

DOI 10.13494/j.npe.20160050

何文涛,李艳华,邹江波,等. 基于4H-SiC的LC谐振式无线高温压力敏感芯片的设计与优化[J]. 纳米技术与精密工程,2017,15(2):79-86.  
He Wentao, Li Yanhua, Zou Jiangbo, et al. Design and optimization of 4H-SiC based and LC resonant wireless passive pressure sensitive chips for harsh environment applications [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2017, 15(2): 79-86 (in Chinese).

## 基于4H-SiC的LC谐振式高温无线压力敏感芯片的设计与优化

何文涛<sup>1,2</sup>, 李艳华<sup>2</sup>, 邹江波<sup>1</sup>, 张世名<sup>1</sup>, 赵和平<sup>3</sup>, 杨龙<sup>4</sup>

(1. 航天长征火箭技术有限公司, 北京 100076; 2. 中国航天时代电子公司, 北京 100094;  
3. 中国空间技术研究院, 北京 100086; 4. 厦门大学航空航天学院, 厦门 361005)

**摘要:** 针对航空发动机、重型燃气轮机等动力设备燃烧室内压力原位测量的需求,设计了一种基于4H-SiC的LC谐振式无线高温压力敏感芯片.以现有SiC微工艺水平为基础,利用TCAD软件及多物理场耦合仿真软件,完成了敏感芯片电容、电感、感压膜等主要部件的结构设计、优化,以提高敏感芯片的 $Q$ 值及耦合强度.探讨了电感内置、外置两种设计方案本体电容的大小,并在此基础上提出一种双腔体结构,将本体电容值减小到179.66 pF.优化后的敏感芯片常温(20℃)  $Q$ 值约为13.66,100 kPa满量谐振频率变化158.62 kHz;1 000℃下的 $Q$ 值为3.65,满量变化55.53 kHz,且1 000℃下的热应力较小.这种敏感芯片将可应用于高温压力传感器的制备,为我国自主研制航空发动机、高超发动机、重型燃气轮机等先进动力系统提供支撑.

**关键词:** 高温压力; 4H-SiC; LC谐振; 仿真设计

**中图分类号:** TP212.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-6030(2017)02-0079-08

## Design and Optimization of 4H-SiC Based and LC Resonant Wireless Passive Pressure Sensitive Chips for Harsh Environment Applications

He Wentao<sup>1,2</sup>, Li Yanhua<sup>2</sup>, Zou Jiangbo<sup>1</sup>, Zhang Shiming<sup>1</sup>, Zhao Heping<sup>3</sup>, Yang Long<sup>4</sup>

(1. Aerospace Long March Launch Vehicle Technology Company, Beijing 100076, China;  
2. China Aerospace Times Electronics Co. Ltd, Beijing 100094, China; 3. China Academy of Space Technology, Beijing 100086, China;  
4. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** To meet the demand of the in-situ pressure measurement in combustion chambers of heavy gas turbines and aero-engine, 4H-SiC based and LC resonant wireless passive pressure sensitive chips were designed. To improve the  $Q$  value and couple coefficient, geometric parameters of chip's primary structures, such as the capacitance, inductance, vacuum cavity and diaphragm, were optimized by numerical analysis with TCAD and multi-physic field coupled-simulation softwares. Inductor's relative position, out of or inside the vacuum cavity was discussed, based on which a dual-cavity chip design was proposed, reducing the bulk capacitance to 179.66 pF.  $Q$  value of sensitive chips fabricated with optimized structure paramters was 13.66 and 3.65 at 20℃ and 1 000℃, respectively. The variation of the resonance frequency under full scale 100 kPa was 158.62 kHz at 20℃, which reduced to 55.53 kHz when the temperature rose to 1 000℃. These optimized chips could be applied to prepare pressure sensors for harsh environment applications, which would support the independent development of aero-engines, hypersonic

收稿日期: 2016-12-07.

基金项目: 总装预先研究资助项目(51323040122).

作者简介: 何文涛(1984—)男,博士, xshzhzw@126.com.

通讯作者: 邹江波, 研究员, zoujiangbo@hotmail.com.

engines and heavy gas turbines.

**Keywords:** pressure under high-temperature; 4H-SiC; LC resonance; simulation design

航空发动机、重型燃气轮机、高超发动机、燃煤燃气锅炉等动力设备在工作时主要部件处在超高温环境(温度高于800℃),燃烧室温度甚至超过2000℃,都具有复杂恶劣的气动环境,需要利用超高温传感器对燃烧室、压气机、汽缸、叶片、进气口、出气口等关键部位、部件的压力、温度等参量进行实时监测<sup>[1-4]</sup>。对火箭发动机燃烧室内压力、温度监控,实现主动调节燃料分配比,可抑制燃烧振荡,避免发生贫燃失火,减小内壁损伤,提高燃烧效率及安全性<sup>[1-4]</sup>。重型燃气轮机是发电机组、大型舰船的动力来源,结构复杂、参数高、工况多变,随着G、H级的普及,对其稳定性要求也更高。对涡轮、压气机、燃烧室、轴承的温度、压力、振动等参数的监控,可降低燃气轮机的故障率,减少15%~20%的维护成本。另外,监测初气温度及燃烧室的压力,对提高煤转化效率,减少CO<sub>2</sub>、CO、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>等温室气体的排放具有重要意义<sup>[3,5-6]</sup>。

