检测方法^[14]等。已报道的 MEMS 电场传感器大部分采用电荷感应原理,其分辨力与感应面积直接相关,微型化后由于感应面积减小,分辨力难以进一步提升。目前电荷感应式 MEMS 电场传感器的静电场分辨力最好水平为 10 V/m ^[15]。

基于模态局部化的 MEMS 传感器利用振动模态的能量局部集中效应可以实现灵敏度的大幅度提高^[16]。模态局部化可被描述为:在一个理想的多自由度弱耦合谐振系统中,未受到干扰时,谐振器的振幅相同。然而,当其中某一个谐振器的固有特性如质量或刚度受到干扰时,谐振器的振动模态会发生剧烈变化^[17]。Spletzer 等^[18]首次将模态局部化应用到谐振式传感器设计中,提出了一种超灵敏质量传感器;Zhang 等^[19]设计出了一种模态局部化加速度传感器,其灵敏度与频率灵敏度相比提高 2~3 个数量级;Zhao 等^[20-21]提出了一种利用振幅比输出的三自由度弱耦合谐振系统,可以同时实现高灵敏度检测和良好的共模抑制。从近年来弱耦合 MEMS 传感器的发展来看,基于模态局部化的新型检测原理已成为国内外 MEMS 物理量传感器的研究热点之一。

为了满足电场高分辨力探测需求,基于模态局部化的新型检测原理近几年逐渐被用于开发 MEMS 电场传感器。2021 年修日等^[22]将模态局部化引入电场传感器中,传感器敏感结构采用静电耦合的三自由度弱耦合谐振器,但该论文仅对模态局部化 MEMS 电场传感器进行理论计算和仿真分析。2019 年和 2022 年 Hao 等^[14,23]两次报道了一种基于模态局部化的谐振式 MEMS 静电场传感器,传感器敏感结构通过三自由度弱耦合谐振器与其两侧的电极构成电容结构,将电场转换为刚度扰动,在 $0\sim 7 \text{ kV/m}$ 电场范围内,分辨力已达到 $20.4 \text{ V/m} \sqrt{\text{Hz}}$,但是文中仅得到刚度扰动和电场强度的关系式,未对电容结构进行分析优化。2021 年 Liu 等^[24]提出了一种基

于模态局部化的闭环反馈式 MEMS 电场传感器,敏感结构采用静电耦合的三自由度弱耦合谐振器,分辨力优于 10 V/m ,其重点研究了闭环反馈电路下的灵敏度与分辨力,对电场引入方法没有进行研究。2025 年 Wang^[25]报道了一种基于弱耦合音叉式谐振器的 MEMS 电场传感器,基于二自由度弱耦合音叉式谐振器的模态局部化效应,分辨力为 21.3 V/m ,电场测量范围为 $0\sim 200 \text{ kV/m}$,对比其他 MEMS 电场传感器实现了大电场范围测量,但是对电场转换刚度扰动结构仍没有进行研究。由于已报道的模态局部化 MEMS 电场传感器没有深入研究电场引入方法,导致其分辨力仍然偏低,达不到特定场景下电场高分辨力探测需求。

为此,提出一种基于模态局部化的高分辨力 MEMS 电场传感器。重点探究了电场引入结构对分辨力的影响。通过理论建模,优化电场引入结构的设计参数;仿真分析电场感应电极的旋转对电场测量带来的影响;最后研制出传感器样机并开展试验验证。

1 传感器的工作原理和结构设计

1.1 工作原理

电场传感器的工作原理如图 1 所示。电场传感器由电场引入结构、三自由度弱耦合谐振系统和封装基座组成。电场引入结构主要包括电场感应电极和扰动电极两部分。电场感应电极位于三自由度弱耦合谐振系统的正上方,与扰动电极通过导线相连,用于检测外部电场的变化。扰动电极位于三自由度弱耦合谐振系统的外侧,通过极小的气隙与其构成静电力耦合。在待测电场 E_0 作用下,电场感应电极产生感应电荷,紧邻弱耦合谐振系统的扰动电极侧产生与之成比例的异性电荷,由于静电耦合特性,三自由度弱耦合谐振系统上等效增加了一个负的静电刚度扰动^[26],系统结构失谐,产生模态局部化现象。通过对外侧 2 个谐振器的振幅比进行测量,实现对待测电场的检测(基本过程:待测电场-刚度扰动-振幅比变化)。

1.2 结构设计

基于模态局部化的 MEMS 电场敏感芯片结构如图 2 所示,主要包括驱动电极、扰动电极、三自由度弱耦合谐振器、检测电极以及调谐电极等。三自由度弱耦合谐振器采用机械耦合的方式,通过 E 形耦合梁形成弱耦合。谐振器 1、2 和 3 谐振梁一端通过耦合梁相互连接,一端连接固定锚点。

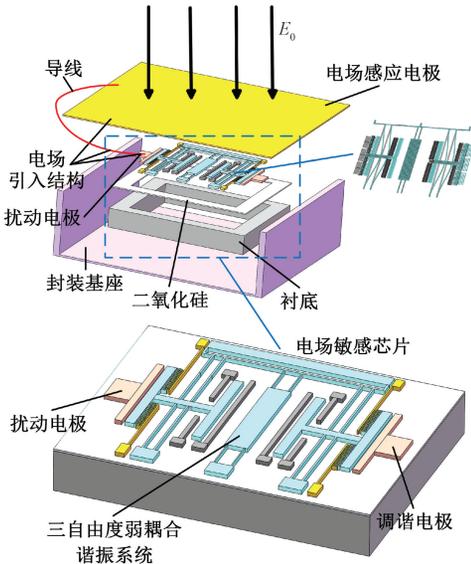


图 1 传感器工作原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sensor working principle

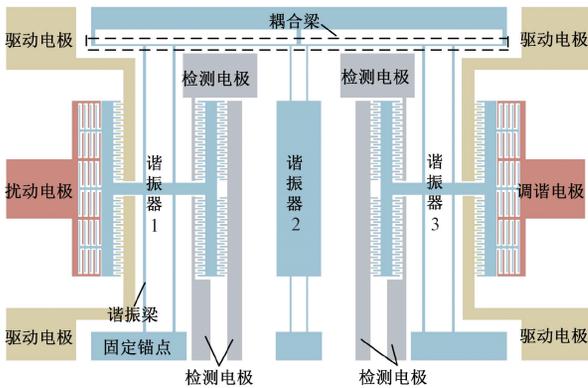


图 2 电场敏感芯片结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram structure of electric field sensor chip

扰动电极位于谐振器 1 的外侧,作为电场的引入端。检测电极位于谐振器 1、3 的内侧,作为检测信号的差分输出端。调谐电极位于谐振器 3 的外侧,与其形成静电力耦合,用于调节弱耦合谐振器的初始工作点,使其工作在线性区域内。

