

基于 Au-Si 共晶键合的高灵敏 MEMS 电容薄膜真空规设计

柯鑫¹, 韩晓东², 李得天^{1,2*}, 成永军¹, 孙雯君¹, 许马会², 李刚¹

(1. 兰州空间技术物理研究所 真空技术与物理重点实验室, 兰州 730000;

2. 厦门大学航空航天学院, 福建 厦门 361000)

摘要:为了解决真空腔电极引线导致的真空漏气,进一步拓展真空规的测量下限,提出了一种基于 Au-Si 共晶键合的绝压式 MEMS 电容薄膜真空规设计方案。阐述了该新型 MEMS 电容薄膜真空规的制作工艺流程、用浓硼掺杂法制备感压薄膜技术,采用阳极键合协同 Au-Si 共晶键合技术实现真空腔的密封。通过理论计算和构建有限元模型,针对不同宽厚比,对感压薄膜的整体尺寸进行了优化。在最优尺寸参数下,相比于固定电极在测量腔的结构,新型 MEMS 电容薄膜真空规的灵敏度提高了 9.5 倍,高达 38 fF/Pa。真空规测量范围在 1~1 000 Pa 之内。

关键词: MEMS; 电容薄膜真空规; Au-Si 共晶键合; 浓硼掺杂

中图分类号: TB771

文献标志码: A

文章编号: 1006-7086(2021)01-0038-07

DOI: 10.3969/j.issn.1006-7086.2021.01.005

Design of a Sensitive MEMS Capacitance Diaphragm Gauge Based on Au-Si Eutectic Bonding

KE Xin¹, HAN Xiaodong², LI Detian^{1,2*}, CHENG Yongjun¹, SUN Wenjun¹, XU Mahui², LI Gang¹

(1. Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory,

Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China;

2. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361000, Fujian, China)

Abstract: In order to solve the vacuum leakage caused by the electrode lead in the vacuum cavity, and further expand the lower limit of vacuum gauge measurement, a design scheme of MEMS capacitor diaphragm gauge (CDG) based on Au-Si eutectic bonding was proposed. In this paper, a complete manufacturing process of MEMS CDG is put forward. It is proposed to select concentrated boron doping technology to develop pressure-sensing diaphragm, and to realize the sealing of vacuum cavity by anodic bonding and Au-Si eutectic bonding. Finally, based on the theoretical calculation and the finite element model, the overall size of the pressure-sensing diaphragm was optimized for different width-thickness ratio. Under the optimal size parameters, compared with the structure of the fixed electrode in the measurement cavity, the sensitivity of the designed new non-contact MEMS CDG is improved by 9.5 times, up to 38 fF/Pa. The measuring range of the MEMS CDG is within 1~1 000 Pa.

Key words: MEMS; capacitor diaphragm gauge; Au-Si eutectic bonding; concentrated boron doping

0 引言

电容薄膜真空规具有精度高、线性和稳定性好的优点,是重要的低真空参考标准和传递标准,已

经广泛地应用于深空探测和工业过程控制。随着科学技术发展,传统的电容薄膜真空规因体积大、功耗高,已经不能满足极端领域的需求。微机电系

收稿日期: 2020-05-26

基金项目: 国家自然科学基金重大科研仪器研制项目(61627805)

作者简介: 柯鑫, 硕士研究生, 主要从事真空技术与物理研究。E-mail: kexin572888320@163.com。

通信作者: 李得天, 研究员, 博士生导师, 主要从事真空计量技术及仪器研究。E-mail: lidetian@hotmail.com。

引用本文: 柯鑫, 韩晓东, 李得天, 等. 基于 Au-Si 共晶键合的高灵敏 MEMS 电容薄膜真空规设计[J]. 真空与低温, 2021, 27(1): 38-44.

KE X, HAN X D, LI D T, et al. Design of a sensitive MEMS capacitance diaphragm gauge based on Au-Si eutectic bonding [J]. Vacuum and Cryogenics, 2021, 27(1): 38-44.

