

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.04.006

# MEMS 传感器异质材料键合界面的可靠性分析

袁 婷, 许高斌, 关存贺, 马渊明, 冯建国

(合肥工业大学 微电子学院, 安徽 合肥 230601)

**摘 要:**微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)传感器的制备会涉及多种材料的键合, 键合过程中不同材料之间由于热膨胀系数不同而产生各种内部应力, 当应力大于键合强度时, 材料分层从而导致器件失效。为了明确异质材料间微观应力对器件可靠性的影响, 文章考虑材料的热膨胀系数和温度影响下的杨氏模量, 利用 COMSOL 仿真获得的应力数据建立异质材料间的键合界面应力在不同温度、热膨胀系数和杨氏模量 3 种因素共同影响下的理论数学模型; 并针对 MEMS 传感器中的硅-玻璃键合界面, 基于相关键合强度数据, 结合蒙特卡洛方法和应力强度干涉模型计算得到异质材料键合界面的可靠度。结果显示, 异质材料键合界面的可靠度为 0.992 108, 表明在服从韦布尔分布下的温度产生的应力不足以引起材料失效, 此时器件的稳定性和可靠性较高, 验证了所建模型的正确性和实用性, 实现了对 MEMS 传感器退化行为的建模及预测。

**关键词:**微机电系统(MEMS)传感器; 异质材料; 键合界面; 热应力; 可靠性

中图分类号: TN406

文献标志码: A

文章编号: 1003-5060(2025)04-0469-06

## Reliability analysis of heterogeneous material bonding interfaces in MEMS sensors

YUAN Ting, XU Gaobin, GUAN Cunhe, MA Yuanming, FENG Jianguo

(School of Microelectronics, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

**Abstract:** The fabrication of micro-electro-mechanical system (MEMS) sensors typically involves the combination of multiple materials, which leads to various internal stresses due to the differences in coefficients of thermal expansion during the bonding process. When the stress exceeds the bonding strength, material delamination occurs, resulting in device failure. To characterize the impact of microscale stresses between heterogeneous materials on device reliability, this study considered the effect of temperature on the coefficients of thermal expansion and Young's modulus of materials, and established a theoretical model for bonding interface stresses between heterogeneous materials with combined effects of different temperatures, coefficients of thermal expansion, and Young's modulus using stress data obtained through COMSOL simulation. Relevant strength data for the silicon-glass bonding interface in MEMS sensors was collected, and the reliability of the bonding interface of heterogeneous materials was calculated using Monte Carlo simulation and stress intensity interference models. The results show that the reliability of the bonding interface of heterogeneous materials is 0.992 108, indicating that the stress generated under Weibull distribution of temperature is insufficient to cause material failure. The device exhibits high stability and reliability, which validates the correctness and practicality of the established model, and enables the modeling and prediction of the degradation behavior of MEMS sensors.

**Key words:** micro-electro-mechanical system (MEMS) sensor; heterogeneous material; bonding interface; thermal stress; reliability

收稿日期: 2023-04-12; 修回日期: 2023-05-11

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2020YFB2008901); 安徽省发改委研发创新资助项目(JZ2021AFKJ0050)

作者简介: 袁 婷(1995—), 女, 安徽安庆人, 合肥工业大学硕士生;

许高斌(1970—), 男, 安徽合肥人, 博士, 合肥工业大学教授, 博士生导师, 通信作者, E-mail: gbxu@hfut.edu.cn.

封装是制造微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)器件的关键环节,因为封装结构可以保护 MEMS 器件的微机械结构和电路等敏感部件免受电磁和化学应力等外界影响。封装材料的失效可能会导致器件性能的下降,因此 MEMS 器件的可靠性与封装的质量密切相关。封装都会涉及到不同材料的键合,如硅、二氧化硅、氮化硅、氮化铝以及各种金属和封装材料等<sup>[1]</sup>,在加工的过程中,不同材料之间将会由于热膨胀系数及晶格的失配而产生各种内部应力,而 MEMS 传感器的性能很容易受到机械应力的影响而发生漂移。

