

# 光热激励硅微谐振式压力传感器敏感结构热梯度分布研究

王海榕, 王亿文, 史慧超\*

北京化工大学信息科学与技术学院, 北京

收稿日期: 2023年11月12日; 录用日期: 2023年12月13日; 发布日期: 2023年12月20日

## 摘要

本文以硅谐振式压力传感器为研究对象,建立了光热激励硅谐振敏感结构的有限元分析模型,通过ANSYS仿真分析研究了硅谐振敏感结构光热激励方式的动态热分布,揭示了光热激励产生的热量在谐振梁厚度方向激励振动的原因,仿真分析获得了光热激励产生的交流热分量在谐振梁不同方向上的温度梯度分布,为光热激励谐振梁敏感结构设计优化提供了参考。

## 关键词

压力传感器, 谐振梁, 光热激励, 温度梯度

## Research on Thermal Gradient Distribution of Sensitive Structure of Photothermal Excited Silicon Microresonant Pressure Sensor

Hairong Wang, Yiwen Wang, Huichao Shi\*

School of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing

Received: Nov. 12<sup>th</sup>, 2023; accepted: Dec. 13<sup>th</sup>, 2023; published: Dec. 20<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

This paper takes the silicon resonant pressure sensor as the research object, establishes a finite

\*通讯作者。

element analysis model of the photothermal excitation of the silicon resonance sensitive structure, and studies the dynamic heat distribution of the photothermal excitation of the silicon resonance sensitive structure through ANSYS simulation analysis, revealing the optical the reason why the heat generated by thermal excitation excites vibration in the thickness direction of the resonant beam. The simulation analysis obtained the temperature gradient distribution of the AC heat component generated by photothermal excitation in different directions of the resonant beam, which provides information for the design and optimization of sensitive structures of photothermal excitation resonant beams.

## Keywords

Pressure Sensor, Resonant Beam, Photothermal Excitation, Temperature Gradient

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

谐振式压力传感器是将压力变化转换为频率信号，利用谐振频率的变化实现压力测量[1]。当传感器受到压力作用时，敏感结构形变导致谐振元件的固有频率发生变化，通过测量谐振频率变化值可以获得压力数值。谐振式压力传感器具有优良的重复性、稳定性以及较高的分辨率，被广泛应用于航空航天、汽车、微电子等方面[2] [3]。

目前国内外对于谐振式压力传感器的研究主要集中在材料和结构两方面。在材料方面，硅基谐振式压力传感器的相关研究已经较为成熟，以石墨烯为代表的二维材料谐振式压力传感器的相关研究已处于起步阶段。由于材料本身物理特性的限制，硅基谐振式压力传感器的灵敏度等指标已经基本达到上限，使其难以应用于超低压环境。由于物理性质的不同，石墨烯基谐振式压力传感器的灵敏度指标远超硅基传感器，但受尚不成熟的制造工艺和测试手段的限制，其精度、稳定性和重复性等指标都较低[4] [5] [6]。在结构方面，谐振式压力传感器主要有谐振弦式、谐振筒式、谐振膜式以及谐振梁式几种结构。前三种结构由于均用金属材料做振动敏感元件，其材料性能的老化和蠕变都可能造成频率漂移，而且易受电磁场的干扰和环境振动的影响。而谐振梁式敏感结构的机械品质因数非常高，用其做成的传感器精度和稳定性均很好，且动态相应较好[7] [8] [9] [10]。

由谐振式传感器的工作原理可知，需要使其进入谐振状态。常用的激励/检测方法有静电激励/电容检测、光热激励/光学检测、电热激励/压阻检测、压电激励/压电检测和电磁激励/电磁检测 5 种。传统的振筒式和谐振膜式压力传感器多采用电磁激励的方法，而制作谐振梁式传感器的硅等材料自身不具有磁性，因此多采用电热激励和光热激励两种方法来使谐振梁起振[11] [12] [13]。本文选用硅谐振式压力传感器为研究对象，研究了光热激励产生的交流热分量在谐振梁不同方向上的温度梯度分布。