统 (Micro-electro-mechanical system, MEMS) 具有体积小、功耗低及成本低等优势, 基于 MEMS 技术的电容薄膜真空规 (简称真空规) 已成为国内外的研究热点。1993 年, Henmi 等^[1]首次提出 MEMS 电容薄膜真空规的经典结构模型: 方形薄膜和固定电极形成平行电容板, 电容值随薄膜形变而变化。之后大量研究集中于真空规测量范围的拓宽, 如 Esashi 等^[2]提出了一种双感压薄膜结构真空规, Wang 等^[3]提出了静电伺服结构, Meng 等^[4]提出了接触式结构的真空规。但是上述几种真空规的测量下限普遍高于 10 Pa。最近, 李刚等^[5-6]提出了测量范围为 1 ~ 1 000 Pa 的绝压式 MEMS 电容薄膜真空规的设计。测量范围为 5 ~ 1 000 Pa 的差压式 MEMS 电容薄膜真空规已经被成功研制出来。

在 MEMS 电容薄膜真空规的研制中, 结构设计、薄膜制备和真空封装是实现真空规高灵敏、高线性、宽量程以及长寿命的核心技术。大宽厚比的感压薄膜可在低压下实现高灵敏的电容变化, 从而达到延伸测量下限的目的。普通湿法腐蚀制得的单晶硅薄膜有着厚度难以精确控制、薄膜表面粗糙以及高压下易破损的缺点; 外延生长法沉积薄膜工艺存在造价高、性能难以控制的问题^[7]。真空规封装后, 真空腔内真空度的维持是保证真空规测量精度的关键^[8], 其中真空腔内吸气剂气体吸附能力有限以及真空规阳极键合后电极引线导致的真空漏气问题普遍存在。为了有效地解决上述问题, 进一步提高真空规的测量下限, 本文设计了一种采用局部 Au-Si 共晶键合来密封电极引线的新型绝压式 MEMS 电容薄膜规, 其测量范围在 1 ~ 1 000 Pa 之间。

1 真空规结构及制作工艺流程

在 MEMS 电容薄膜真空规中, 感压薄膜与固定电极组成平行板电容器, 感压薄膜在两侧压差下发生形变, 与固定电极之间的间隙产生变化, 从而引起电容改变, 通过电路测量电容变化量即可检测压力大小。如图 1 所示, 普通 MEMS 电容薄膜真空规在设计的过程中, 为避免真空腔内电极引线导致的漏气, 通常将固定电极放置在测量腔一侧, 当压力逐渐增大时, 感压薄膜朝着远离固定电极的方向发生形变。该类真空规结构简单, 易于制作, 但存在两个问题: 一方面, 电容随着压力增大而减小, 微小电容测量时易受杂散电容的影响, 导致真空规精度降低; 另一方面, 在测量压力范围内, 电容值变化范围有限, 使得真空规灵敏度较低。

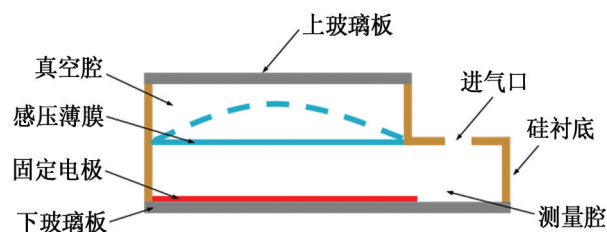


图1 普通 MEMS 电容薄膜规结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of common MEMS capacitor diaphragm gauge

为了使 MEMS 电容薄膜真空规的测量范围达到 1 ~ 1 000 Pa, 且有效提高测量精度, 应将固定电极放置在真空腔内, 并采用 Au-Si 共晶键合技术实现良好的真空密封。如图 2 所示, 所设计的新型真空规主要由上玻璃板、下玻璃板和微加工处理的 Si 衬底组成。采用浓硼掺杂技术制作感压薄膜, 在下玻璃板上用磁控溅射沉积一层 Al 膜作为金属固定电极, 在固定电极上再溅射沉积一层 200 nm 厚的 TiZrV 薄膜作为非蒸散型吸气剂。下玻璃板与 Si 衬底键合时, 400 °C 左右的键合温度可激活 TiZrV 薄膜, 使其正常工作, 以解决真空腔放气问题。

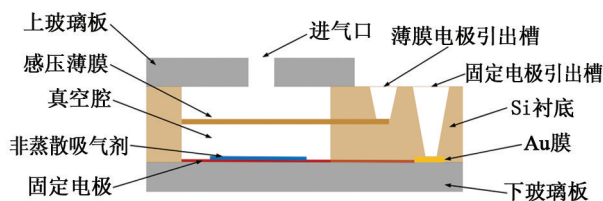


图2 新型 MEMS 电容薄膜规结构示意图

Fig. 2 Structure of new MEMS capacitor diaphragm gauge

为了有效地解决真空漏气问题, 在下玻璃板电极引出槽对应处磁控溅射沉积一层 100 nm 厚的 Au 膜, 其面积大于 Si 衬底上固定电极引出槽的开槽面积, 如图 3 所示。新型真空规的电容随压力增大而增大, 从而达到提高测量精度的设计目的。