上述机械应力不仅会对其相邻结构产生影响,也会在各种环境(如温度)应力下不断发生演变,因此,明确异质材料间微观应力的产生、演变及传递过程的规律对于提高微纳传感器的长期稳定性、材料及工艺的优化、实验评价方法的制定都具有重要意义。文献[2]提出一种弹性变形模型用于描述晶片的键合过程,由该模型可知键合界面处存在最大的应力,其值大小取决于材料的杨氏模量和硅片的厚度;文献[3]采用阳极键合技术分别对玻璃与可伐合金、玻璃与铝的连接进行键合实验,并结合有限元仿真软件分析了键合试件冷却过程的应力分布,研究了从 450 °C 冷却到室温时键合试件的翘曲变形量和变形形状、应力和应变分布的规律;文献[4]针对降温后的硅玻璃圆片存在的残余应力,建立了残余应力模型,通过键合实验得出应力大小与玻璃片厚度的关系。

目前国内外相关研究主要集中在对异质材料键合界面的各种应力以及弹性形变的分布规律等方面,对影响异质材料键合界面应力大小的因素研究较为单一,普遍认为材料的杨氏模量和热膨胀系数是不变的,实际上这 2 个物理量是随温度变化进而影响应力大小的;同时,以往应用应力强度干涉模型分析器件的可靠性时认为键合界面强度是不变的,但随着时间的推移,材料会经历老化现象,其力学性能会逐渐降低。因此,这些方法不能准确地预估器件的寿命,目前仍缺乏标准、规范、实用性强的 MEMS 器件可靠性模型与评估方法。

基于以上问题,考虑到材料的热膨胀系数和随温度变化的杨氏模量,本文研究了在温度、热膨胀系数和杨氏模量 3 种因素共同影响下的异质材料间键合界面应力的演变规律。由于键合材料的多样性,本文选取常用的硅-玻璃异质材料,利用

COMSOL 软件仿真获得的应力数据得出应力与温度、热膨胀系数、杨氏模量三者的函数关系,并借助相关实验中的强度数据<sup>[5]</sup>,应用应力强度干涉模型和蒙特卡洛模拟方法计算可靠度,分析 MEMS 器件的可靠性,完成模型验证,实现对 MEMS 传感器退化行为的建模及预测。

## 1 异质材料的几何建模

当物体受到温度变化的影响时,其不同材料之间可能会产生内部应力,这种内部应力称为热应力。在异质材料的键合过程中,由于不同材料具有的热膨胀系数不同,高温状态下材料热胀冷缩,可能会使材料的形状和尺寸发生变化,这种变形在温度降低后会产生热应力,有可能导致材料产生裂纹并损坏<sup>[6]</sup>。因此,在对材料进行键合的过程中需要综合考虑材料的物理参数(热膨胀系数、杨氏模量)、温度等对键合界面应力的影响,以确保键合过程中的稳定性和键合后材料的可靠性。

本文选取典型的石英玻璃和硅作为键合材料,建立的几何模型如图 1 所示。

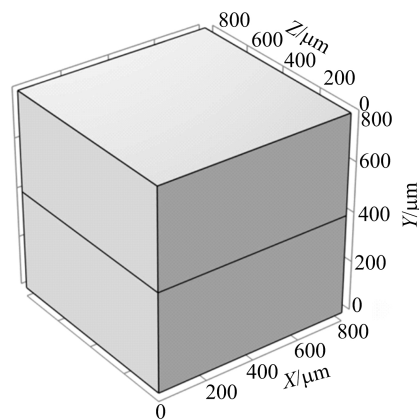


图 1 异质材料的几何模型

首先,设定初始条件和边界条件。为确保模型的稳定性,选择模型中的原点作为固定约束点;设定全局参数杨氏模量  $E_1$ 、 $E_2$ ,热膨胀系数  $C_1$ 、 $C_2$ ,工作温度  $T_0$ ,键合温度  $T_r$ 。

然后,结合 COMSOL 仿真软件对建立的模型进行辅助扫描研究,分析不同的温度、热膨胀系数和杨氏模量对硅-玻璃键合界面等效应力最大值  $\sigma_{\max}$  的影响。