## 2. 工作原理

光热激励谐振梁式压力传感器，光热激励的基本工作原理是通过交变温度场在结构内产生交变热应力来驱动谐振梁的振动[14]。激励光照射在谐振梁上时，产生交流热源的热量在谐振梁内部以温度波的形式传播[15]。由于梁的厚度相对于其长度和宽度而言非常小，因此在任意时刻绝大部分交流热量沿厚度方向进行传播。当温度波的穿透距离远大于梁的厚度时(热薄梁)，热量可以传递至梁的底部，且温度波的波

动幅度衰减较小，可近似认为梁厚度方向上温度均匀分布；相反地，当温度波的穿透距离远小于梁的厚度时(热厚梁)，此时温度波动仅限于穿透深度内，梁底部温度波动幅度为0，温度不随时间而变化。

### 3. 有限元仿真

#### 3.1. 有限元模型建立

根据实际工程需求，本文研究对象光热激励谐振梁式压力传感器的硅谐振敏感结构示意图如图1所示。

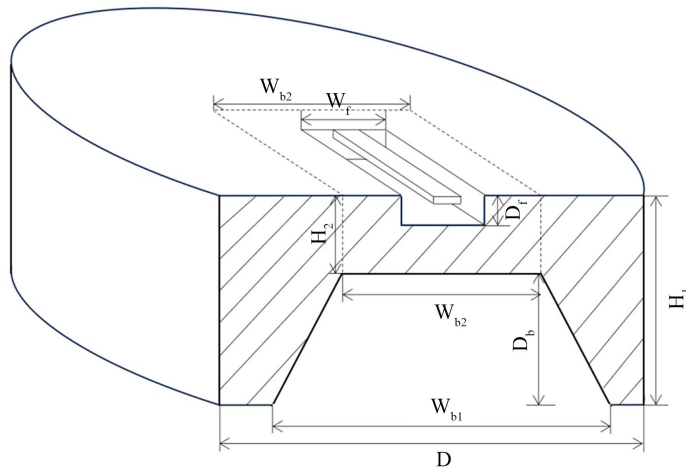


Figure 1. Schematic cross-section of silicon resonance sensitive structure  
图1. 硅谐振敏感结构截面示意图

为了验证该尺寸下的梁为热薄梁，对梁的厚度方向进行动态热梯度分析。使用 ANSYS 有限元仿真分析软件对谐振梁进行瞬态热分析，分析谐振梁厚度不同位置热梯度分布。此外，通过有限元仿真分析也研究了在梁得宽度方向以及长度方向上的动态热温度分布。

首先使用 ANSYS 建立分析模型，选用瞬态热模块进行仿真计算，创建材料分配、网格加密。根据全局坐标系以及谐振敏感结构几何模型的尺寸算出谐振梁光热激励光斑的位置，并设置为新建坐标系的坐标原点，在瞬态热模块的求解栏插入温度探针，并将探针检测的定位设置为新建坐标系的坐标原点，此后改变新建坐标系的坐标原点即可改变温度探针的检测位置。

#### 3.2. 厚度方向热梯度仿真

分析硅谐振敏感结构动态热梯度，需要分析沿谐振梁厚度方向上同一时间不同位置的温度变化。设置交流激励为  $1.5E+11 \text{ W/m}^3$ ，将温度探针分别放置在沿谐振梁厚度方向， $0\sim 15 \mu\text{m}$ ，以  $1 \mu\text{m}$  为步长的位置，记录每一位置  $30 \mu\text{s}\sim 60 \mu\text{s}$  内温度的变化情况。