硅作为MEMS领域最常用的材料在温度高于500℃时开始蠕变,机械性能大幅退化,不适用于高温传感器的研制<sup>[7]</sup>。碳化硅作为第三代直接跃迁型宽禁带半导体材料具有优良的抗辐照特性、热学性能、抗腐蚀性,且微工艺与MEMS工艺兼容。SiC晶体形态较多,β-SiC在1200℃时仍保持良好的机械强度,在制备高温传感器方面有广泛的应用前景<sup>[8-10]</sup>。NASA Glenn中心从20世纪90年代就开始SiC高温压力传感器的研究,2007年该中心提出的基于6H-SiC的压阻式压力传感器,工作温度达到600℃<sup>[11]</sup>;凯斯西储大学的Li等<sup>[12]</sup>研制了基于3C-SiC的电容式压力传感器,工作温度达到574℃;加州大学伯克利分校的Pisano利用SiC、AlN材料研制出高温多参数测量系统,其压力单元也可实现600℃下的压力测量<sup>[13]</sup>。国内清华大学的王晓浩课题组<sup>[8]</sup>、北京遥测技术研究所的尹玉刚课题组<sup>[14]</sup>、中北大学的李赛男等<sup>[15]</sup>、中电13所的何洪涛等<sup>[16]</sup>也开展了压阻、电容等原理的SiC高温压力传感器研究。但受电性连接部件工作温度的限制,现有的SiC高温传感器还不能在高于800℃的环境下长期工作。LC谐振原理的无线压力检测方案能实现电性连接、调理电路与高温热源的物理隔离,提高传感器的工作温度,延长稳定工作时间<sup>[2]</sup>。Fonseca等<sup>[17]</sup>最早用低温共烧陶瓷(LTCC)研制了可工作于400℃的LC谐振压力传感器,之后Radosavljevic等<sup>[18]</sup>、Xiong等<sup>[19]</sup>又将LTCC方案的传感器工作温度提高到600℃。为进一步提高测量温度,Zhang等<sup>[20]</sup>、Sturesson等<sup>[21]</sup>利

用高温共烧陶瓷(HTCC)分别实现800℃、1000℃下的压力测量;Cheng等<sup>[22]</sup>则利用SiAlCN陶瓷将传感器的工作温度提高到1050℃。然而,陶瓷烧结、丝网印刷等工艺的精度较低,制备的敏感芯片存在尺寸大、精度差、漏率高、灵敏度低、一致性差等问题,难以实现传感器的工程化、产品化。目前,SiC-MEMS微工艺已较为成熟,具有与硅微工艺兼容、加工精度高、绝压腔真空度高、长期漏率低等特点,适合制备高灵敏度的全SiC LC谐振式高温压力传感器,解决共烧陶瓷方案存在的不足。

本文提出一种基于全4H-SiC的LC谐振式无线高温压力敏感芯片设计,分析了敏感芯片的测压原理,并在现有的SiC微工艺基础上,利用数值仿真软件Silvaco及Comsol Multiphysics对敏感芯片几何结构进行了仿真优化,最后给出敏感芯片的制备方法。这种基于4H-SiC的LC谐振压力敏感芯片具有较高的Q值,热应力小、真空度高、气密性好等优点,可应用于超高温压力传感器的研制。

## 1 敏感芯片的工作原理

### 1.1 LC谐振检测原理

LC谐振压力传感器的工作原理如图1(a)所示,由感压膜、绝压腔构成的电容结构C<sub>s</sub>与工作电感L<sub>s</sub>形成LC谐振单元,压力引起感压膜形变进而改变LC回路的谐振频率f<sub>s</sub>。f<sub>s</sub>的测量通过读取电感L<sub>R</sub>与工作电感L<sub>s</sub>互感实现,LC谐振单元与读取电路共同构成LC谐振压力检测系统,其等效电路如图1(b)所示。从读取电路来看,敏感膜受压形变引起阻抗值的变化,通过研究读取电路阻抗与谐振频率的关系可实现压力测量。

图1(b)所示读取电路的等效阻抗可表示为

$$Z_{\text{Read}} = R_R + j2\pi f L_R + \frac{1}{j2\pi f C_R} + Z_{\text{equ}} \quad (1)$$

$$Z_{\text{equ}} = \frac{4\pi^2 f^2 k^2 L_R L_s}{j2\pi f L_s + R_s + 1/(j2\pi f C_s)} \quad (2)$$

式中:Z<sub>equ</sub>为LC谐振单元的等效阻抗;R<sub>s</sub>为LC谐振电路的内阻;R<sub>R</sub>为读取线圈的内阻;k为工作电感与读取电感的耦合系数;f为激励信号的频率。对于LC谐振电路,其谐振频率f<sub>s</sub>及Q值为

$$f_s = 1/(2\pi \sqrt{L_s C_s}) \quad (3)$$

$$Q = (1/R_s) \sqrt{L_s/C_s} \quad (4)$$

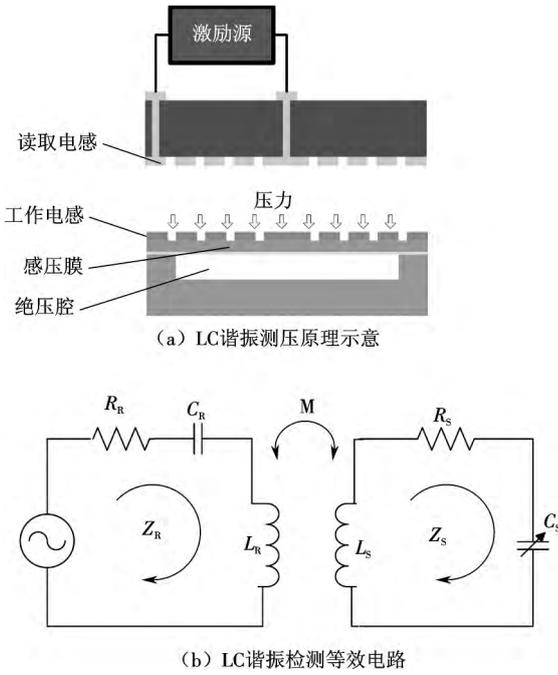


图1 LC谐振无线测压原理

Fig.1 Schematic diagram of wireless pressure measurement based on LC resonance

$Z_{Read}$  的实部如式(5)所示:

$$Re\{Z_{Read}\} = R_R + 2\pi f L_R k^2 Q \frac{f/f_s}{1 + Q^2(f/f_s - f_s/f)^2} \quad (5)$$