1) 电场引入结构设计

本研究提出的浮动分立式电场引入结构与谐振器的等效结构如图 3 所示。采用浮动分立式电场引入结构的优势在于:(1) 电场感应电极能以最大有效面积感测电场,不影响扰动电极的布设,也不影响扰动电极干扰谐振器的刚度,因而可以使刚度扰动容易达到较强的状态,避免了一体式为兼顾电场感应和刚度干扰而很难实现强刚度扰动,导致器件的电场分辨力偏低;(2) 结构分布电容小,使得紧邻谐振器的扰动电极侧分布更多的感应电荷,

由静电学的知识可知,静电耦合力与感应电荷量的二次方有关,因而可显著增强对弱耦合谐振器的刚度干扰,提高传感器的分辨力。

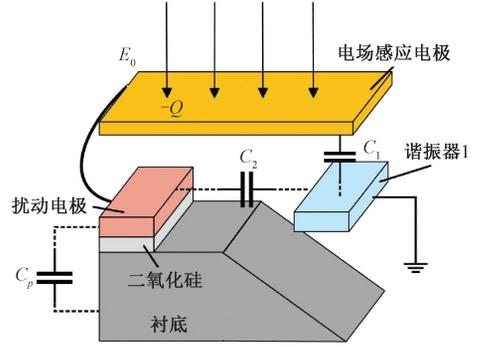


图 3 电场引入结构与谐振器结构

Fig. 3 Structure diagram of electric field introduction structure and resonator

对电场引入结构进行静电负刚度分析。其中,电场感应电极与谐振器之间的等效电容 C_1 ,扰动电极与衬底之间的等效电容为 C_p ,扰动电极与谐振器之间的等效电容为 C_2 。在待测电场 E_0 的作用下,电场感应电极上会感应出一定量的电荷,根据高斯定理,感应电荷量 Q 为:

$$Q = \oint D ds = \varepsilon_0 E_0 A \quad (1)$$

式中: ε_0 为真空介电常数; A 为电场感应电极的面积。

由于扰动电极与电场感应电极通过导线相连,因此扰动电极上的电压 V_1 与电场感应电极的电压大小相等,则扰动电极上的电压 V_1 可表示为:

$$V_1 = \frac{Q}{C_1 + C_p + C_2} = \frac{\varepsilon_0 E_0 A}{\left(\frac{\varepsilon_0 A_3}{d_2} + \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A_2}{d_1} + \frac{\varepsilon_0 A_1}{d} \right)} \quad (2)$$

式中: ε_r 为二氧化硅的相对介电常数; A_1 为扰动电极与谐振器的有效交叠面积; A_2 为扰动电极与衬底的有效交叠面积; d_2 是电场感应电极与谐振器 1 之间的距离; d_1 是二氧化硅层厚度; d 为扰动电极与谐振器 1 之间的距离。由于 $d_2 \gg d, d_1$, 使得 C_1 远小于 C_p 和 C_2 , 忽略 C_1 。电场感应电极在电场 E_0 中感应出一定的电荷量 Q , 使得紧邻谐振器 1 的扰动电极侧通过导线与感应电极相连产生与之成比例的异性电荷, 谐振器 1 上由于扰动电极上的电荷也产生一定量的电荷 Q_1 , 即:

$$Q_1 = C_2 V_1 \approx \frac{\varepsilon_0 E_0 A C_2}{C_p + C_2} = \frac{\varepsilon_0^2 E_0 A A_1}{\left(\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A_2}{d_1} + \frac{\varepsilon_0 A_1}{d} \right) d} \quad (3)$$

由于谐振器 1 接地, 导致扰动电极与谐振器 1 之间存在电势差。谐振器 1 上所受到的静电力 F 为:

$$F = \frac{Q_1 V_1}{2d} = \frac{\varepsilon_0^3 E_0^2 A^2 A_1}{2 \left(\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A_2}{d_1} + \frac{\varepsilon_0 A_1}{d} \right)^2 d^2} \quad (4)$$

谐振器1上等效增加的静电负刚度 k_e 为:

$$k_e = -\frac{\partial F}{\partial d} \approx -\frac{\varepsilon_0^3 E_0^2 A^2 A_1}{\left(\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A_2}{d_1} + \frac{\varepsilon_0 A_1}{d}\right)^2 d^3} \quad (5)$$

为了使传感器的模态局部化更为显著,即传感器获得更高的分辨力,谐振器1应该受到更大的刚度扰动。由式(5)可知,静电负刚度 k_e 与电场感应电极面积 A 的平方成正比,可以通过调整 A 大幅增加 k_e ,从而显著提升传感器的分辨力,面积 A 设计为 $8.836 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ 。 k_e 与距离 d 的关系如图4所示, d 越大, k_e 越小, d 选择为 $5 \mu\text{m}$ 。 k_e 与交叠面积 A_2 的关系如图5所示, k_e 随着交叠面积 A_2 的增大而减小。 k_e 与交叠面积 A_1 的关系如图6所示, k_e 随着 A_1 先增大后减小,有效交叠面积 A_1 为 $1.56 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ 时,静电负刚度 k_e 存在最大值。考虑到 MEMS 敏感芯片的版图设计和制备工艺限制, A_2 设计为 $1.6 \times 10^{-7} \text{ m}^2$, A_1 为 $1.24 \times 10^{-7} \text{ m}^2$ 。

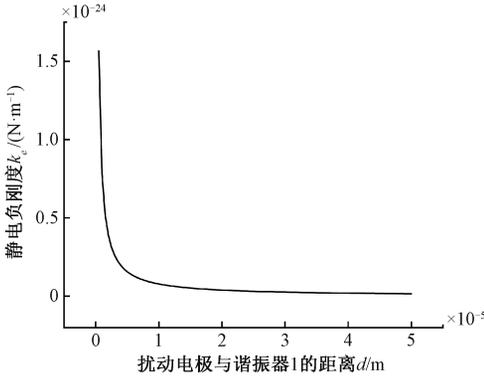


图4 静电负刚度与距离关系曲线

Fig. 4 The relationship between electrostatic negative stiffness and distance

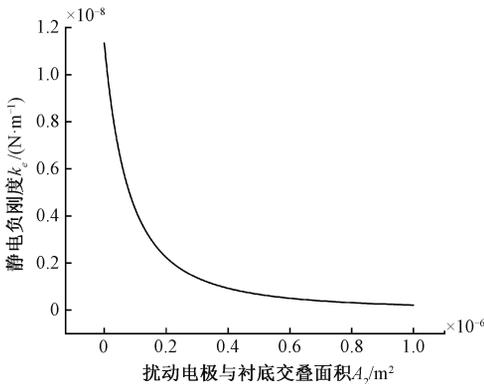


图5 静电负刚度与扰动电极和衬底交叠面积关系曲线

Fig. 5 The relationship between electrostatic negative stiffness and the overlapping area of perturbation electrode and substrate