#### 3.3. 宽度方向热梯度仿真

在激励光斑附近提取沿谐振梁宽度方向上同一时间不同位置的温度变化。设置交流激励为  $1.5E+11 \text{ W/m}^3$ ，将温度探针分别放置在沿谐振梁长度方向， $0\sim 90 \mu\text{m}$ ，以  $10 \mu\text{m}$  为步长，记录每一位置  $30 \mu\text{s}\sim 60 \mu\text{s}$  内温度的变化情况。

#### 3.4. 长度方向热梯度仿真

在激励光斑附近提取沿谐振梁长度方向上同一时间不同位置的温度变化。设置交流激励为  $1.5E+11$

$W/m^3$ ，将温度探针分别放置在沿谐振梁长度方向，0~1500  $\mu m$ ，分别以 50  $\mu m$ 、100  $\mu m$  为步长，记录每一位置 30  $\mu s$ ~60  $\mu s$  内温度的变化情况。

提取谐振梁的有限元模型，单梁不同方向的温度分布云图如图 2 所示。

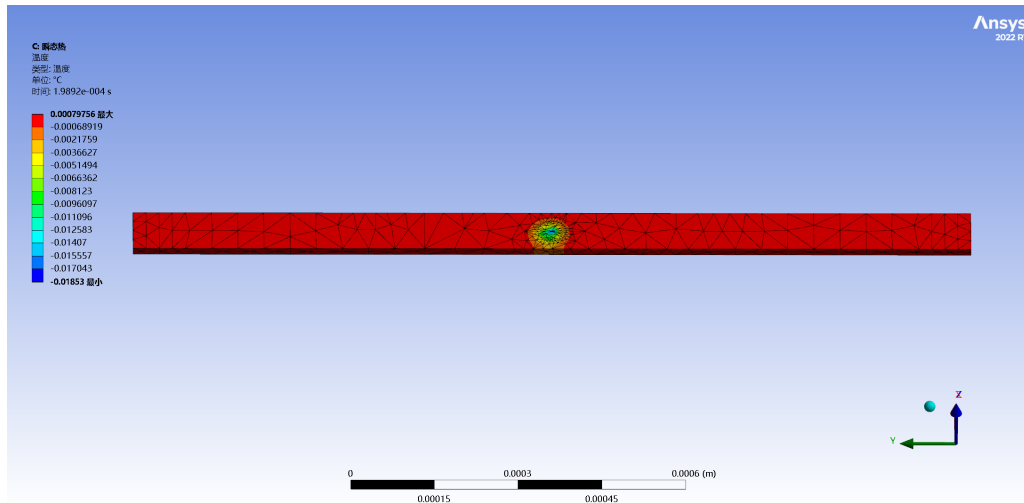


Figure 2. Temperature distribution cloud diagram of the finite element model of the resonant beam  
图 2. 谐振梁有限元模型温度分布云图

## 4. 结果分析

### 4.1. 厚度方向热梯度仿真

将沿厚度方向上不同点的温度变化曲线整合为三维温度分布图，如图 3 所示。由图 3 可知，同一时间下沿厚度方向上不同点的温度差可以忽略不计，换言之，沿厚度方向上不同点在同一时间的温度分布近似相同。

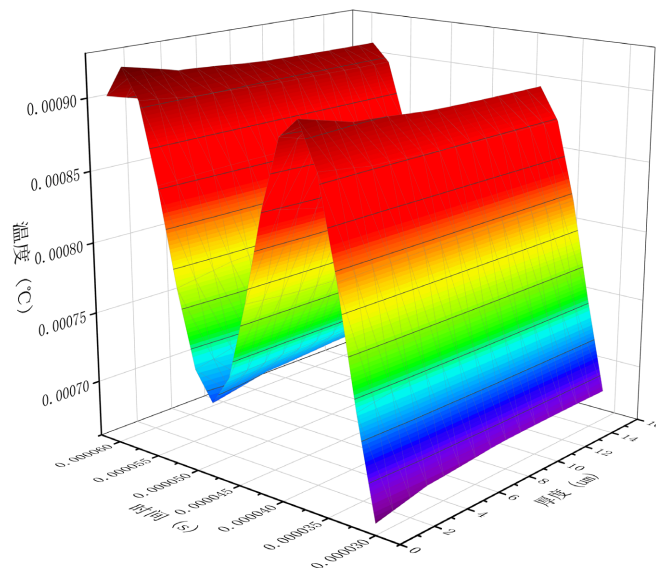


Figure 3. Temperature thermal gradient distribution diagram in the thickness direction  
图 3. 厚度方向温度热梯度分布图