式(5)存在明显的峰值,峰值频率  $f_{Re\_max}$  通过  $Q$  值及  $f_s$  表示为

$$f_{Re\_max} = \frac{2Q}{\sqrt{4Q^2 - 2}} f_s \quad (6)$$

由式(6)可知当  $4Q^2 \gg 2$  时,读取电路阻抗实部峰值频率即为LC谐振模块的谐振频率,而与耦合系数无关.且当  $f = f_s$  时有

$$Re\{Z_{Read}\}_{max} = R_R + L_R k^2 \frac{1}{R_S C_S} \quad (7)$$

平面螺线的电感值可通过经修正后的 Wheeler 公式计算:

$$L_S = K_1 \mu_0 \frac{n^2 d_{avg} (d_{out} + d_{in})}{d_{out} + d_{in} + K_2 (d_{out} - d_{in})} \quad (8)$$

式中:  $n$  为线圈的匝数;  $K_1$ 、 $K_2$  为常数,与线圈的形状相关.对于圆形线圈有  $K_1 = 2.23$ ,  $K_2 = 3.45$ ;  $d_{avg}$  为线圈的平均直径;  $d_{out}$  为线圈外圈直径;  $d_{in}$  为内圈直径.线圈的内阻  $R_S$  主要来源于电感线圈的内阻,考虑高频电流的趋肤效应  $R_S$  可表示为

$$R_S = \frac{\rho l}{w \lambda \left(1 - \exp\left(-\frac{h}{\lambda}\right)\right)} \quad (9)$$

式中:  $\rho$  为金属的电阻率;  $l$  为电感线圈的总长度;  $w$  为线圈的宽度;  $h$  为线圈的厚度;  $\lambda$  为电流在金属中的趋肤深度. Pt 在 20 MHz 时趋肤深度大于  $36.67 \mu\text{m}$ , 目前电镀铂的常规厚度小于  $20 \mu\text{m}$ , 因此在优化设计时无需考虑趋肤效应的影响.

平面螺线电感的耦合系数涉及多个单线圈间的互感和自感,理论计算较为复杂,一般采用有限元软件仿真分析.王健<sup>[23]</sup>对单线圈的互感与耦合距离进行了研究,认为线圈的有效耦合距离应小于线圈的直径;文献[24]的分析结果则表明耦合线圈间几何形态相似时的耦合系数较大.在此基础上,本文将利用 Comsol Multiphysics 软件对不同几何形态线圈的耦合特性进行仿真分析.

SiC 作为半导体, SiC 敏感芯片同样具有半导体功能器件的特征.芯片的感压膜、基底、 $\text{SiO}_2$  绝缘层、真空腔、金属电感等构成了复杂的 MISIS(金属-绝缘层-半导体-绝缘层-半导体)结构. MISIS 为电容的计算涉及多层半导体结构的电容特性,其理论较常规电容复杂,该结构的简化电学模型及等效电路如图2所示.

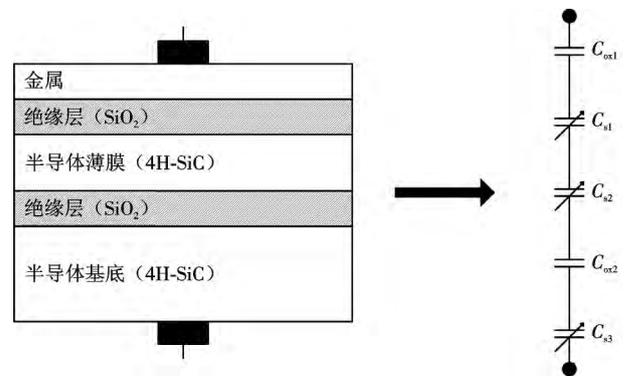


图2 MISIS 的结构示意及其等效电路

Fig.2 MISIS structure and its equivalent circuit

根据等效电路可知, MISIS 模型的总电容  $C$  满足

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{ox1}} + \frac{1}{C_{s1}} + \frac{1}{C_{s2}} + \frac{1}{C_{ox2}} + \frac{1}{C_{s3}} \quad (10)$$

式中:  $C_{ox1}$ 、 $C_{ox2}$  为绝缘层形成的电容;  $C_{s1}$ 、 $C_{s2}$ 、 $C_{s3}$  为半导体的空间电荷区形成的电容.结合载流子连续性原理、高斯定律及泊松方程,可得

$$V_G = \psi_{ox1} + \psi_{ox2} + \psi_{s1} - \psi_{s2} + \psi_{s3} \quad (11)$$

$$Q_G + Q_{f1} + Q_{f2} + Q_{s3} = 0 \quad (12)$$

$$Q_{f1} = \epsilon_s E_0 - C_{ox1} \psi_{ox1} \quad (13)$$

$$Q_{f2} = C_{ox2} \psi_{ox2} - \epsilon_s E_0 \quad (14)$$

$$C_{ox2} \psi_{ox2} + Q_{s3} = 0 \quad (15)$$

$$C_{ox1} \psi_{ox1} - Q_G = 0 \quad (16)$$

式中:  $V_G$  为金属到基底的压降;  $\psi_{ox1}$ 、 $\psi_{ox2}$  为上下为  $\text{SiO}_2$

绝缘层处的压降;  $\psi_{s1}$ 、 $\psi_{s2}$  为上层半导体的上下两个界面处空间电荷区的压降;  $\psi_{s3}$  为基底空间电荷区的压降;  $Q_{n1}$ 、 $Q_{n2}$  为上层半导体上下两个界面处空间电荷区的电荷密度;  $Q_C$  为金属与上绝缘层界面处的电荷密度;  $Q_{s3}$  为基底空间电荷区的电荷密度;  $E_0$  为上层绝缘层处于耗尽层与临界点处的电场强度.  $C_{ox1}$ 、 $C_{ox2}$  是固定电容, 但  $C_{s1}$ 、 $C_{s2}$ 、 $C_{s3}$  的大小与激励电压的幅值及频率相关, 将采用 TCAD 软件 Silvaco 仿真研究该结构的电学特性.