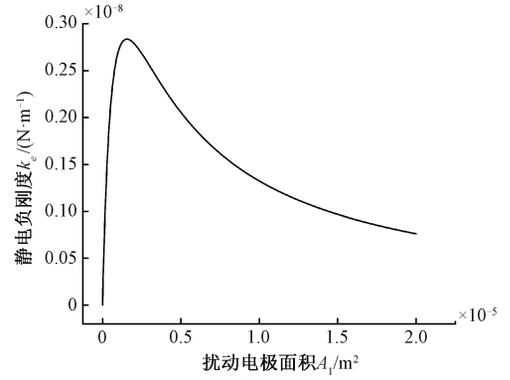


图6 静电负刚度与扰动电极和谐振器交叠面积关系曲线

Fig. 6 The relationship between electrostatic negative stiffness and the overlapping area of perturbation electrode and resonator

2) 三自由度弱耦合谐振器结构设计

三自由度弱耦合谐振器主要有3种振动模式^[27],选取同相振动和反相振动为传感器的工作模式。三自由度弱耦合谐振器的耦合梁是谐振系统实现弱耦合的关键,设置合适参数的耦合梁可以确定其耦合刚度,三自由度弱耦合谐振器的谐振梁决定了各谐振器的刚度,谐振器刚度和耦合刚度共同影响谐振系统的谐振频率和振幅比,进而影响传感器的灵敏度。三自由度弱耦合谐振器结构设计参数如表1所示。

表1 三自由度弱耦合谐振器结构设计参数

Table 1 Structural parameters of three-degree-of-freedom weakly coupled resonator

| 参数 | 数值/ μm |
|--------------|-------------------|
| 谐振器1、3 谐振梁长度 | 920 |
| 谐振器1、3 谐振梁宽度 | 20 |
| 谐振器2 谐振梁长度 | 370 |
| 谐振器2 谐振梁宽度 | 12 |
| 耦合梁长度 | 2 800 |
| 耦合梁宽度 | 12 |
| 谐振器厚度 | 25 |

根据文献[28],同相模态和反相模态的谐振频率和振幅比可以表示为:

$$\omega_i = \sqrt{\frac{1}{m} \left[k + k_c + \frac{1}{2} \left(\Delta k - \frac{2}{\beta} \mp \sqrt{\Delta k^2 + \left(\frac{2}{\beta} \right)^2} \right) \right]}, \quad i = 1, 2 \quad (6)$$

$$u_i \approx \left| \frac{\sqrt{(\Delta k \times \beta)^2 + 4} \pm \Delta k \times \beta}{2} \right|, \quad i = 1, 2 \quad (7)$$

其中:

$$\beta = \frac{k_2 - k + k_c}{k_c^2} \quad (8)$$

式中: ω_1 和 ω_2 分别为同相模态和反相模态的谐振频率; u_1 和 u_2 分别为同相模态和反相模态谐振器 3 与 1 的振幅比值; m 为谐振器 1、3 的质量; k 为谐振器 1、3 的刚度; k_2 为谐振器 2 的刚度; k_c 为耦合梁的刚度; Δk 为施加到谐振器 1 上的刚度扰动。

将式(5)代入式(7),可以得到电场传感器在反相模态下振幅比输出与待测电场之间的关系式为:

$$\left| \frac{x_3}{x_1} \right|_{op} \approx \frac{\varepsilon_0^3 A^2 A_1 (k_2 - k + k_c)}{\left(\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A_2}{d_1} + \frac{\varepsilon_0 A_1}{d} \right)^2 d^3 k_c^2} E_0^2 \quad (9)$$

由式(9)可以得到,电场传感器的振幅比与待测电场的平方成正比,将振幅比的算术平方根作为电场传感器的输出,即:

$$\sqrt{\left| \frac{x_3}{x_1} \right|_{op}} \approx \sqrt{\frac{\varepsilon_0^3 A^2 A_1 (k_2 - k + k_c)}{\left(\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A_2}{d_1} + \frac{\varepsilon_0 A_1}{d} \right)^2 d^3 k_c^2}} E_0 \quad (10)$$

因此,传感器的灵敏度表达式为:

$$S_E = \frac{\partial \sqrt{\left| \frac{x_3}{x_1} \right|_{op}}}{\partial E_0} \approx \frac{\varepsilon_0^3 A^2 A_1 (k_2 - k + k_c)}{\sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A_2}{d_1} + \frac{\varepsilon_0 A_1}{d} \right)^2 d^3 k_c^2}} \quad (11)$$

2 仿真分析

2.1 振动模态仿真分析

采用 COMSOL 有限元软件对三自由度弱耦合谐振器进行模态仿真分析,结果如图 7 所示。第 1 阶模态,谐振器 1 和 3 同相振动;第 2 阶模态,谐振器 1 和 3 反相振动;第 3 阶模态,谐振器 1 和 3 不动,谐振器 2 振动。三自由度弱耦合谐振器未施加扰动时,谐振器 1 和 3 的同相模态和反相模态振幅相等,同相模态的谐振频率为 14 790 Hz,反相模态的谐振频率为 14 792 Hz,频差仅为 2 Hz,表明三自由度弱耦合谐振器的耦合系数低,其灵敏度较高^[29]。

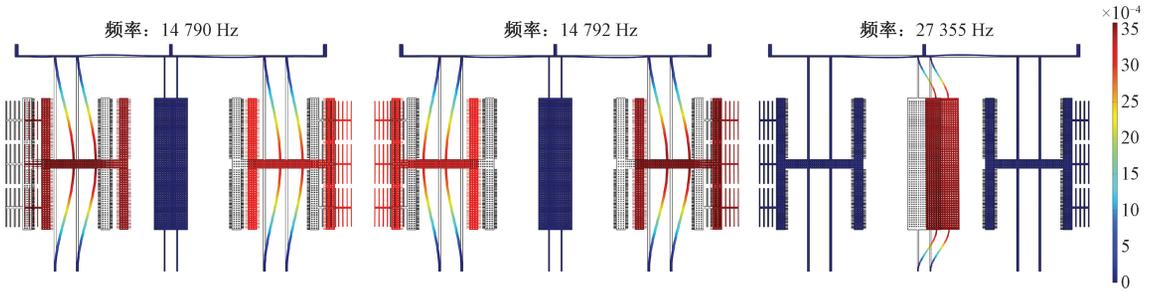


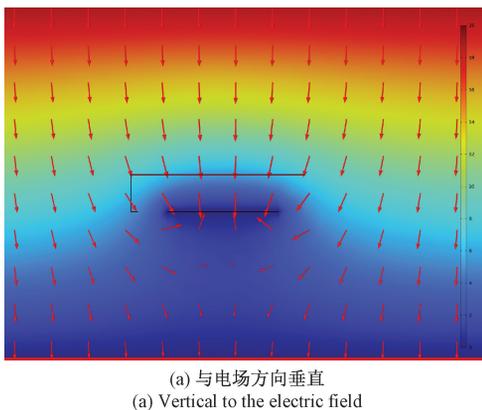
图 7 三自由度弱耦合谐振器振动模态

Fig. 7 Vibration modes of three-degree-of-freedom weakly coupled resonator

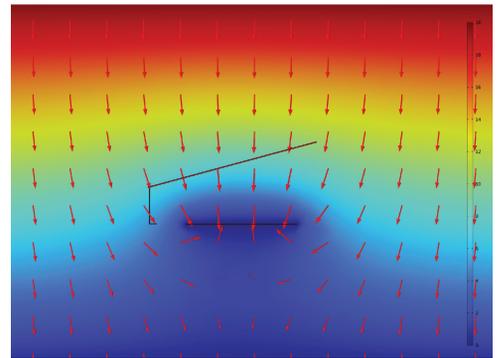
2.2 电场仿真分析

电场感应电极旋转对电场测量影响仿真结果如图 8 所示。电场仿真建模时通过在一个平行板上施加直流电压,另一个平行板接地来产生 1 000 V/m 的电场,电场感

应电极建模结构采用文中设计的 $8.836 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ 尺寸。



(a) 与电场方向垂直
Vertical to the electric field



(b) 与电场方向呈75°角
(b) At a 75° angle to the direction of the electric field

图 8 电场引入结构的电场仿真

Fig. 8 Electric field simulation of structure with electric field introduction structure