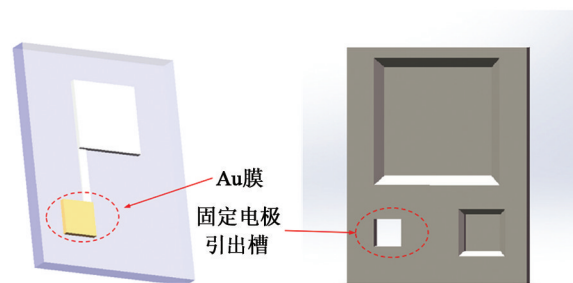


图3 下玻璃板的 Au 膜和 Si 衬底上的固定电极引出槽示意图

Fig. 3 Schematic diagram of Au film on the bottom glass plate and fixed electrode outlet groove on silicon substrate

传统的 MEMS 电容薄膜真空规在下玻璃板与 Si 衬底阳极键合时,电极引线是阻碍玻璃和 Si 完全密封键合的重要因素,成为连通真空腔与外界的微小通道(如图 4 所示),会在短短数月破坏真空腔的高真空环境,大幅降低真空规的测量精度和使用寿命。

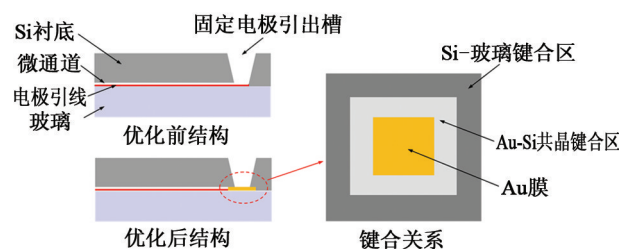


图 4 Au-Si 共晶键合阻断微小通道示意图

Fig. 4 Schematic diagram of micro-channel blocked by Au-Si eutectic bonding

本文基于传统阳极键合方法,在固定电极引出槽对应的引线处溅射沉积一层 Au 膜,利用 Au-Si 共晶键合原理,使玻璃与 Si 阳极键合时, Si 和 Au 膜同时完成键合,阻断电极引线连接真空腔与外界的微通道。键合关系如图 4 所示,暴露在外的 Au 可作为

与外电路连接的电极,新型键合方式可有效地解决电极引线导致的真空漏气问题。

基于 Au-Si 共晶键合的 MEMS 电容薄膜规的制作流程如图 5 所示,选用 P 型(100)双面抛光的 Si 片,首先对 Si 片进行标准清洗(图 5(a)),之后用氧化工艺分别在 Si 片的两面生长一层致密的氧化层(图 5(b));在 Si 片正面旋涂一层光刻胶,利用光刻技术将掩膜板上的图形转移到 Si 片正面(图 5(c));再用干法将用光刻胶保护的、做好图形的 Si 片正面刻蚀凹槽,形成真空腔(图 5(d));采用热扩散工艺,在 Si 片正面掺杂一层 B(图 5(e));清洗掉氧化层后,将 Si 片正面和上玻璃板键合在一起(图 5(f));Si 片背面通过光刻技术做好图形后(图 5(g)),在光刻胶保护下进行湿法腐蚀,自停止腐蚀留下的悬空薄膜,即为感压薄膜(图 5(h));对上玻璃板采用激光打孔工艺制作进气口(图 5(j));在下玻璃板上利用磁控溅射技术沉积一层 Al 膜作为固定电极,在固定电极上再沉积一层 200 nm 的 TiZrV 薄膜,在电极引出槽对应位置沉积一层 100 nm 的 Au 膜(图 5(k));最后将制作好结构的 Si 衬底与下玻璃板同时进行 Si-玻璃阳极键合和 Au-Si 共晶键合(图 5(l))。