1.2 机电特性原理

感压膜、绝压腔的几何结构决定了传感器的灵敏度, 其受压时的形变可用周边固支膜模型分析, 不考虑残余应力的影响, 在受到向下的均布载荷作用时, 小变形情况下敏感膜中心点的挠度  $d_0$  为

$$d_0 = \frac{3(1-\nu^2)pa^4}{16Et^3} \tag{17}$$

式中:  $a$  为感压膜半径;  $p$  为外界施加压力; 4H-SiC 材料的弹性模量  $E$  和泊松比  $\nu$  分别为  $E = 475 \times 10^9$  Pa 和  $\nu = 0.22$ ;  $t$  为敏感膜厚度. 不考虑热应力和残余应力, 感压膜应力最大处位于膜片的边缘, 大小可表示为

$$\sigma_{max} = \frac{3pa^2}{4t^2} \tag{18}$$

式(17)、(18)表明挠度与应力感压膜的应力都与感压膜半径、厚度的比值正相关, 另外感压膜在高温时还受较大的热应力, 设计时需综合考虑.

2 设计、仿真优化与实现方法

全 SiC-LC 谐振压力传感器敏感芯片的设计优化首先要针对实际的应用场景, MEMS 传感器对芯片的尺寸较为敏感, 本文中敏感芯片的边长将控制在约 10 mm 左右, 另外结构参数的优化还需考虑现有 SiC 微工艺水平, 使优化方案具有可实施性. 根据第 1 节的理论分析, 敏感芯片的仿真优化也将分为两个部分: ①对电容、电感等电性结构的优化, 提高敏感芯片的  $Q$  值、耦合系数  $k$ ; ②通过对敏感芯片在不同温度下的  $P-C$  特性的研究优化敏感芯片的机械结构, 减小热应力, 提

高芯片的灵敏度.

2.1 敏感芯片电性结构的设计优化

对于 SiC-LC 谐振压力敏感芯片电性结构的设计优化主要是对电容、电感结构的设计优化, 首先需确定电感、电容电极与绝压腔的位置关系, 两种典型的位置关系如图 3 所示. 图 3(a) 为外置方案, 该方案中电容电极与电感线圈位于绝压腔外, 电容电极、电感线圈、氧化硅绝缘层、真空、SiC 结构构成复杂的 MISIS 结构; 图 3(b) 则为内置方案, 电感线圈、电容电极位于腔体内, 电场通过 SiC 向四周延伸, 电容的构成较外置方案更为复杂. 相比外置方案, 内置方案电感线圈保护在绝压腔内, 外界水汽、多余物对电性结构的影响较小. 但目前常用的 Cree 公司 n 型 4H-SiC 片的电阻率仅为  $0.02 \Omega/\text{cm}$ , 室温下载流子的浓度约为  $3 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ , 高温下对电磁信号有屏蔽作用, 影响电感间的耦合. 另外, 当电感尺寸、键合面宽度相同时, 内置方案的芯片面积将更大, 制备时还需突破带金属线圈的 SiC 键合工艺, 难度较大. 对两种方案的选取, 需进一步比较两种方案的电容值、 $Q$  值后, 综合考虑.

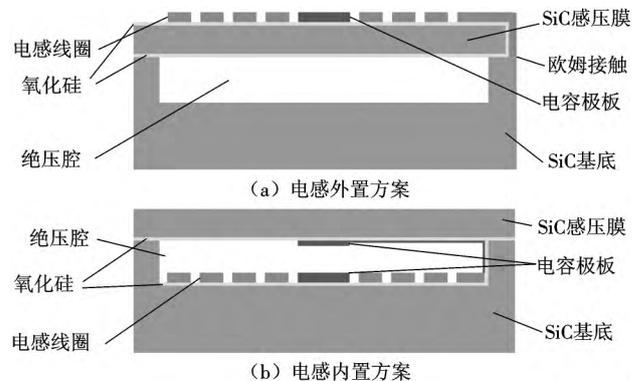


图 3 两种设计方案的示意

Fig. 3 Sketch drawings of two alternative designs

本文采用 TCAD 软件 Silvaco 2010 的 Atlas 仿真器的小信号分析模块进行 3D 仿真, 分析两种方案的  $C-V$  特性. 参考文献 [13] 的设计, 为保证足够的键合强度, 两种方案键合面宽度均为 0.5 mm, 其他结构参数如表 1 所示.

表 1 两种方案几何参数的设计值

Tab. 1 Values of geometric parameters of two alternative designs

方案类型	电感外圈半径/mm	电感线圈厚度/ $\mu\text{m}$	芯片尺寸/(mm $\times$ mm)	电容极板半径/mm	感压膜半径/mm	感压膜厚度/ $\mu\text{m}$	绝压腔高度/mm	SiC 基底厚度/ $\mu\text{m}$	键合层 SiO <sub>2</sub> 厚度/ $\mu\text{m}$	电性绝缘 SiO <sub>2</sub> 层厚度/ $\mu\text{m}$
电感、电容外置	10	20	10 $\times$ 10	2	4.5	350	8	350	3	2
电感、电容内置	10	20	12 $\times$ 12	2	5.5	350	8	350	3	2

常用的阻抗分析仪的驱动电压最大峰值为 1 V, 仿真时扫描电压范围为 -1 ~ 1 V, 步进 0.2 V, 频率 10

MHz, 仿真计算方法为 Newton 迭代法, 仿真结果如图 4 所示.