首先,电场感应电极垂直放置在电场中,电场均匀分布在电场感应电极表面,电场感应电极在电场的作用下感应出负的感应电荷,此时电场感应电极具有最大的感应电荷量。之后旋转电场感应电极,可以发现,随着旋转角度变大,电场感应电极的感应电荷量逐渐减小,当电场感应电极与电场平行时,电场感应电极上的感应电荷量最小,如图9所示。所以,为了在同一电场下电场感应电极上具有最大的感应电荷量,使得三自由度弱耦合谐振器受到最大的静电负刚度扰动,在后续的电场测试中,将电场感应电极垂直放置在待测电场中。

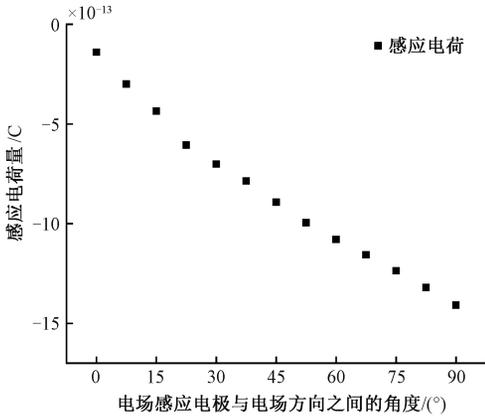


图9 电场感应电极放置与感应电荷量的关系

Fig. 9 The placement of electric field induction electrodes and induced charge

3 敏感芯片的制备

基于模态局部化的 MEMS 电场传感器敏感芯片采用绝缘体上硅 (silicon-on-insulator, SOI) 微机械加工技术,器件层厚度为 $25\ \mu\text{m}$,氧化埋层 $2\ \mu\text{m}$,衬底层 $400\ \mu\text{m}$ 。工艺流程包括,如图10所示。图10(a):使用反应离子刻蚀 (reactive ion etching, RIE) 设备,通过掩膜版制作对标位;图10(b):使用真空镀膜以及剥离工艺,制备背面金属,背面金属由铬和金组成;图10(c):使用真空镀膜以及剥离工艺,制备由铬和金组成的金属焊盘,作为电场传感器的电极;图10(d):使用深度反应离子刻蚀工艺 (deep reactive ion etching, DRIE) 刻蚀裸露的顶层硅到埋氧层,形成电场传感器的敏感结构;图10(e):在 SOI 晶圆的顶层硅表面上施加一层正面保护层,作为敏感结构的保护层,在 SOI 晶圆衬底硅下通过喷胶工艺旋转涂抹光刻胶;图10(f):使用掩膜版对衬底硅上的光刻胶进行曝光,然后显影。利用深度反应离子刻蚀工艺刻蚀裸露的衬底硅到埋氧层,形成衬底硅刻蚀窗口;图10(g):使用气相刻蚀工艺 (vapor hydrofluoric, VHF) 去除 SOI 的埋氧层,实现敏感结构的释放;图10(h):利用等离子体工

艺 (Plasma) 去除敏感结构保护膜层。图11为已加工的电场敏感芯片扫描电镜照片。

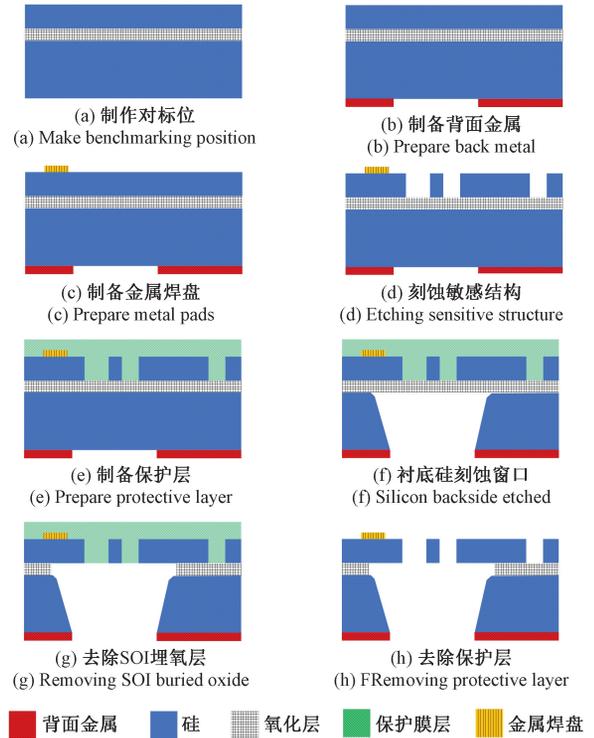


图10 电场传感器的工艺流程

Fig. 10 Fabrication process of the electric field sensor

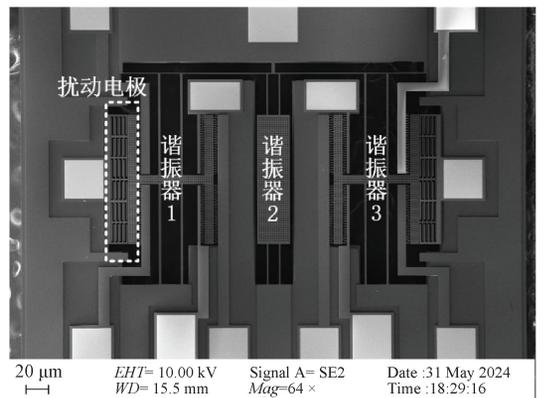


图11 电场敏感芯片扫描电镜照片

Fig. 11 SEM image of the electric field sensor chip

4 实验测试

4.1 测试平台

为了测试电场传感器的性能指标,提出了传感器测试原理图,如图12所示。跨阻放大器用于将三自由度弱耦合谐振器检测电极输出的电流信号转化为电压信号,

仪表放大器用于将电压信号差分放大,锁相放大器用于提供 10 mV 的交流驱动信号、信号解调及记录输出数据。

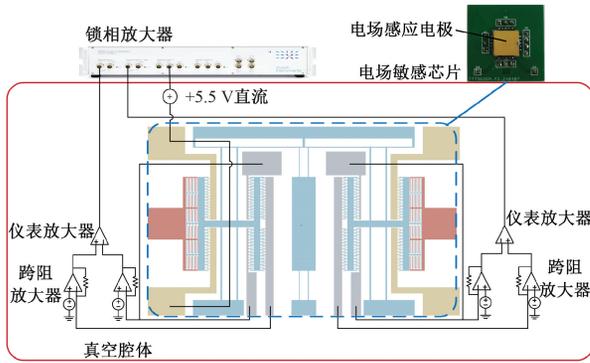


图 12 电场传感器测试原理

Fig. 12 Test schematic diagram of electric field sensor

实验测试装置如图 13 所示,由电场发生装置、信号调理电路、真空腔体、锁相放大器、PC、电源等组成。其中,电场发生装置由一对放置在真空腔体中的相距 20 mm 的金属板构成。传感器和信号调理电路放置在 2.9 Pa 的真空腔体中,传感器的直流驱动信号为 5.5 V,由电源部分供电。三自由度弱耦合谐振器的振幅信号通过信号调理电路传输到锁相放大器中。