## 2 键合界面应力模型的建立与分析

### 2.1 温度对键合界面应力的影响分析

研究温度对键合界面应力的影响时设定辅助

扫描参数,规定  $T_0$  和  $T_r$  的温度从 240 °C 按 20 °C 的步长升高到 600 °C。

COMSOL 软件中,在线弹性材料选项下新增热膨胀模块,并将温度、体积参考温度选项分别设置为工作温度  $T_0$ 、键合温度  $T_r$ 。设定相关参数

后对模型进行求解,得到不同温度条件下的键合界面等效应力的分布情况,其中等效应力的最大值  $\sigma_{\max}$  由派生值中的表面最大值求出。

不同温度下硅-玻璃键合部分的等效应力分布如图 2 所示。

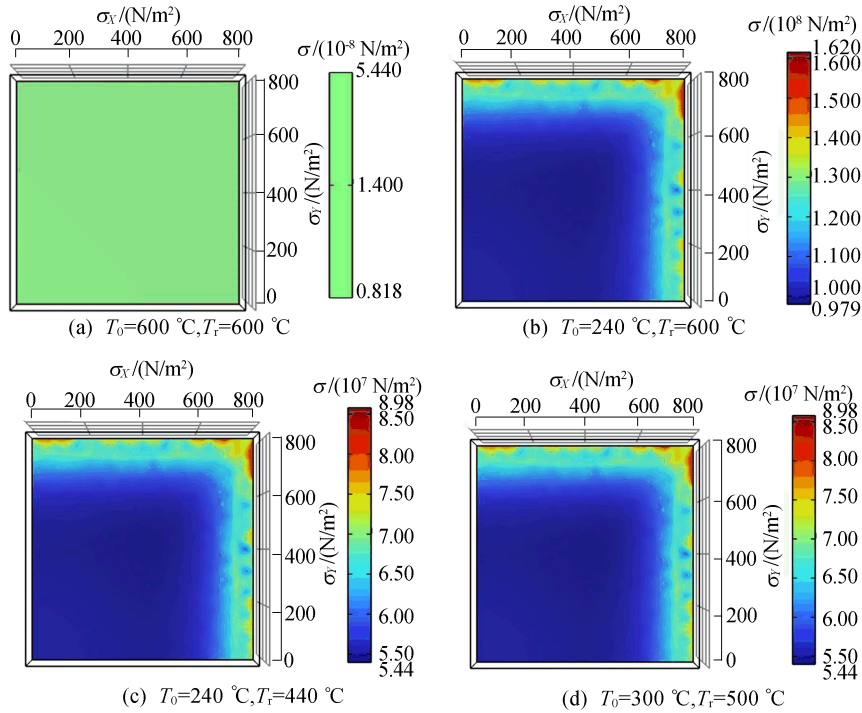


图 2 不同温度下的键合界面等效应力分布图

基于辅助扫描仿真获得 361 组应力数据,利用数据分析与绘图软件 Origin 绘制出等效应力的最大值  $\sigma_{\max}$  与工作温度、键合温度的关系图,如图 3 所示。

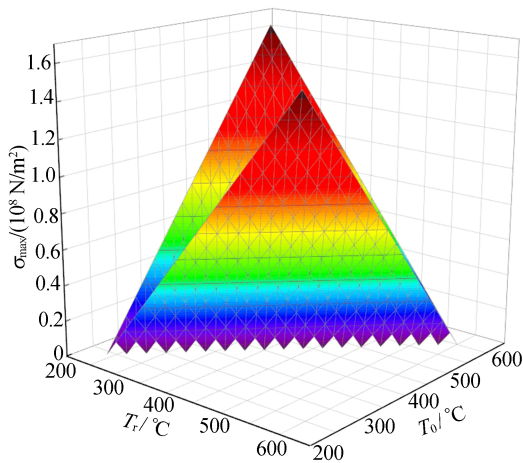


图 3 不同温度下等效应力的最大值分布图

由图 2a~图 2d 的数值变化规律以及图 3 中等效力最大值  $\sigma_{\max}$  的分布情况可知:当工作温

度  $T_0$  与键合温度  $T_r$  大小相等时,键合界面等效应力值几乎等于 0;离固定约束点越远的地方,2 种材料键合界面的等效应力值越大。

从图 3 可以看出:距离左下角固定约束点越远的地方对应的等效应力值也越大(图 3 中的红色区域);当  $T_0$  与  $T_r$  的差值增加时,等效应力的最大值  $\sigma_{\max}$  也相应增加。