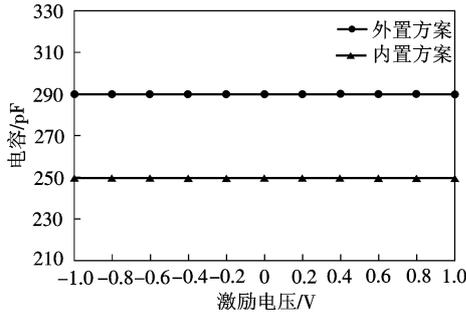


图 4 两种方案的 C-V 特性曲线

Fig. 4 C-V characteristic curves of two alternative designs

由图 4 可知, 外置、内置两种方案的本体电容分别为 289.63 pF 和 249.27 pF, 外置方案电容较内置方案大 16.2%, 对 Q 值的影响不大, 综合比较两方案的优缺点, 外置方案更为合理. 另外, 两种方案的电容值都不随电压变化, 表明 SiC 空间电荷区所形成的电容远大于 SiO<sub>2</sub>、真空形成的电容, 对串联电容值基本无贡献. 激励电压频率为 1 MHz、20 Hz 的仿真结果与图 4 结果基本一致, 证明在压力检测时, 激励电压的频率 (≥1 MHz)、幅值的变化不会引起 LC 谐振频率的变化, 对压力测量无影响. 值得注意的是, 两种设计的电容本体值都较大, 远大于通过金属电极正对面积计算得到的电容值, 其原因是 SiC 作为半导体, 电阻率较小, 电场分布沿 SiC 向四周扩展, 构成分布电容, 形成电容区域的实际面积远大于金属电极的面积. 由于 SiO<sub>2</sub> 的相对介电常数为 3.9, 本体电容主要由 SiO<sub>2</sub> 键合层区域构成, 减小键合区域的面积能有效地减小本体电容, 但可能造成键合强度的降低.

由图 3 可知, 电感与基底 SiC 的电性连接是通过与基底 SiC 形成欧姆接触实现的, 需利用 ICP 深刻蚀工艺在感压膜上形成通孔. 当刻蚀深度超过 60 μm 时, 刻蚀过程中易“长草”, 导致基底污染而无法形成欧姆接触. 感压膜厚度拟定为 50 μm, 为保证膜片为小变形模式, 100 kPa 时膜的中心挠度不大于 8 μm, 为避免 100 kPa 时感压膜发生贴合, 由式 (17) 可知腔体的半径须小于 2.24 mm. 减小腔体意味着芯片键合面积的增加, 如图 5 (a) 所示, 本体电容也随之增大. 为减小本体电容, 设计了如图 5 (b) 所示的双腔体结构, 由于外腔仅起到电感支撑作用, 其键合区域可减小为若干个锚点, 键合区域的横截面如图 5 (c) 所示. 利用 Silvaco 计算上述两种结构的本体电容值, 分别为 493.08

pF、179.66 pF, 双腔体结构的本体电容小于电感内置方案, 因此双腔体设计能显著减小芯片的本体电容, 提高敏感芯片的 Q 值.

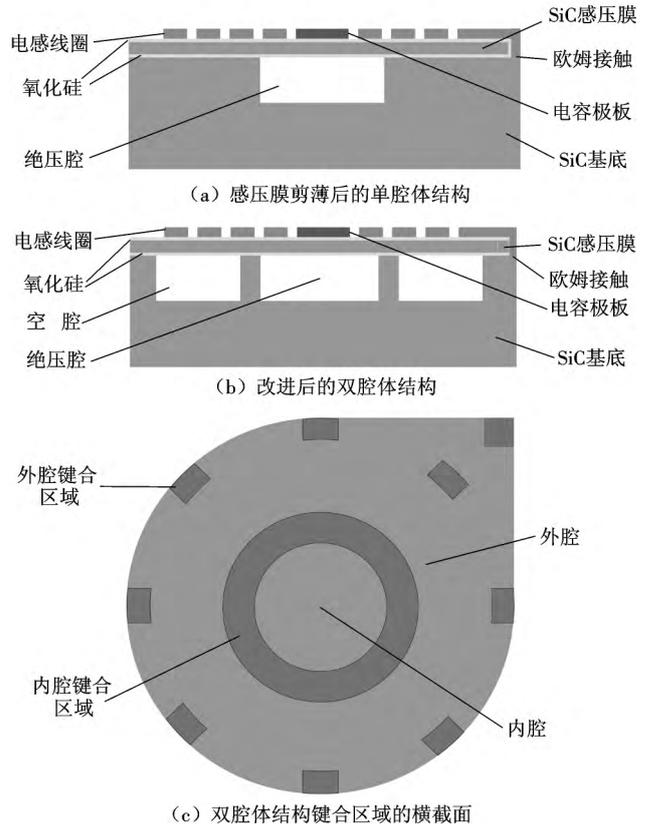


图 5 感压膜剪薄后的单腔体与双腔体设计结构示意图

Fig. 5 Schematic representations of single-cavity and dual-cavity chip designs with thinner diaphragms

在电容及电感外径确定时, 匝数对线圈的互感影响较大, 理论计算平面螺线圈互感系数难度较大, 本文采用 Comsol Multiphysics 有限元仿真软件的静磁场模块对不同匝数线圈的互感系数进行仿真, 并研究了不同匝数下阻抗实部的极值. 仿真时保持读取线圈与工作线圈的几何结构相同, 线宽参考文献 [2], 设定为 250 μm, 匝间距受电镀铂工艺限制设定为 50 μm, 电感间的耦合距离为 2 mm, 仿真结果如表 2 所示.

由表 2 可知, 阻抗实部的极大值随匝数增大先增大后减小, 在匝数为 16 时阻抗实部极值最大, 而 Q 值随线圈匝数增大而减小. 匝数为 16 时电感线圈的内圈半径仅为 0.7 mm, 而绝压腔的半径为 2.2 mm, 为减小电感结构与感压膜的相互影响, 并综合考虑 Q 值对传感器测量精度的影响, 选取 10 ~ 12 圈较为合理, 本文选择 10 圈.