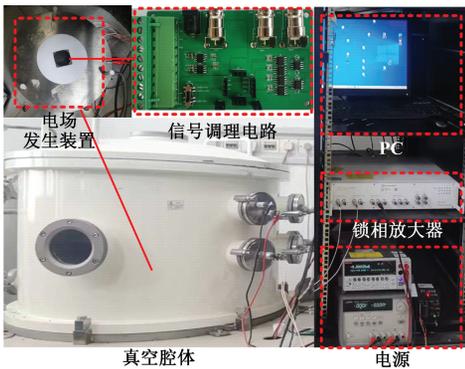


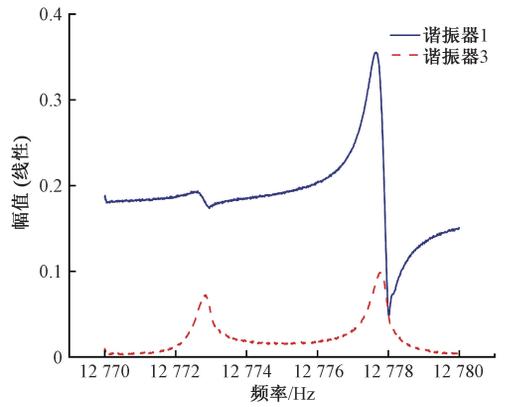
图 13 测试装置

Fig. 13 Diagram of experimental devices

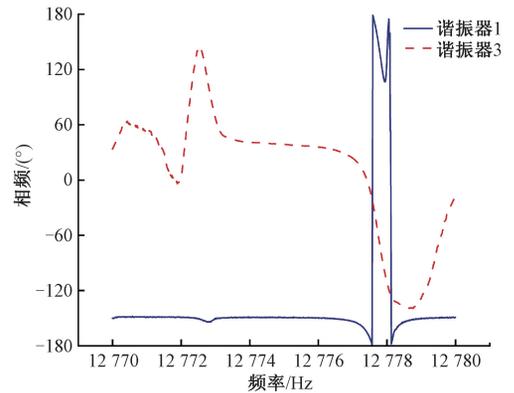
4.2 测试结果

1) 幅频特性

通过对电场传感器幅频特性和相频特性的测试,可以得到电场传感器在初始状态电场强度为 0 时的同相模态与反相模态,观察其谐振频率和相位。在零电场下,测试得到电场传感器的幅频特性和相频特性曲线如图 14 所示。同相模态谐振频率为 12 772.8 Hz,反相模态谐振频率为 12 777.6 Hz,频率差为 4.8 Hz。测试得到的谐振频率小于仿真结果 2 017 Hz 左右,此偏差产生的主要原因是敏感芯片制备过程中器件层过刻^[30]。



(a) 幅频特性测试
(a) Amplitude-frequency test



(b) 相频特性测试
(b) Phase-frequency test

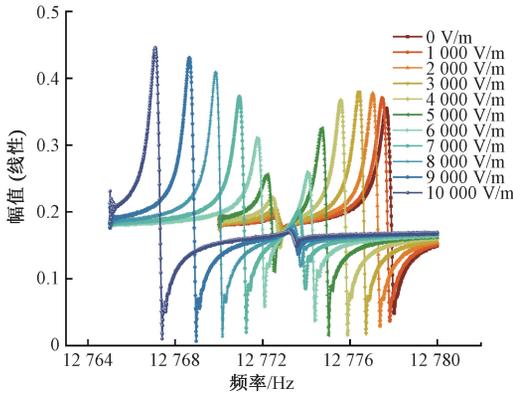
图 14 幅频相频响应曲线

Fig. 14 Responses of amplitude frequency and phase frequency

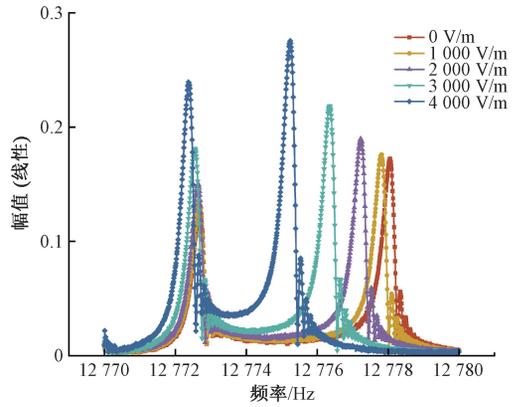
测试电场传感器在不同电场强度下的幅频特性,结果如图 15 所示。对电场传感器施加 0~10 000 V/m 的电场强度,谐振器 1 的同相模态的振幅不断增大,反相模态的振幅逐渐减小,谐振器 3 的同相和反相模态的振幅总体呈下降趋势。这一结果验证了随着电场强度不断增大,电场传感器中的三自由度弱耦合谐振系统的能量不再均匀分布,振动模态集中在了谐振器 1 的同相模态中,验证了模态局部化现象产生。

2) 模态局部化现象分析

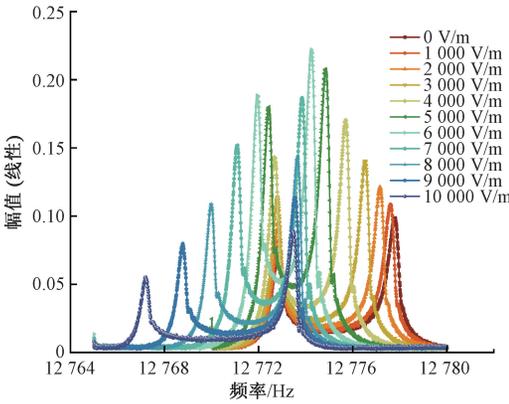
由模态局部化现象的定义可知,当谐振系统受到扰动时,谐振系统的能量将不会均匀分布在各谐振器中而是集中到某一谐振器上。为了得到当谐振系统受到扰动时,振动能量的变化规律,对不同谐振器进行驱动和扰动,其幅频特性如图 16 所示。图 16(a) 和 (b) 分别为驱动谐振器 1,对谐振器 1 施加刚度扰动时谐振器 1 和 3 的幅频响应曲线,谐振器 1 发生了模态局部化现象,谐振器 1 的同相模态的振幅增加,反相模态的振幅减小,谐振器 3 的同相和反相模态的振幅都增加。图 16(c) 和 (d) 分别为驱动谐振器 1,对谐振器 3 施加刚度扰动时谐振器 1 和