因此,等效应力的最大值  $\sigma_{\max}$  与温度差值成正比关系,可以表示为:

$$\sigma_{\max} \propto |T_r - T_0| \quad (1)$$

MEMS 器件实际工作的情况下一般有  $T_r > T_0$ ,则式(1)可以进一步表示为:

$$\sigma_{\max} \propto (T_r - T_0) \quad (2)$$

### 2.2 热膨胀系数对键合界面应力的影响分析

同理,设定辅助扫描参数热膨胀系数  $C_1$  和  $C_2$  从  $2.0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  按  $0.2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  的步长增大到  $6.0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。

将材料属性选项里的热膨胀系数对应改为  $C_1$ 、 $C_2$ ,重新求解得到在不同热膨胀系数下键合界面的等效应力分布,如图 4 所示。

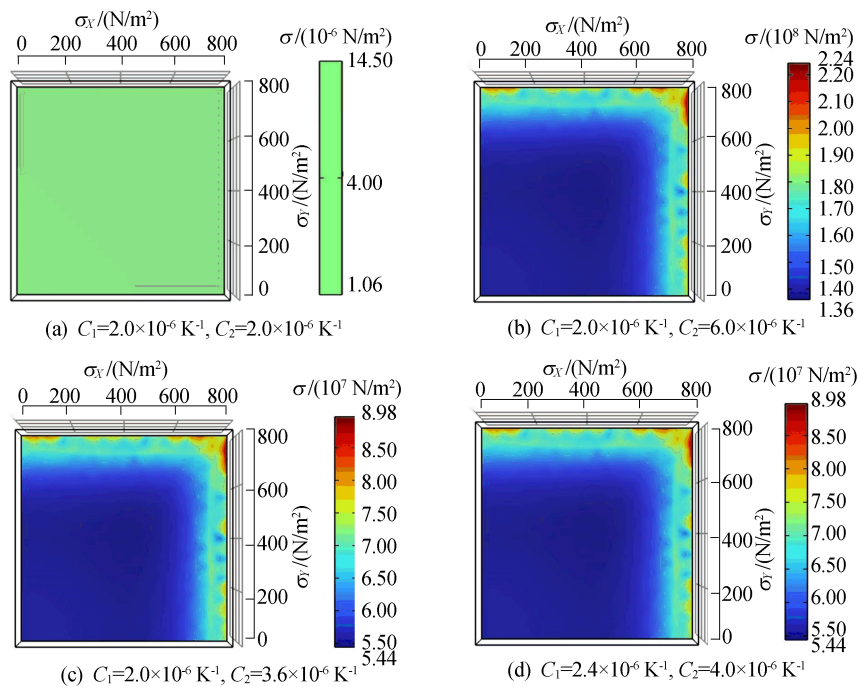


图 4 不同热膨胀系数下的键合界面等效应力分布图

基于辅助扫描仿真获得的 441 组应力数据绘制出等效应力的最大值  $\sigma_{max}$  与热膨胀系数的关系图,如图 5 所示。

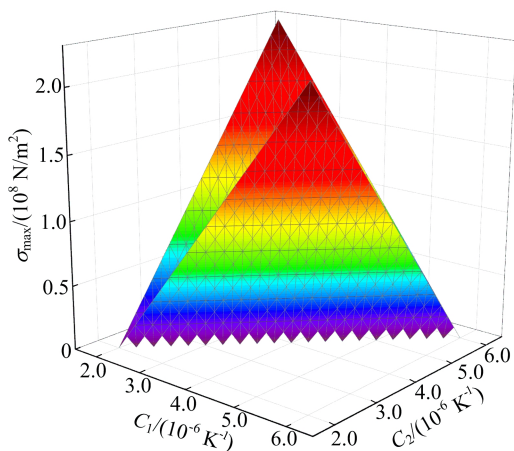


图 5 不同热膨胀系数下等效应力的最大值分布图

从图 4、图 5 可以看出,当 2 种材料的热膨胀系数相等时,键合界面的应力大小几乎等于 0。在热膨胀系数不相等的情况下,键合界面等效应力的最大值  $\sigma_{max}$  会出现在距离固定约束点最远的地方;同时,当 2 种材料的热膨胀系数之差增加时,等效应力的最大值也随之增加。对于不同的材料组合,只要热膨胀系数之差相等,对应的等效应力的最大值  $\sigma_{max}$  也相等。由此可知,等效应力的最大值  $\sigma_{max}$  与热膨胀系数的差值成正比关系,即