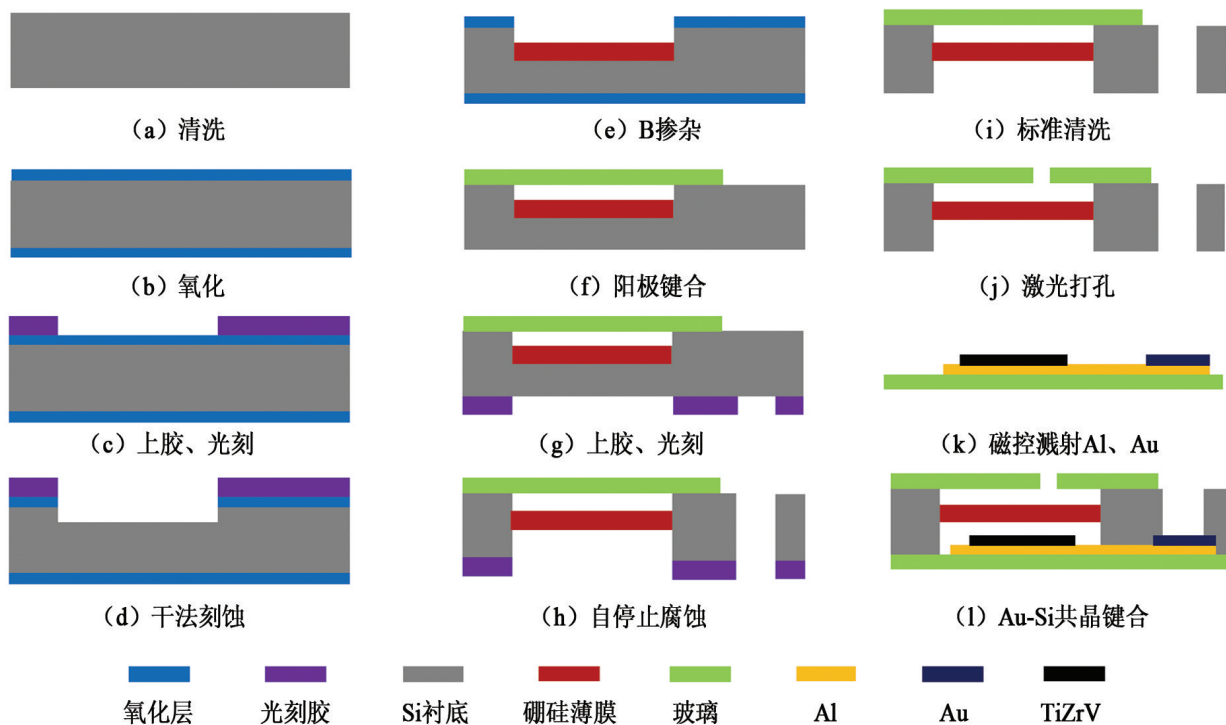


图 5 新型 MEMS 电容薄膜真空规制作工艺

Fig. 5 Manufacturing process of new MEMS capacitor diaphragm vacuum gauge

感压薄膜厚度由浓 B 掺杂层的厚度决定,腐蚀

剂对 B 掺杂超过阈值浓度(至少约为 10^{19} cm^{-3})的掺

杂层的腐蚀速率极低,从而可以有效地达到自停止腐蚀的效果^[9]。四甲基氢氧化铵(TMAH)有着选择性好、无毒且不污染环境、腐蚀性能优良的优点,可作为自停止腐蚀的新型腐蚀剂^[10]。浓 B 掺杂后,薄膜的弹性模量升高至 240 GPa^[11],抗压性能随之提高,因而使真空规的测量上限拓宽,工作寿命延长。同时,薄膜电导率的大幅提升,可以直接提升真空规的测量精度。B 扩散工艺完成后, Si 片表面会生成一层硼硅玻璃,其主要成分包括氧化硅、氧化硼和一些其他金属氧化物。硼硅玻璃会使感压薄膜内应力集中,也会阻碍玻璃-Si 阳极键合,因此必须采取措施除去硼硅玻璃。考虑到感压薄膜仅为 10 μm 厚度,生成的硼硅玻璃也较薄,可选用低温氧化去除法^[12]:用氢氟酸清洗 Si 片后,将 Si 片放入氧化炉氧化 20 min 左右,硼硅玻璃内侧和 Si 衬底外侧会被氧化生成极薄的氧化硅,再将 Si 片放入氢氟酸溶液中清洗足够时间。

Au-Si 共晶键合时, Si 表面必须保证足够的干净,即使是自然生成的极薄氧化层也会对共晶键合产生极大地阻碍。因此在对 Si 片背面进行自停止腐蚀后,需要对 Si 片进行标准清洗(图 5(i)):用氢氟酸去除表面残留的氧化层,必要时须增加干法刻蚀技术。有研究表明, Au-Si 共晶键合的最佳温度是 380 $^{\circ}\text{C}$, Si-玻璃阳极键合的温度一般是 400 $^{\circ}\text{C}$ 左右,因此,两种键合方式具有较强的兼容性^[13]。