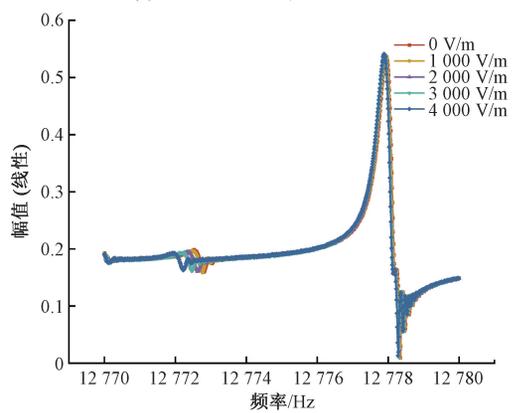
(a) 谐振器1
(a) Resonator 1



(b) 驱动谐振器1, 扰动谐振器3
(b) Drive resonator 1, disturb resonator 3



(c) 谐振器3
(c) Resonator 3

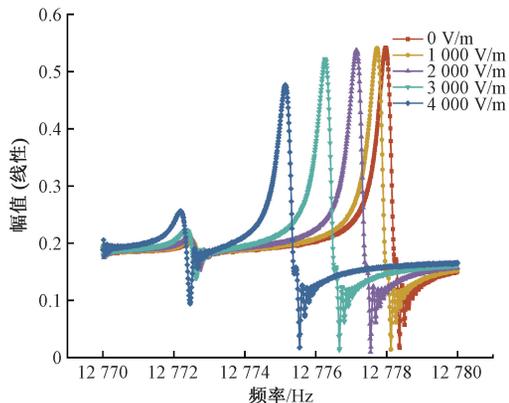


(d) 驱动谐振器3, 扰动谐振器1
(d) Drive resonator 3, disturb resonator 1

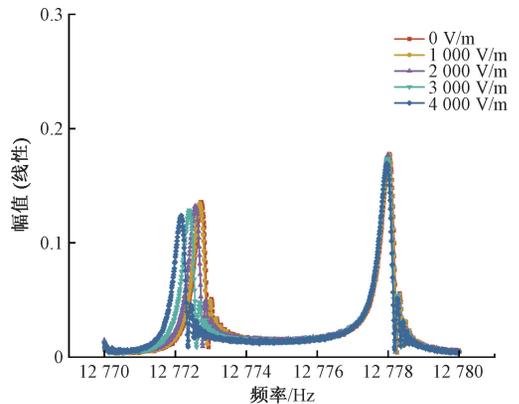
图 15 在电场下的幅频响应曲线

Fig. 15 Amplitude-frequency response curve under electric field

3 的幅频响应曲线,谐振器 1 发生了模态局部化现象,谐振器 1 的同相模态的振幅减小,反相模态的振幅增加,谐振器 3 的同相和反相模态的振幅都减小。由于谐振器 1 和 3 完全对称,可以分析得到驱动谐振器 3,分别扰动谐振器 1 和 3 的结果。



(a) 驱动谐振器1, 扰动谐振器1
(a) Drive resonator 1, disturb resonator 1



(b) 驱动谐振器3, 扰动谐振器3
(b) Drive resonator 3, disturb resonator 3

图 16 驱动和扰动不同谐振器的幅频响应曲线

Fig. 16 Amplitude frequency response curves of different resonators driven and disturbed

由图 16 可以看出对谐振器施加驱动信号,该谐振器出现模态局部化现象;驱动信号和刚度扰动施加到同一谐振器时,能量就会集中在发生模态局部化的谐振器的同相模态中,驱动信号和刚度扰动施加到不同谐振器时,能量就会集中在发生模态局部化的谐振器的反相模态中。由此测试结果,可以通过施加驱动信号和刚度扰动

控制模态局部化现象发生在选定的谐振器中,振动能量集中在同相或反相模态,实现将振动能量集中在选定的三自由度弱耦合谐振器的工作模态,进而提高电场传感器的灵敏度和分辨力。

3) 灵敏度测试

电场传感器的灵敏度反映了传感器对电场变化的响应能力。对电场传感器的灵敏度进行测试,可以得到传感器的输出信号对不同的电场强度的响应。电场强度从 0~7 kV/m,谐振频率和振幅比的算术平方根变化如图 17 所示。

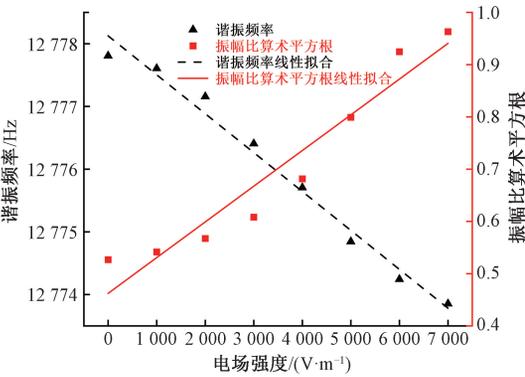


图 17 谐振频率和振幅比算术平方根的灵敏度

Fig. 17 Sensitivity of resonant frequency and amplitude ratio arithmetic square root

振幅比算术平方根的测量数据线性拟合关系式为:

$$y = 0.06833x + 0.46231 \quad (12)$$

测试结果表明,电场传感器基于振幅比算术平方根输出的灵敏度为 $0.068 / (\text{kV} \cdot \text{m}^{-1})$,线性度为 13%。由于谐振器 3 外侧的调谐电极只能设置单向调节静电容刚度,使得无法将三自由度弱耦合谐振器的初始工作点调节到刚度为 0(振幅比为 1)的静态工作点,所以导致在 0 V/m 的电场强度处振幅比算术平方根与电场强度出现非线性关系。

在前文中进行了电场感应电极旋转对电场测量影响的仿真分析,得到电场感应电极垂直电场方向放置时感应的电荷量最大,模态局部化现象更为显著。为验证该仿真结果,将电场感应电极与电场方向呈 45°角放入待测电场中,得到其振幅比算术平方根与电场的关系如图 18 所示。振幅比算术平方根的测量数据线性拟合关系式为:

$$y = 0.03947x + 0.46912 \quad (13)$$

从图 18 中可以得到,基于振幅比算术平方根输出的电场灵敏度为谐振频率灵敏度的 1 400 倍。验证了模态局部化电场传感器基于幅值比算术平方根输出的灵敏度相比频率输出灵敏度有显著提升。