$$\sigma_{max} \propto |C_1 - C_2| \quad (3)$$

### 2.3 杨氏模量对键合界面应力的影响分析

设定辅助扫描参数杨氏模量  $E_1$ 、 $E_2$  从  $6 \times 10^{10}$  Pa 按  $1 \times 10^{10}$  Pa 的步长扩大到  $18 \times 10^{10}$  Pa。

设定相关参数后重新求解可以得到键合界面在不同杨氏模量下等效应力的最大值。基于辅助扫描仿真获得的 169 组数据,绘制等效应力的最大值  $\sigma_{max}$  与杨氏模量的关系图,如图 6 所示。

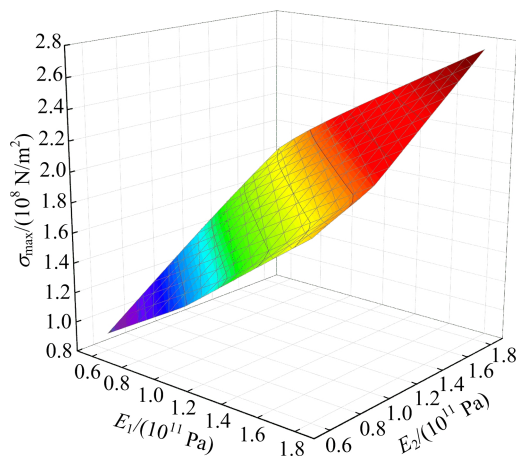


图 6 不同杨氏模量下等效应力的最大值分布图

从图 6 可以看出,键合界面等效应力的最大值  $\sigma_{max}$  会随着材料杨氏模量的增加而增加。与温度、热膨胀系数 2 个因素对比,杨氏模量对于等效应力最大值  $\sigma_{max}$  影响幅度不大,且等效应力最大值  $\sigma_{max}$  与杨氏模量的关系是非线性的。

由于杨氏模量与等效应力的非线性关系,需要对仿真数据进行非线性曲面拟合,通过 Origin 拟合结果得到的计算公式为:

$$\sigma_{\max} = 1.951 \times 10^6 + 1.264 \times 10^{-16} E_1^2 + 5.123 \times 10^{-16} E_2^2 - 4.909 \times 10^{-16} E_1 E_2 + 7.176 \times 10^{-4} E_1 + 7.153 \times 10^{-4} E_2 \quad (4)$$

拟合公式计算值与仿真数据的相对误差如图 7 所示。由图 7 可知,拟合公式计算值与仿真数据之间的最大相对误差小于 0.07%,表明拟合效果较好。

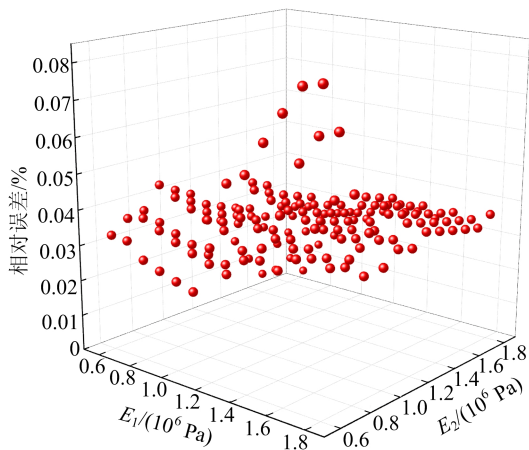


图 7 拟合公式计算值与仿真数据的相对误差

### 2.4 3 种因素共同作用下的应力建模

综合上文对异质材料键合界面应力的影响分析可知,应力的变化受 3 个因素的共同作用。结合式(2)~(4),建立异质材料键合界面等效应力的最大值  $\sigma_{\max}$  与温度、热膨胀系数、杨氏模量三者之间的理论数学模型,即

$$\sigma_{\max} = (T_r - T_0) | C_1 - C_2 | f(E_1, E_2) \quad (5)$$

由式(4)及已定义的参数值可以计算得到:

$$f(E_1, E_2) = 1.350 \times 10^9 + 0.875 \times 10^{-13} E_1^2 + 3.545 \times 10^{-13} E_2^2 - 3.397 \times 10^{-13} E_1 E_2 + 0.496 E_1 + 0.495 E_2 \quad (6)$$