表2 不同匝数下的敏感芯片的电性特征

Tab.2 Electrical properties of sensitive chips with inductance of different turns

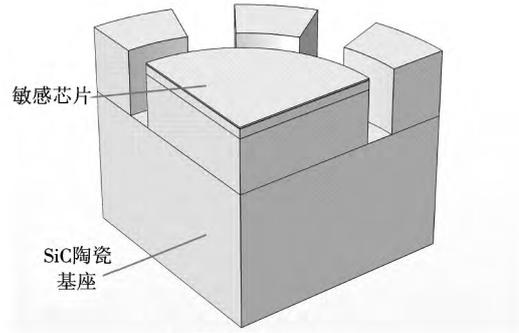
匝数	$d_{in} / \mu\text{m}$	电感 / $\mu\text{H}$	互感系数 $k$	工作电感内阻 / $\Omega$	$\text{Re}\{Z_{\text{Read}}\}$ 极大值 / $\Omega$	$Q$ 值
2	9 800	0.316	0.141	1.582	23.645	26.487
4	8 600	0.586	0.270	2.929	83.947	19.478
6	7 400	0.821	0.370	4.103	156.277	16.459
8	6 200	1.023	0.448	5.114	228.162	14.741
10	5 000	1.191	0.502	5.955	285.983	13.661
12	3 800	1.325	0.535	6.627	324.582	12.948
14	2 600	1.426	0.550	7.131	343.195	12.482
16	1 400	1.494	0.550	7.472	343.515	12.194
18	200	1.558	0.534	7.788	324.729	11.947

2.2 敏感芯片机电特性的仿真优化

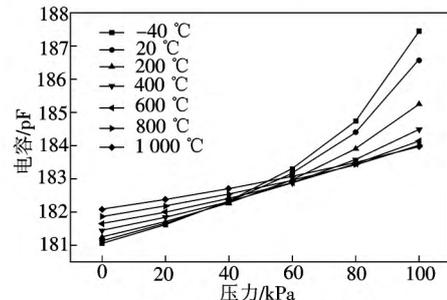
结合电学特性的仿真及 SiC 微工艺现状完成了敏感芯片的初步优化,但对于高温传感器,温度对敏感性芯片的初始电容、灵敏度、应力分布、感压膜的挠度有较大的影响,需要研究敏感芯片的机械特性,确定优化参数的合理性.单独研究敏感芯片的热应力意义不大,一种典型的热应力隔离封装设计(1/4部分)如图6(a)所示.基于该种封装,利用 Comsol 的机电、热应力模块耦合仿真研究 -40 ~ 1 000 °C 下敏感芯片的热应力分布、敏感芯片的 P-C 特性曲线.由于 Comsol 不支持半导体 C-V 特性仿真,根据 Silvaco 仿真结果, SiC 结构的电容值远大于 SiO<sub>2</sub> 及真空形成的电容, SiC 材料的相对介电常数可认为趋于无穷大,实际仿真时设定为 10<sup>4</sup>.

不同温度下敏感芯片的 P-C 曲线如图6(b)所示,仿真结果是传感器的灵敏度随温度升高而降低, -40 °C 时敏感芯片满量的电容变化为 6.37 pF,而 1 000 °C 满量变化减小到 1.89 pF,灵敏度的减小主要是由热应力引起的;不同温度的 P-C 曲线存在交点则表明温度升高,热应力引起感压膜凹形形变.另外,常温时敏感芯片的电容为 181.15 pF,与 Silvaco 仿真结果基本一致, SiC 结构的等效处理方式是合理的. 1 000 °C 下, 100 kPa 时芯片的应力云图如图6(c)所示,应力最大为 3.2 MPa,远小于 SiC 的屈服强度. -40 °C 时传感器的灵敏度最大,表明 -40 °C 时感压膜的形变量最大,图6(d)为 -40 °C、100 kPa 时膜片的挠度分布,最大挠度为 7.42 μm,小于 8 μm 的腔体深度,因此测压过程不会发生贴合.

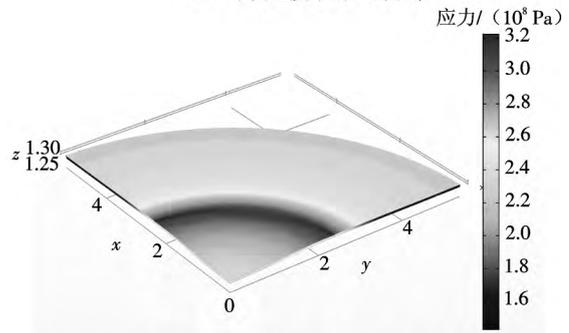
综合敏感芯片的电性、机械特性的仿真结果以及 SiC 微工艺现状给出优化的结构参数如表3所示,其他参数遵循表1.在此参数下敏感芯片常温下的 Q 值约为 13.66, 0 Pa 时的谐振频率为 10.84 MHz, 满量



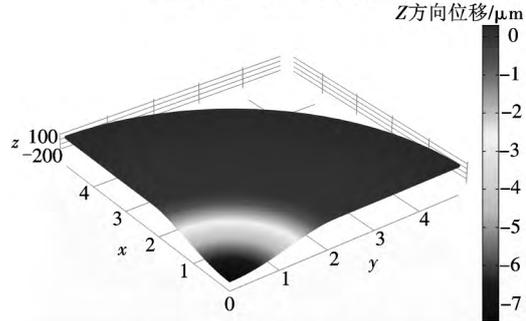
(a) 低应力封装结构



(b) 不同温度下的 P-C 曲线



(c) 1 000 °C, 100 kPa 下感压膜应力云图



(d) -40 °C, 100 kPa 下感压膜挠度分布

图6 机电特性的仿真模型及仿真结果

Fig.6 Simulation model and result of electromechanical characteristics

频率变化为 158.62 kHz; 1 000 °C 下的 Q 值为 3.65, 0 Pa 时的谐振频率为 10.81 MHz, 满量变化 55.53 kHz. 文献 [10] 中的敏感芯片常温 Q 值约为 9.17, 1 000 °C 下的 Q 值约为 3.5, 因此本方案可以实现高温压力测量.