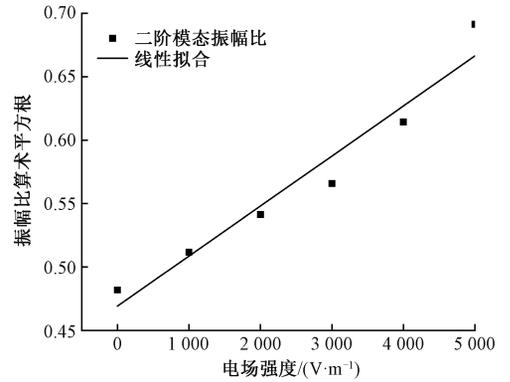


图 18 电场感应电极与电场方向呈 45°,振幅比算术平方根的灵敏度

Fig. 18 Sensitivity of amplitude ratio arithmetic square root of electric field induction electrode at 45° to the electric field

测试结果表明,电场感应电极与电场方向呈 45°时,电场传感器基于振幅比算术平方根输出的灵敏度为 $0.039 / (\text{kV} \cdot \text{m}^{-1})$,线性度为 11%。与电场感应电极垂直放置在电场中的测试结果对比可以发现,电场感应电极与电场方向呈 45°角时电场传感器灵敏度小于电场感应电极垂直放置在电场中的灵敏度,与电场仿真结论一致。

4) 噪声和分辨力测试

传感器基于振幅比算术平方根输出的电场灵敏度得到了显著提升,然而,对于电场传感器来说,分辨力是更为关键的性能参数。电场传感器的分辨力决定传感器对待测电场最小变化的检测能力。对电场传感器的噪声和分辨力进行测试。谐振器 1 和 3 的输出电压信号由锁相放大器以 5 Hz 的采样频率记录 0.5 h。2 个谐振器输出值的平均值分别为 0.262 和 0.033 V。谐振器 1 和 3 的输出电压噪声测试结果如图 19 所示。

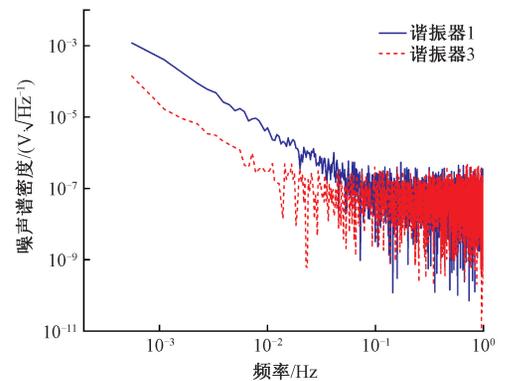


图 19 谐振器 1 和谐振器 3 的噪声

Fig. 19 Noise of resonator 1 and 3

谐振腔 1 和 3 在 0.1 Hz 时的噪声谱密度分别为 $1.565 \times 10^{-7} \text{ V}/\sqrt{\text{Hz}}$ 和 $1.859 \times 10^{-8} \text{ V}/\sqrt{\text{Hz}}$, 可以计算出谐振器 1 和 3 的振幅噪声为:

$$AR_{\text{noise}} = \sqrt{\left(\frac{1.565 \times 10^{-7}}{0.262}\right)^2 + \left(\frac{1.859 \times 10^{-8}}{0.033}\right)^2} = 8.211 \times 10^{-7} \quad (14)$$

因此, 电场传感器的本底噪声为:

$$V_{\text{noise}} = \frac{8.211 \times 10^{-7}}{0.068} = 0.0121 \quad (15)$$

对电场传感器的分辨力进行测量, 当待测电场从 0 V/m 以 0.4 V/m 步长增加到 4 V/m 时, 电场传感器的振幅比算术平方根基本上线性增加, 测试结果如图 20 所示, 表明电场传感器的分辨力优于 0.4 V/m, 比之前报道的基于模态局部化的电场传感器的分辨力提高了 2 个数量级^[17]。表 2 为近 10 年已报道的典型 MEMS 电场传感器分辨力比较结果。

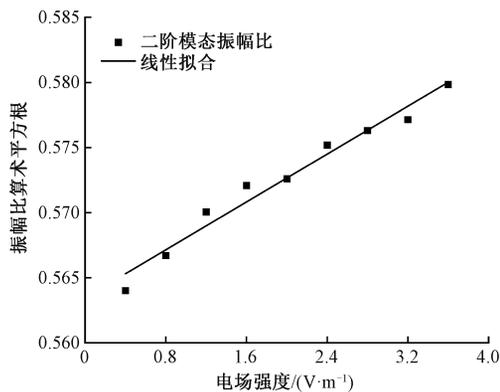


图 20 电场传感器的分辨力

Fig. 20 Resolution of electric field sensors

表 2 微型电场传感器分辨力比较

Table 2 The resolution comparison of the electric field sensors

| 年份 | 提出者 | 原理 | 分辨力 |
|------|------------------------|-------|----------------------------|
| 2015 | Yang 等 ^[15] | 电荷感应 | 10 V/m |
| 2018 | Kainz 等 ^[9] | 静电力驱动 | 100 V/m $\sqrt{\text{Hz}}$ |
| 2021 | Han 等 ^[12] | 逆压电效应 | 45 V/m |
| 2021 | Liu 等 ^[24] | 模态局部化 | 10 V/m |
| 2022 | Hao 等 ^[23] | 模态局部化 | 22.9 V/m |
| 2023 | Han 等 ^[10] | 静电力驱动 | 112 V/m $\sqrt{\text{Hz}}$ |
| 2025 | Wang 等 ^[25] | 模态局部化 | 21.3 V/m |
| 2025 | 本文 | 模态局部化 | 0.4 V/m |

5 结 论

本研究提出了一种基于模态局部化的高分辨力 MEMS 电场传感器, 首次采用浮动分立式电场引入结构, 与其他微型电场传感器相比, 提高了灵敏度和分辨力。对传感器进行了结构设计和理论分析, 优化了电场引入结构参数; 通过有限元方法分析了传感器的振动模态和电场感应电极的旋转对电场测量带来的影响; 采用 SOI 工艺制备敏感芯片样片, 并对其进行了性能测试。试验结果表明: 在 0~7 kV/m 待测电场范围内, 传感器的灵敏度为 $0.068 / (\text{kV} \cdot \text{m}^{-1})$, 比谐振频率灵敏度提高了 1 400 倍; 电场感应电极与电场方向垂直时电场灵敏度较高; 传感器的分辨力优于 0.4 V/m, 比之前报道的模态局部化 MEMS 电场传感器的分辨力提高了 2 个数量级, 是目前国内外可见报道的最好水平。灵敏度和分辨力测试结果表明本文提出的浮动分立式电场引入结构大大提高了模态局部化 MEMS 电场传感器的灵敏度和分辨力。另外, 论文也研究了如何控制模态局部化发生在特定谐振器和模态中。

本研究的基于模态局部化的 MEMS 电场传感器在抑制静电荷干扰噪声方面仍存在局限性, 没有解决电场感应电极易积累感应电荷的问题, 在后续的工作中尝试在电场敏感结构上设计微开关放电结构, 抑制静电荷干扰噪声, 进一步提高传感器的电场灵敏度和分辨力。