### 3 界面键合强度分布和可靠性分析

1) 参考文献[5]中测得的 MEMS 器件封装工艺中硅-玻璃阳极键合中的强度数据,选取其中 52 个样本数据,采用 K-S 检验法<sup>[7]</sup>判断这些数据是否符合某种理论分布。

不同显著性水平  $\alpha$  对应的临界值  $z$  见表 1 所列。

一般取显著性水平  $\alpha=0.05$ ,此时临界值  $z=0.188 6$ ,计算常见理论分布和文献中实验获得的

键合强度分布的差异最大值  $D$ ,结果见表 2 所列。

表 1 不同显著水平对应的临界值

$\alpha$	0.20	0.15	0.10	0.05	0.01
$z$	0.148 3	0.158 1	0.169 2	0.188 6	0.226 0

表 2 键合强度数据分布与常见理论分布的差异最大值  $D$

分布类型	正态分布	韦布分布	泊松分布	指数分布	瑞利分布
$D$	0.205 6	0.181 3	0.641 2	0.479 9	0.349 8

通过比较  $D$  值与临界值的大小即可判断出数据分布与常见的理论分布是否一致<sup>[8]</sup>。若  $D$  值小于或等于临界值,则认为两者的分布为同一类型。从表 2 可以看出,在显著性水平  $\alpha=0.05$  时,键合强度数据符合韦布尔分布<sup>[9]</sup>。

2) 利用 MATLAB 对获取的数据进行相关参数计算,得到拟合分布的形状参数和尺度参数,分别为  $m=13.991 1 \times 10^7, n=4.695 6$ 。拟合参数可以得到强度分布的概率密度函数和累积分布函数。

3) 基于应力强度干涉模型<sup>[10]</sup>,采用蒙特卡洛模拟方法<sup>[11]</sup>计算异质材料键合界面的可靠度,详细流程如图 8 所示。

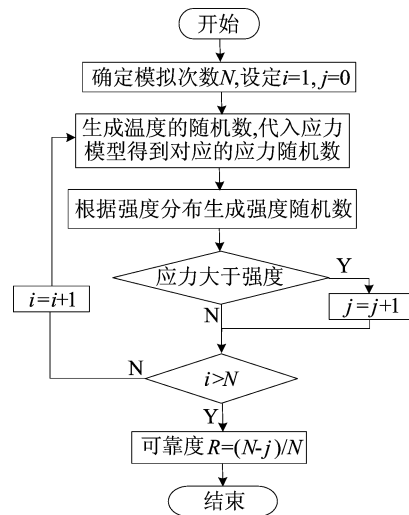


图 8 蒙特卡洛模拟方法计算可靠度流程

查阅资料<sup>[12]</sup>可知,温度服从两参数的韦布尔分布,形状参数  $m=4.237 5$ ,尺度参数  $n=3.252 9$ 。在 MATLAB 中编写程序生成服从韦布尔分布的温度随机数。取键合温度  $T_r=400 \text{ }^\circ\text{C}$ ,硅的热膨胀系数  $C_1=6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ,玻璃的热膨胀系数  $C_2=2.6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ,将参数代入

式(5),当工作温度  $T_0$  变化时,得到键合界面等效应力的最大值  $\sigma_{\max}$  为:

$$\sigma_{\max} = (T_r - T_0) | C_1 - C_2 | f(E_1, E_2) = (673.15 - T_0) \times 4.4783 \times 10^5 \quad (7)$$

将上述 MATLAB 软件中生成的工作温度随机数代入式(7),计算等效应力的最大随机值,同时,根据上文键合强度服从的分布类型,在 MATLAB 中使用 wblrnd 函数生成键合强度的随机数。