#### 4.2. 宽度方向热梯度仿真

将沿宽度方向上不同点的温度变化曲线整合为三维温度分布图，如图 4 所示。由图 4 可知，热量沿宽度方向的传播较为有限，沿宽度方向距离光斑越远，温度变化越小。

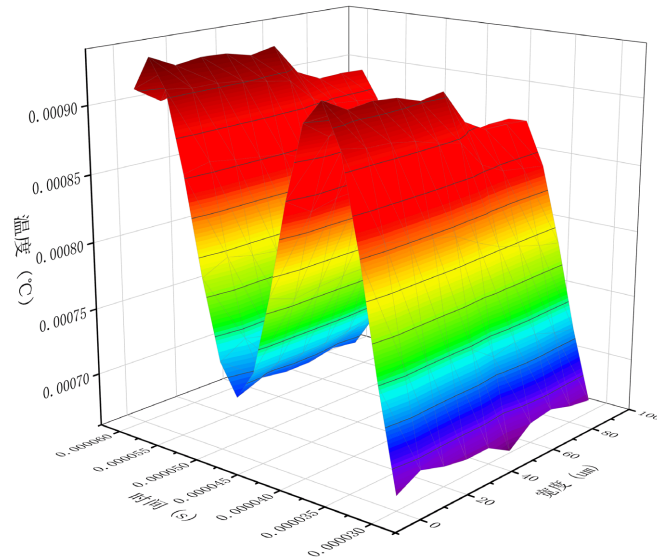


Figure 4. Temperature thermal gradient distribution diagram in the width direction  
图 4. 宽度方向温度热梯度分布图

#### 4.3. 长度方向热梯度仿真

将沿长度方向上不同点的温度变化曲线整合为三维温度分布图，如图 5 所示。由图 5 可知，热量沿长度方向的传播同样较为有限且温度波的穿透距离小于梁的长度，在激励光斑附近沿长度方向距离光斑越远，温度变化越小，当超过温度波的穿透距离时，梁的温度变化为零。

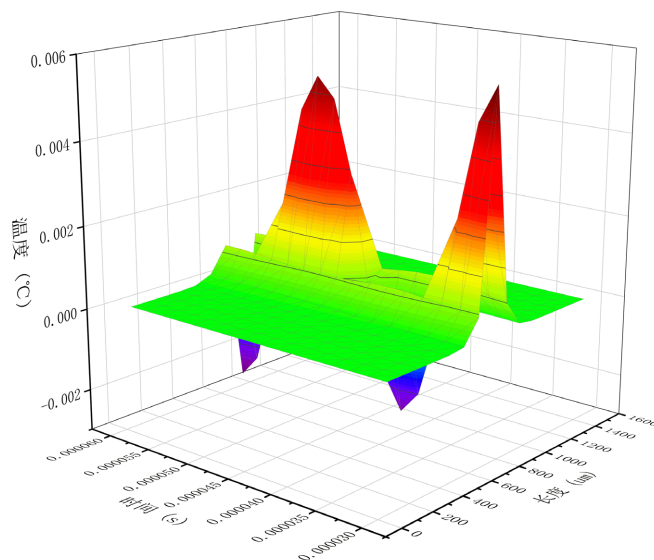


Figure 5. 长度方向温度热梯度分布图  
图 5. Temperature thermal gradient distribution diagram along the length direction