参考文献

- [1] MONTANYA J, BERGAS J, HERMOSO B. Electric field measurements at ground level as a basis for lightning hazard warning [J]. *Journal of Electrostatics*, 2004, 60(2/4): 241-246.
- [2] WANG D C, LI P, WEN Y M. Design and modeling of magnetically driven electric-field sensor for noncontact DC voltage measurement in electric power systems [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(10): 105001.
- [3] 宋琳, 丁峰, 张金波, 等. 有限元法在真实环境下大气电场仪误差修订中的应用[J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(8): 152-161.
SONG L, DING F, ZHANG J B, et al. Application of finite element method in the revision of atmospheric electrostatic field instrument error in real environment[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2021, 35(8): 152-161.
- [4] 段震宇, 文玉梅, 叶敬昌, 等. 调制式海洋电场传感输

- 出噪声抑制[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(10): 234-243.
- DUAN ZH Y, WEN Y M, YE J CH, et al. A noise suppression method for modulated electric field sensors[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(10): 234-243.
- [5] 张巍, 张洲威, 彭春荣, 等. 一种 MEMS 三维电场传感器抗电荷干扰方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(8): 239-248.
- ZHANG W, ZHANG ZH W, PENG CH R, et al. Research on the anti-charge-interference method for MEMS three-dimensional electric field sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(8): 239-248.
- [6] RIEHI P S, SCOTT K L, MULLER R S, et al. Electrostatic charge and field sensors based on micromechanical resonators[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2003, 12(5): 577-589.
- [7] BAHREYNI B, WIJEWEERA G, SHAFAI C, et al. Analysis and design of a micromachined electric-field sensor[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2008, 17(1): 31-36.
- [8] KE K, YANG Q, ZHOU J L, et al. Piezoelectric PZT film-driven resonant torsional MEMS electric field sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(20): 31921-31931.
- [9] KAINZ A, STEINER H, SCHALKO J, et al. Distortion-free measurement of electric field strength with a MEMS sensor[J]. Nature Electronics, 2018, 1(1): 68-73.
- [10] HAN ZH F, HU J, LI L CH, et al. Micro-cantilever electric field sensor driven by electrostatic force[J]. Engineering, 2023, 24: 184-191.
- [11] MA X Y, CAI ZH Y, ZHUANG CH J, et al. Integrated microcavity electric field sensors using Pound-Drever-Hall detection[J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 1386.
- [12] HAN ZH F, XUE F, YANG G ZH, et al. Micro-cantilever capacitive sensor for high-resolution measurement of electric fields[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(4): 4317-4324.
- [13] WILLIAMS K R, DE BRUYKER D P H, LIMB S J, et al. Vacuum steered-electron electric-field sensor[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2014, 23(1): 157-167.
- [14] YAN Z M, LIANG J J, HAO Y C, et al. A micro resonant DC electric field sensor based on mode localization phenomenon[C]. 2019 IEEE 32nd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2019: 849-852.
- [15] YANG P F, CHEN B, WEN X L, et al. A novel MEMS chip-based atmospheric electric field sensor for lightning hazard warning applications[C]. 2015 IEEE Sensors, 2015: 1-4.
- [16] SPLETZER M, RAMAN A, SUMALI H, et al. Highly sensitive mass detection and identification using vibration localization in coupled microcantilever arrays[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(11): 114102.
- [17] HODGES C H. Confinement of vibration by structural irregularity[J]. Journal of Sound and Vibration, 1982, 82(3): 411-424.
- [18] SPLETZER M, RAMAN A, WU A Q, et al. Ultrasensitive mass sensing using mode localization in coupled microcantilevers[J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(25): 254102.
- [19] ZHANG H M, YUAN W Z, LI B Y, et al. A novel resonant accelerometer based on mode localization of weakly coupled resonators[C]. 2015 18th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 2015: 1073-1076.
- [20] WANG Y, ZHAO CH, WANG CH, et al. A mass sensor based on 3-DOF mode localized coupled resonator under atmospheric pressure[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 279: 254-262.
- [21] ZHAO CH, WOOD G S, XIE J B, et al. A three degree-of-freedom weakly coupled resonator sensor with enhanced stiffness sensitivity[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2016, 25(1): 38-51.
- [22] 修日, 杨鹏飞, 毋正伟, 等. 一种基于模态局域化的 MEMS 电场传感器设计与分析[J]. 仪表技术与传感器, 2021(2): 32-35, 46.
- XIU R, YANG P F, WU ZH W, et al. DESIGN and analysis of MEMS electric field sensor based on mode localization[J]. Instrument Technique and Sensor, 2021(2): 32-35, 46.
- [23] HAO Y C, WANG CH G, SUN ZH, et al. A mode-localized DC electric field sensor[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2022, 333: 113244.
- [24] LIU X M, WANG Z L, WU ZH W, et al. Enhanced sensitivity and stability of a novel resonant MEMS electric field sensor based on closed-loop feedback[J]. IEEE

Sensors Journal, 2021, 21(20): 22536-22543.

- [25] WANG G J, HOU SH L, RAN L F, et al. A weakly coupled tuning fork MEMS electric field sensor with high resolution and wide measurement range [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2025, 34(1): 82-91.
- [26] KANG H, RUAN B, HAO Y C, et al. A mode-localized resonant accelerometer with self-temperature drift suppression [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(20): 12154-12165.
- [27] ZHAO CH, WOOD G S, PU S H, et al. A mode-localized MEMS electrical potential sensor based on three electrically coupled resonators [J]. Journal of Sensors and Sensor Systems, 2017, 6(1): 1-8.
- [28] KANG H, YANG J, ZHONG J M, et al. A mode-localized accelerometer based on three degree-of-freedom weakly coupled resonator [C]. 2017 IEEE Sensors, 2017: 567-569.
- [29] THIRUVENKATANATHAN P, YAN J, WOODHOUSE J, et al. Enhancing parametric sensitivity in electrically coupled MEMS resonators [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2009, 18(5): 1077-1086.
- [30] 陈钢, 刘宇鹏, 崔让, 等. MEMS 环形陀螺模态间刚度耦合频率调谐 [J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(9): 220-227.
- CHEN G, LIU Y P, CUI R, et al. MEMS ring gyro frequency tuning for intermodal stiffness coupling [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(9): 220-227.

作者简介



王若航, 2019年于湖南大学获得学士学位, 现为北京信息科技大学硕士研究生, 主要研究方向为基于模态局部化的微型电场传感器。

E-mail: 2022021072@bistu.edu.cn

Wang Ruohang received her B. Sc. degree from Hunan University in 2019. She is currently a master student at Beijing Information Science and Technology University. Her main research interest is the micro electric field sensor based on mode localization.



杨鹏飞(通信作者), 2008年于北京信息科技大学获得学士学位, 2013年于中国科学院大学获得博士学位, 现为北京信息科技大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为电场探测新机理、新机制, 非侵入式电压测量技术, MEMS 电学传感器及应用。

E-mail: pfy@bistu.edu.com

Yang Pengfei (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Beijing Information Science and Technology University (BISTU) in 2008, and received his Ph. D. degree from University of Chinese Academy of Sciences in 2013. He is currently an associate professor and a master advisor at BISTU. His main research interests include new mechanisms of electric field detection, non-intrusive voltage measurement technology, and MEMS electrical quantity sensors and applications.