基于图 8 所示的模拟流程,利用蒙特卡洛抽样方法,并结合温度分布和键合强度分布的信息、等效应力的最大值  $\sigma_{\max}$  与温度的函数关系,编写相应的程序进行模拟计算。程序进行了  $10^6$  次模拟,其中有 7 982 次模拟中随机生成的应力值大于随机生成的键合强度值。根据模拟结果,计算得到的可靠度为:

$$R = \frac{N-j}{N} = \frac{10^6 - 7\,982}{10^6} = 0.992\,108 \quad (8)$$

其中: $N$  为模拟次数; $j$  为应力值大于键合强度值的次数。

由式(8)可知,异质材料硅-玻璃键合界面的可靠度为 0.992 108,表明在温度服从韦布尔分布的情况下,异质材料界面产生的应力没有引起失效,MEMS 器件的稳定性和可靠性较高,同时验证了本文建立的应力模型的准确性和实用性,实现了对 MEMS 传感器退化行为的建模及预测。

## 4 结 论

本文研究了 MEMS 传感器中异质材料键合界面应力的产生及演变规律,综合考虑了材料的物理参数(热膨胀系数、杨氏模量)及其所受温度的影响,利用 COMSOL 仿真获得的应力数据建立了键合界面等效应力最大值  $\sigma_{\max}$  与温度、热膨胀系数和杨氏模量的理论数学模型;同时,根据收集到的强度数据,确定键合强度的分布类型和参数,利用应力强度干涉模型和蒙特卡洛抽样方法模拟计算了键合界面的可靠度。结果表明,在工作温度服从韦布尔分布的情况下,MEMS 器件所产生的热应力未造成器件失效,此时器件的稳定性和可靠性较高;采用有限元仿真方法和蒙特卡洛方法完成了所建立的退化模型的验证,实现对

MEMS 传感器退化行为的建模及预测。本文研究对进一步评估 MEMS 器件的封装可靠性提供了一定的理论依据。

## [参 考 文 献]

- [1] 唐蒙,于文婷,朱雨澄,等. 热电式 MEMS 微波功率传感器的封装研究[J]. 微电子学,2022,52(4):635-639.
- [2] YU H H, SUO Z. A model of wafer bonding by elastic accommodation[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids,1998,46(5):829-844.
- [3] LIU C R, LU X Y, YANG Z Y, et al. Residual stress and deformation analysis of anodic bonded multi-layer of glass and aluminum[J]. International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation,2008,9(4):347-354.
- [4] 李玉玲,王明伟,张林超,等. SOI 压力传感器阳极键合残余应力研究[J]. 传感器与微系统,2018,37(11):18-20.
- [5] 谷专元,何春华,何燕华,等. MEMS 硅玻璃阳极键合工艺评价方法[J]. 传感器与微系统,2017,36(10):54-56.
- [6] FENG W, SHIMAMOTO H, KAWAGOE T, et al. Warp-age reduction and thermal stress study of dicing process in wafer-to-wafer bonding fabrication[J]. IEEE Transactions on Electron Devices,2022,69(11):6265-6269.
- [7] OKAMYRA H, DOHI T. On Kolmogorov-Smirnov test for software reliability models with grouped data [C]//2019 IEEE 19th International Conference on Software Quality, Reliability and Security. [S. l.]:IEEE,2019:77-82.
- [8] DU G, DONG X, HUANG X, et al. Reliability evaluation based on mathematical degradation model for vacuum packaged MEMS sensor[J]. Micromachines,2022,13(10):1713.
- [9] REZA S E, ZAMAN P, AHAMMAD A, et al. A study on data accuracy by comparing between the Weibull and Rayleigh distribution function to forecast the wind energy potential for several locations of Bangladesh[C]//2016 4th International Conference on the Development in the Renewable Energy Technology. [S. l.]:IEEE,2016:742510.
- [10] 沈峥嵘,蔡自刚. 基于加速寿命理论和应力强度干涉模型的可靠度评估[J]. 电子产品可靠性与环境试验,2016,34(5):16-19.
- [11] 许高斌,徐礼建,余智,等. 基于蒙特卡洛仿真的 MEMS 陀螺仪可靠度分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2021,44(1):61-66.
- [12] 孟庆珍,王增武,梁秋枫. 重庆地面气温年极大值渐近分布的拟合试验[J]. 成都信息工程学院学报,2005,20(2):192-198.

(责任编辑 胡亚敏)