表3 优化后的结构参数

Tab. 3 Optimized structure parameters

参数	数值	参数	数值
绝压腔半径/mm	2.2	绝压腔深度/ $\mu\text{m}$	8
线圈匝数	10	线圈外径/mm	10.9
线圈线宽/ $\mu\text{m}$	250	线圈匝间距/ $\mu\text{m}$	50
感压膜厚度/ $\mu\text{m}$	50	外腔锚点面积/ $\text{mm}^2$	1

### 3 实现方法

上述优化结构可通过现有 SiC 的微工艺实现,一套完整的敏感芯片制备流程如图 7 所示,主要包括: SiC 片标准清洗, ICP 刻蚀绝压腔, SiC-SiC 键合, 感压膜研磨抛光, 制备欧姆接触、电镀 Pt 电感等步骤。需要指出的是,由于 Pt 的厚度较大,为减小对感压膜形变的影响,电镀区域应不包含电容电极。

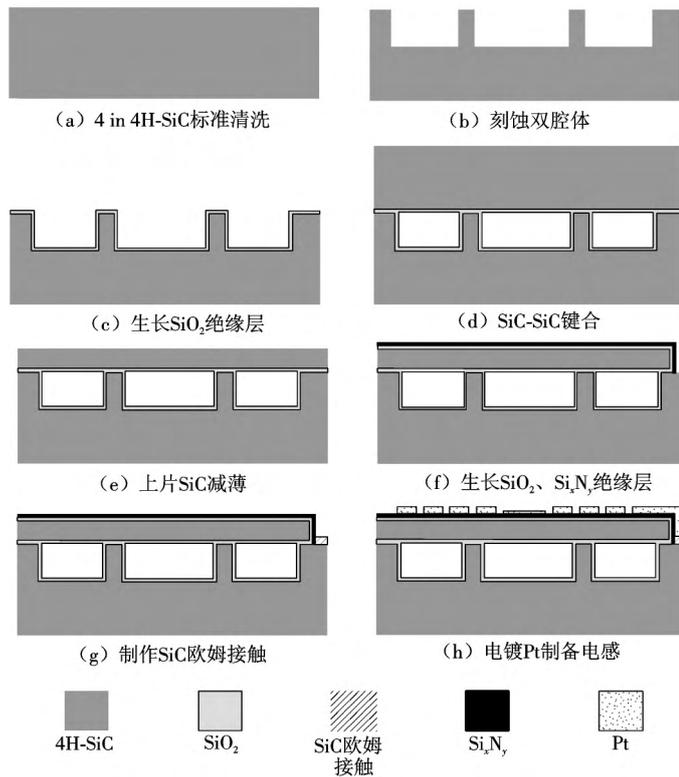


图7 敏感芯片制备流程

Fig. 7 Fabrication process of sensitive chips

### 4 结 语

本文提出一种基于全 4H-SiC 的 LC 谐振式无线压力敏感芯片,分析了敏感芯片的测压原理。在现有的 SiC 微工艺基础上,利用数值仿真软件 Silvaco 及 Comsol Multiphysics 对敏感芯片几何结构进行了仿真优

化,分析了电感内置、外置两种设计的本体电容,并在此基础上设计了一种双腔体的感压结构,将敏感芯片的本体电容值降低至 179.66 pF。优化后敏感芯片常温下的  $Q$  值为 13.66,  $10^6$  Pa 时的谐振频率为 10.84 MHz,满量频率变化为 158.62 kHz;  $1000^\circ\text{C}$  下的  $Q$  值为 3.65,  $10^6$  Pa 时的谐振频率为 10.81 MHz,满量变化 55.53 kHz,满足高温测压需求。利用 TCAD 软件分析 MEMS 结构分布电容的方法可广泛用于各种电容原理传感器分布电容的计算;设计的基于全 SiC 的 LC 谐振压力敏感芯片具有热应力小、真空度高、气密性好等优点,可应用于超高温压力传感器的研制,实现超高温环境下压力的原位测量,为我国自主研制航空发动机、高超发动机、重型燃气轮机等先进能源动力系统提供支撑。

### 参考文献:

- [1] 王振华,王亮. 航空发动机试验测试技术发展探讨[J]. 航空发动机, 2014, 40(6): 47-51.  
Wang Zhenhua, Wang Liang. Development of aeroengine testing measurement technology [J]. *Aeroengine*, 2014, 40(6): 47-51 (in Chinese).
- [2] Sturesson P, Khaji Z, Knaust S, et al. Thermomechanical properties and performance of ceramic resonators for wireless pressure reading at high temperatures [J]. *Journal of Micro-mechanics and Microengineering*, 2015, 25(9): 095016-1-10.
- [3] 付镇柏,蒋洪德,张珊珊,等. G/H 级燃气轮机燃烧室技术研发的分析与思考[J]. 燃气轮机技术, 2015, 28(4): 1-9, 21.  
Fu Zhenbo, Jiang Hongde, Zhang Shanshan, et al. Analysis and deliberation upon combustor technology development for the G/H class gas turbine [J]. *Gas Turbine Technology*, 2015, 28(4): 1-9, 21 (in Chinese).
- [4] Pakmehr M, Moslehi B, Costa J, et al. A review of fiber optic technology for turbine engine instrumentation channel: Control, PHM, and test cell applications [C] // 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. Cleveland, OH, USA, 2014: 1-17.
- [5] 丁军威,周黎辉,杨庆,等. 中国发电行业温室气体减排技术及潜力分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 14-18.  
Ding Junwei, Zhou Lihui, Yang Qing, et al. Greenhouse gas emission technique and potential reduction capacity in China's power generation industry [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(17): 14-18 (in Chinese).
- [6] 廖夏伟,计军平,马晓明. 2020 年中国发电行业碳减排目标规划相符性分析[J]. 中国环境科学, 2013, 33(3): 553-559.