2 感压薄膜形变分析

感压薄膜的整体尺寸决定真空规的测量范围和测量精度,采用周边固支条件下的方形薄膜形变方案,感压薄膜设计边长为 $2b$ 、厚度为 h 的方形大宽厚比薄膜,薄膜与固定电极之间距离为 d ,两个电极之间的真空介电常数为 ε ,挠度变化如图 6 所示。

两个电极之间的初始电容为:

$$C_{0i} = \frac{4\varepsilon b^2}{d} \quad (1)$$

考虑到感压薄膜是四周固支的方形薄膜,当薄膜受到的外界压力为 p 时,挠度变化为

$$w(x, y) = \frac{49p(x^2 - b^2)(y^2 - b^2)^2}{2 \cdot 304Db^4} \quad (2)$$

式(2)中,坐标系的原点是薄膜中心, D 是薄膜的弯曲刚度,可表达为:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (3)$$

其中, E 和 ν 分别是薄膜的杨氏模量和泊松比。

薄膜与固定电极之间的电容可表示为^[14]:

$$C_i = \int_{-b}^b \int_{-b}^b \frac{\varepsilon}{d - w(x, y)} dx dy = \frac{\varepsilon}{d} \int_{-b}^b \int_{-b}^b \frac{1}{1 - \frac{w(x, y)}{d}} dx dy \quad (4)$$

将式(2)代入式(4),电容为:

$$C_i = C_{0i} \left(1 + \frac{12.25pb^4}{2 \cdot 025dD} \right) \quad (5)$$

MEMS 电容薄膜真空规的灵敏度可表示为:

$$S_i = \frac{dC_i}{dp} = \frac{49\varepsilon b^6}{2025d^2 D} \quad (6)$$

由上述公式可见,真空规的灵敏度随方形薄膜边长增大而增大,随薄膜厚度增大而减小,说明感压薄膜的宽厚比是延伸真空规测量下限以及提高测量精度的关键因素。为设计薄膜尺寸,设定 1 000 Pa 为薄膜接触下电极的临界压力,薄膜挠度随厚度变化的压力-挠度曲线如图 6 所示。可以看出,当 $b=1$ 时,改变薄膜厚度 h ,薄膜的宽厚比越大,其挠度越大。由上述公式可知,薄膜挠度与 b 的 4 次方成正比,与 h 的 3 次方成反比,因此,在相同宽厚比的条件下,挠度随薄膜厚度增加而成相应倍数增加。本项研究设计的是非接触型 MEMS 电容薄膜真空规,电极间隙过大会降低真空规的灵敏度,而间隙过小会导致初始电容过大,不适合微小电容的测量。因此, d 的范围在 5~20 μm 、 b 的范围在 1~2 mm 之间为宜。

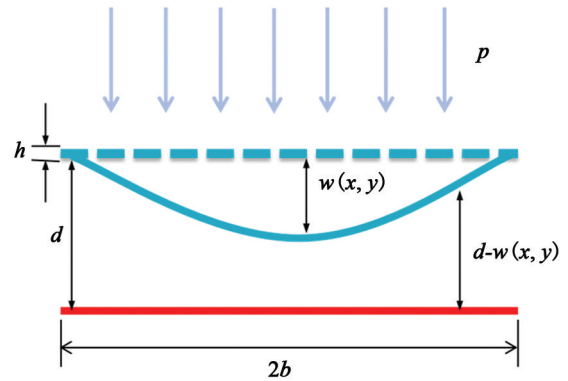


图6 压力 p 下感压薄膜的挠度变化示意图

Fig. 6 Diagram of deflection change of pressure sensitive film under pressure p

从图 7 可知,仅有 $b=1$ mm、 $h=5$ μm 最符合挠度要求。综合考虑相同宽厚比下,不同尺寸的感压薄膜对真空规的影响,分别取 $b=1.5$ mm、 $h=7.5$ μm 和 $b=2$ mm、 $h=10$ μm 进行计算,两种尺寸的薄膜在 1 000 Pa 下的挠度分别为 14.44 μm 和 19.26 μm 。

薄膜在 1 000 Pa 下的最大挠度应尽可能接近电极之间的距离 d 。因此,固定薄膜的宽厚比,设计了三种尺寸方案为: $b=1\text{ mm}$ 、 $h=5\text{ }\mu\text{m}$ 、 $d=10\text{ }\mu\text{m}$; $b=1.5\text{ mm}$ 、 $h=7.5\text{ }\mu\text{m}$ 、 $d=15\text{ }\mu\text{m}$; $b=2\text{ mm}$ 、 $h=10\text{ }\mu\text{m}$ 、 $d=20\text{ }\mu\text{m}$ 。