通过光热激励产生的交变热量沿不同方向的分布分析,可以发现光热激励所产生的绝大部交流分热量沿梁的厚度方向传播,而沿长度方向和宽度方向上热量传播较为有限。因此,光热激励产生的热温度梯度主要激励谐振梁沿厚度方向振动,沿长度方向和宽度方向的振动可忽略不计。

## 5. 结论

本文以硅谐振式压力传感器为研究对象,建立了光热激励硅谐振敏感结构的有限元分析模型,通过ANSYS 仿真分析研究了硅谐振敏感结构光热激励方式的动态热分布。仿真分析结果发现光热激励温度波的穿透距离远大于梁厚度,谐振梁为热薄梁;光热激励所产生的绝大部交流分热量沿梁的厚度方向传播,沿厚度方向上不同位置在同一时间的温度分布近似相同,而沿长度方向和宽度方向上热量传播较为有限,沿长度方向和宽度方向不同点在同一时间内温度分布并不相同。光热激励产生的热温度梯度主要激励谐振梁沿厚度方向振动,沿长度方向和宽度方向的振动可忽略不计。通过有限元分析获得的光热激励产生的交流分热量在谐振梁不同方向上的温度梯度分布,为光热激励谐振梁敏感结构设计优化提供了参考。

## 参考文献

- [1] 樊尚春. 传感器技术及应用[M]. 第3版. 北京: 北京航空航天大学, 2010.
- [2] 白韶红. 谐振式传感器的发展[J]. 工业仪表与自动化装置, 1988(4): 18-23+39.
- [3] 平文. MEMS 硅谐振式压力传感器设计[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- [4] 刘冠军, 徐方松, 刘瑛, 等. 硅基与石墨烯基谐振式压力传感器研究进展[J]. 测控技术, 2021, 40(11): 1-10. <https://doi.org/10.19708/j.ckjs.2021.04.227>
- [5] 平文, 孔德义, 单建华. 硅谐振式压力传感器敏感结构设计及仿真[J]. 仪表技术与传感器, 2017(3): 1-4+8.
- [6] 苑伟政, 任森, 邓进军, 等. 硅微机械谐振压力传感器技术发展[J]. 机械工程学报, 2013, 49(20): 2-9.
- [7] 邹梦启, 邢维巍, 韦祎. 谐振式压力传感器温度补偿结构的仿真研究[J]. 电子测量技术, 2019, 42(9): 74-79. <https://doi.org/10.19651/j.cnki.emt.1802371>
- [8] 陈德勇. 微机械谐振梁压力传感器研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院研究生院(电子学研究所), 2002.
- [9] 刘广玉, 编著. 微传感器设计、制造与应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008.
- [10] 叶俊, 吴宏熊, 叶晓伟. 硅微机械谐振压力传感器技术的发展[J]. 电子技术与软件工程, 2017(6): 102.
- [11] 丁天怀, 李源, 冯冠平. 硅谐振式传感器研制中的关键技术[J]. 仪器仪表学报, 1996(S1): 59-64. <https://doi.org/10.19650/j.cnki.cjsi.1996.s1.012>
- [12] 张少君, 赵小强, 刘月明. 硅微机械悬臂梁谐振器的电热激励及光纤拾振技术的研究[J]. 西安理工大学学报, 2005(2): 188-191. <https://doi.org/10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2005.02.018>
- [13] 曹乐, 樊尚春, 邢维巍. MEMS 压力传感器原理及其应用[J]. 计测技术, 2012, 32(S1): 108-110.
- [14] Zhao, L.B., Han, X.G., Mao, Q., et al. (2021) Temperature-Insensitive Silicon Resonant Pressure Sensor by Thermal Stress Control. *Sensors and Actuators A: Physical*, 322, Article ID: 112612. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112612>
- [15] 吴浩扬, 李炳乾, 朱长纯, 等. 光激、光拾硅微机械谐振传感器的进展[J]. 半导体光电, 1999(1): 7-10. <https://doi.org/10.16818/j.issn1001-5868.1999.01.002>