- Liao Xiawei, Ji Junping, Ma Xiaoming. Consistency analysis between technology plans and reduction target on CO<sub>2</sub> emissions from China's power sector in 2020 [J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(3): 553-559 (in Chinese).
- [7] 张健, 王军波, 陈德勇, 等. 一种谐振式 MEMS 压力传感器单芯片级真空封装和低应力组装方法 [J]. *纳米技术与精密工程*, 2013, 11(6): 492-496.  
Zhang Jian, Wang Junbo, Chen Deyong, et al. A single-chip vacuum package and low-stress assembling method for resonant MEMS pressure sensor [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2013, 11(6): 492-496 (in Chinese).
- [8] 庞天照, 严子林, 唐飞, 等. 碳化硅高温压力传感器的研究进展与展望 [J]. *噪声与振动控制*, 2011, 31(1): 170-174.  
Pang Tianzhao, Yan Zilin, Tang Fei, et al. Recent development and future perspective of silicon carbide high-temperature pressure sensor [J]. *Noise and Vibration Control*, 2011, 31(1): 170-174 (in Chinese).
- [9] 潘牧, 南策文. 碳化硅 (SiC) 基材料的高温氧化和腐蚀 [J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2000, 12(2): 109-120.  
Pan Mu, Nan Cewen. High temperature oxidation and corrosion of SiC based materials [J]. *Corrosion Science and Protection Technology*, 2000, 12(2): 109-120 (in Chinese).
- [10] Riza N A, Ghauri F, Perez F. Wireless pressure sensor using laser targeting of silicon carbide [J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(1): 14401-1-9.
- [11] Micro Electro Mechanical Systems Packing Technique and Chip Fabrication Method Development for High-Temperature, Harsh-Environment Silicon-Carbide Pressure Sensor [EB/OL]. <http://www.grc.nasa.gov/www/SiC/>, 2007-12-13.
- [12] Li C, Mehregany M. A silicon carbide capacitive pressure sensor for in-cylinder pressure measurement [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2008, 145/146: 2-8.
- [13] Pisano A P. Harsh Environment Sensor Cluster for Energy and Environment [EB/OL]. [http://jacobschool.ucsd.edu/about/-about\\_leadership/leadership\\_dean/docs/HarshEnvironSensor.pdf](http://jacobschool.ucsd.edu/about/-about_leadership/leadership_dean/docs/HarshEnvironSensor.pdf) 2008.
- [14] 曹正威, 尹玉刚, 许姣, 等. 4H-SiC MEMS 高温电容式压力敏感元件设计 [J]. *纳米技术与精密工程*, 2015, 13(3): 179-185.  
Cao Zhengwei, Yin Yugang, Xu Jiao, et al. Design of MEMS high-temperature capacitance pressure sensor based on 4H-SiC [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2015, 13(3): 179-185 (in Chinese).
- [15] 李赛男, 梁庭, 喻兰芳, 等. SiC 高温压力传感器电容芯片设计与仿真 [J]. *仪表技术与传感器*, 2015(3): 7-9.  
Li Sainan, Liang Ting, Yu Lanfang, et al. Design and simulation analysis of SiC high temperature pressure sensor capacitance chip [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2015(3): 7-9 (in Chinese).
- [16] 何洪涛, 王伟忠, 杜少博, 等. 一种新型 MEMS 压阻式 SiC 高温压力传感器 [J]. *微纳电子技术*, 2015, 52(4): 232-239.  
He Hongtao, Wang Weizhong, Du Shaobo, et al. A novel MEMS piezoresistivity SiC high temperature pressure sensor [J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2015, 52(4): 232-239 (in Chinese).
- [17] Fonseca M A, English J M, von Arx M, et al. Wireless micro-machined ceramic pressure sensor for high-temperature applications [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2002, 11(4): 337-343.
- [18] Radosavljevic G J, Zivanov L D, Smetana W, et al. A wireless embedded resonant pressure sensor fabricated in the standard LTCC technology [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2009, 9(12): 1956-1962.
- [19] Xiong J J, Zheng S J, Hong Y P, et al. Measurement of wireless pressure sensors fabricated in high temperature co-fire ceramic MEMS technology [J]. *Journal of Zhejiang University-Science C: Computers & Electronics*, 2013, 14(4): 258-263.
- [20] Zhang H X, Hong Y P, Liang T, et al. Phase interrogation used for wireless passive pressure sensor in an 800 °C high temperature environment [J]. *Sensors*, 2015, 15(2): 2548-2564.
- [21] Stureson P, Khaji Z, Knaust S, et al. Thermomechanical properties and performance of ceramic resonators for wireless pressure reading at high temperatures [J]. *Journal of Micro-mechanics and Microengineering*, 2015, 25(9): 095016.
- [22] Cheng H, Shao G, Ebadi S, et al. Evanescent-mode-resonator-based and antenna-integrated wireless passive pressure sensors for harsh environment applications [J]. *Sensors Actuators A: Physical*, 2015, 220: 22-33.
- [23] 王健. 感应测井趋肤效应研究 [D]. 长春: 吉林大学地球探测科学与技术学院, 2010.  
Wang Jian. Research on Skin Effect of Induction Logging [D]. Changchun: Academic of Geo-Exploration Science and Technology, Jilin University, 2010 (in Chinese).
- [24] 葛冰儿, 梁庭, 洪应平, 等. 非接触无源压力传感器信号检测系统的耦合特性研究 [J]. *科学技术与工程*, 2013, 13(24): 7045-7049.  
Ge Binger, Liang Ting, Hong Yingping, et al. Research on coupling characteristics of contactless passive pressure sensor signal detection system [J]. *Science Technology and Engineering*, 2013, 13(24): 7045-7049 (in Chinese).

(责任编辑: 何静菁)