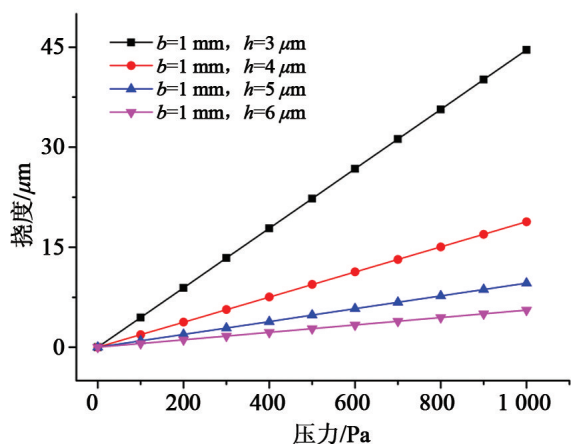


图 7 四种不同宽厚比薄膜的压力-中心挠度关系

Fig. 7 Pressure-center deflection relation of four kinds of diaphragm with different width-thickness ratio

3 仿真优化及性能分析

为了对真空规的尺寸进行优化设计,使用 COMSOL 中固体力学和静电模块构建了基于不同宽厚比感压薄膜的有限元分析模型,如图 8 所示。该

模型核心区域主要由边长为 b 的 3 块正方形平板构成,根据对称原理将第一层设定为四分之一份的感压薄膜,厚度为 h ;第二层为真空腔,深度为 d ;第三层为固定电极。在感压薄膜正面相邻两边施加固定约束,薄膜正面施加均匀载荷。

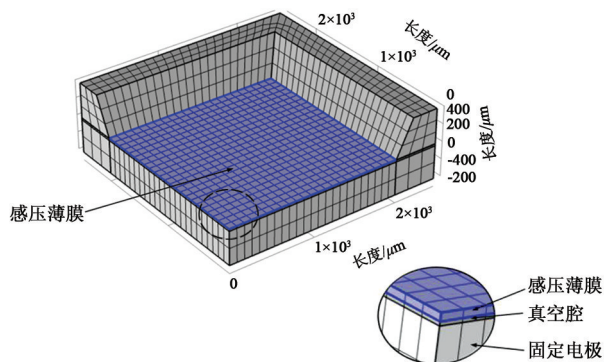


图 8 压力传感有限元分析模型

Fig. 8 FEM model of pressure sensor

当均匀载荷增加至 1 000 Pa 时,三种尺寸方案下感压薄膜中心沿四周的挠度变化如图 9 所示,薄膜中心挠度最大,沿中心向边界递减,直角处挠度变化最小。三种尺寸的薄膜在 1 000 Pa 压力下的中心挠度分别为 $9.71\text{ }\mu\text{m}$ 、 $19.4\text{ }\mu\text{m}$ 、 $14.6\text{ }\mu\text{m}$,仿真结果与计算结果高度重合,相对误差在 0.9% 之内。

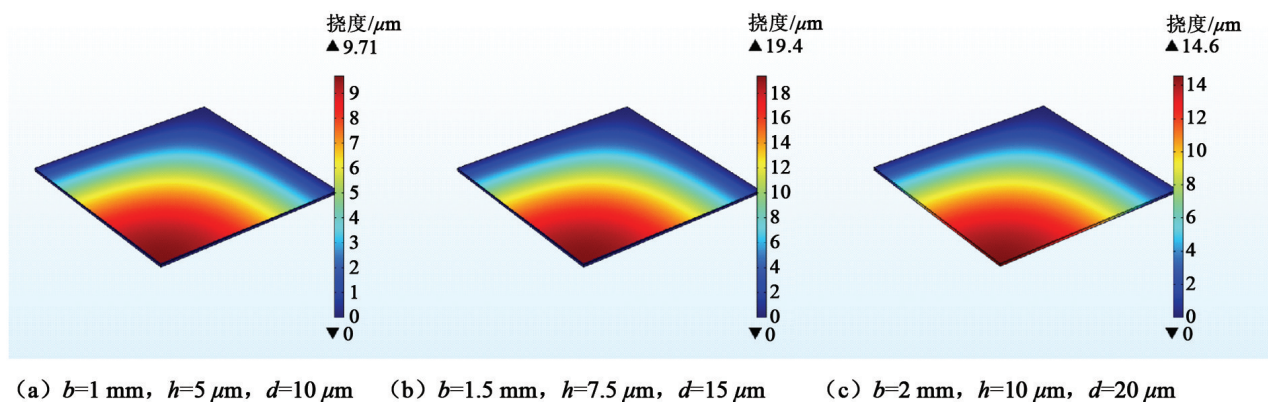


图 9 三种不同尺寸、相同宽厚比薄膜的压力-挠度对比

Fig. 9 Pressure-deflection comparison of three kinds of diaphragms with different sizes and the same width-thickness ratio

三种尺寸方案的电容随压力变化的仿真值如图 10 所示。在薄膜宽厚比相同的条件下,仿真结果表明:当 $b=1\text{ mm}$ 、 $h=5\text{ }\mu\text{m}$ 、 $d=10\text{ }\mu\text{m}$ 时,真空规总量程灵敏度最低,为 9 fF/Pa ; $b=2\text{ mm}$ 、 $h=10\text{ }\mu\text{m}$ 、 $d=20\text{ }\mu\text{m}$ 的参数组合性能最优,初始电容为 7.1 pF ,真空规总量程灵敏度为 18.7 fF/Pa 。压力小于 700 Pa 时,电容呈缓慢上升趋势,灵敏度为 16.3 fF/Pa ;压力大于

700 Pa 时,电容上升趋势明显增大,灵敏度为 38 fF/Pa ,与文献[15]中报道的压力传感器在正常区间的电容变化趋势相同。电容值变化呈先慢后快,一方面是因为电容介质对电容值的影响越来越大;另一方面是因为等效电极距离减小的越来越快。相同宽厚比下,薄膜整体尺寸越大,真空规的灵敏度越高。

为了对比固定电极分别放置在测量腔和真空

腔两种结构中真空规的性能,选用最优参数组合 $b=2\text{ mm}$ 、 $h=10\text{ }\mu\text{m}$ 、 $d=20\text{ }\mu\text{m}$,以构建相同薄膜尺寸的两种结构仿真模型。在感压薄膜背面相邻两边施加固定约束,薄膜背面施加均匀载荷,仿真结果如图 11 所示。由图可见,固定电极放置在测量腔结构中时,电容值随压力增大而减小,真空规总量程灵敏度仅为 1.96 fF/Pa 。在真空规实际工作中,过低的电容极易受杂散电容和边缘场效应的影响,导致测量精度不高^[16]。在最优尺寸参数 $b=2\text{ mm}$ 、 $h=10\text{ }\mu\text{m}$ 、 $d=20\text{ }\mu\text{m}$ 下,基于 Au-Si 共晶键合新型结构的灵敏度相比固定电极放置在测量腔的结构提高了 9.5 倍,满足真空规 $1\sim 1\,000\text{ Pa}$ 测量范围的精度要求。

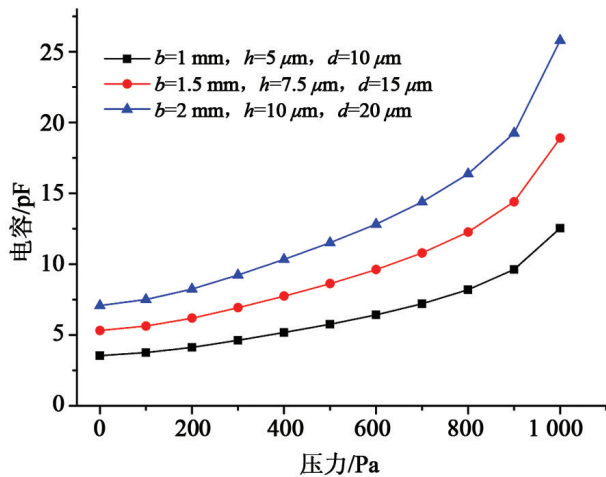


图 10 三种尺寸方案的压力-电容仿真变化曲线

Fig. 10 Pressure-capacitance simulation curves of three size schemes

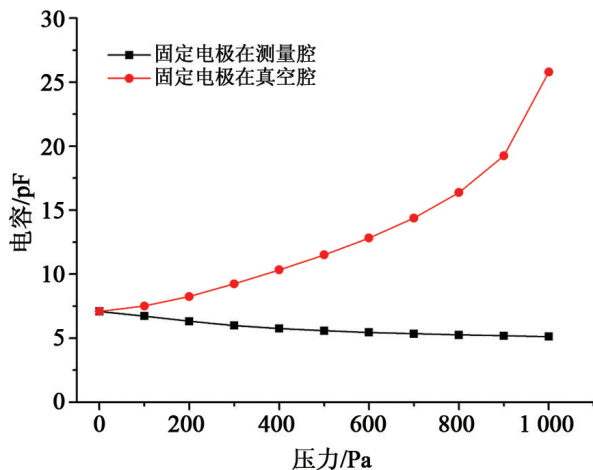


图 11 固定电极分别在两种结构中的压力-电容仿真变化

Fig. 11 Simulation of pressure-capacitance variation of fixed electrode in two different structures

4 结论

设计了一种基于 Au-Si 共晶键合的高灵敏绝压式 MEMS 电容薄膜规。利用局部 Au-Si 共晶键合阻断电极引线导通的微小通道,用非蒸散型吸气剂薄膜维持真空腔内的真空环境,解决了真空腔漏放气问题。浓 B 掺杂技术可提高感压薄膜的抗压能力和导电性能,其自停止腐蚀特性可为大宽厚比薄膜的研制提供可能性。挠度和电容计算与有限元仿真结果高度重合,挠度变化相对误差在 0.9% 之内。根据仿真优化结果设计的非接触型 MEMS 电容薄膜真空规的测量范围为 $1\sim 1\,000\text{ Pa}$,灵敏度不低于 16.3 fF/Pa ,最高达 38 fF/Pa 。该结构设计可为后续绝压式 MEMS 电容薄膜真空规的研制提供思路,有效契合真空规制作的自停止腐蚀工艺和 Au-Si 共晶键合工艺将是接下来研究工作的重点。

参考文献:

- [1] HENMI H, SHOJI S, YOSIMI K, et al. Transducers '93, in: seventh international conference on solid-state sensors and actuators[C]//Denki-Gakkai proc, 1993:584.
- [2] ESASHI M. Silicon micromachining for integrated microsystems[J]. Vacuum, 1996, 47(6/8):469-474.
- [3] WANG Y, ESASHI M. The structures for electrostatic servo capacitive vacuum sensors[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1998, 66(1/3):213-217.
- [4] MENG G, KO W H. Modeling of circular diaphragm and spreadsheet solution programming for touch mode capacitive sensors[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1999, 75(1):45-52.
- [5] LI G, LI D T, CHENG Y J, et al. Design of pressure-sensing diaphragm for MEMS capacitance diaphragm gauge considering size effect[J]. AIP Advances, 2018, 8(3):035120.
- [6] 李刚,韩晓东,李得天,等.差压式 MEMS 电容薄膜真空规的设计与测试[J].真空与低温, 2020, 26(1):17-20.
- [7] SATHYANARAYANAN S, JULIET A V. Design and simulation of touch mode MEMS capacitive pressure sensor[C]// Mechanical and Electrical Technology (ICMET), 2010 2nd International Conference on, IEEE, 2010.
- [8] KULLBERG R R C. Review of vacuum packaging and maintenance of MEMS and the use of getters therein[J]. Journal of Micro/Nanolithography, MEMS and MOEMS, 2009, 8(3):1-9.
- [9] SEIDEL H, CSEPREGIL, HEUBERGER A, et al. Anisotropic

- etching of crystalline silicon in alkaline solutions. I. Orientation dependence and behaviour of passivation layers[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1990, 137 (17) : 3612–3626.
- [10] STEINSLAND E, NESE M, HANNEBORG A, et al. Boron etch–stop in TMAH solutions[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1996, 54(1/3) : 728–732.
- [11] CHO S T, NAJAFI K. Internal stress compensation and scaling in ultrasensitive silicon pressure sensors[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1992, 39(4) : 836–842.
- [12] NING X J. Distribution of residual stresses in boron doped p^+ silicon films[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1996, 143(10) : 3389–3393.
- [13] LIU Q, DU L, ZHAO Z, et al. Localized Si–Au eutectic bonding around sunken pad for fabrication of a capacitive absolute pressure sensor[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2013, 201 : 241–245.
- [14] SHAHIRI T, GAN J, SABBAGHI N. Design and simulation of high sensitive capacitive pressure sensor with slotted diaphragm[C]//International Conference on Biomedical Engineering, IEEE, 2012.
- [15] MENG G, KO W H. Modeling of circular diaphragm and spreadsheet solution programming for touch mode capacitive sensors[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1999, 75(1) : 45–52.
- [16] HAN X D, LI D T, CHENG Y J, et al. Analysis on edge effect of MEMS capacitance diaphragm gauge with square pressure-sensing diaphragm[J]. Microsystem Technologies, 2018, 25(5) : 2907–2914.