

文章编号: 2095-4980(2020)03-0531-07

一种用于 MEMS 超低值封装残余应力的测量方法

刘 猛, 黄清华, 许 蔚*, 唐 彬

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 微机电系统(MEMS)封装残余应力是在封装工艺过程中芯片上产生的残余应力, 它对于 MEMS 器件的热稳定性和长期贮存稳定性有着十分重大的影响, 故而对 MEMS 封装残余应力的高精确度测量有利于封装应力的研究。由于封装残余应力十分微小, 因此无法利用目前的测量手段直接测量封装应力, 本文针对这个问题提出了一种基于应力放大结构和拉曼光谱法的封装应力测量方法, 可以测量出 MEMS 器件中封装应力的平均水平。基于理论分析建立了原始封装模型与应力放大结构之间的放大关系, 并提出应力放大结构的设计原则。接着采用 3D 有限元(FEM)仿真对一款高精度 MEMS 微加速度计的封装应力测量进行了分析, 其结果与理论分析具有很高吻合度。最后, 针对该微加速度计的封装应力测量, 成功制作了应力放大结构的芯片样片, 并进行封装, 随后拉曼光谱法被用于测量样片中的最大应力, 进而计算出待测微加速度计中平均封装应力大小。实验结果与仿真分析具有很好的吻合度, 证明本文所提出的测量方法具有相当的可靠性。

关键词: 微机电系统(MEMS); 封装残余应力; 应力测量; 显微拉曼光谱; 在片应力放大结构中图分类号: TN307 文献标志码: A doi: 10.11805/TKYDA2019033

A novel measurement method of ultra-low residual stress in MEMS package

LIU Meng, HUANG Qinghua, XU Wei*, TANG Bin

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: Micro-Electro-Mechanical System(MEMS) packaging stress is a residual stress produced by MEMS packaging process, which has significant influence on the thermal stability and long-term stability of MEMS devices. An accurate assessment of stress is useful for the studying of packaging stress. Because the package stress is too low to be directly measured by the existing techniques, a novel measurement method based on stress magnifying structure and micro-Raman spectroscopy is proposed to obtain the average package residual stress in MEMS devices. Based on the theoretical analysis, the magnification ratio between the original package model and the stress magnifying structure is obtained, and a design rule of the stress magnifying structure is given. Then, a Finite Element Modeling(FEM) of a kind of high precise MEMS micro-accelerometer is conducted to prove the theoretical analysis result. Finally, for the package residual stress measurement of the micro-accelerometer, fabrication and package are successfully performed. Then stress measurement experiment is conducted to measure the magnified package stress and to calculate the actual average package residual stress in the micro-accelerometer, showing an identical result with previous simulation, which proves the measurement method much reliable.

Keywords: Micro-Electro-Mechanical System; package residual stress; stress measurement; micro-Raman spectroscopy; stress magnifying structure

微机电系统(MEMS)封装残余应力是在封装工艺过程中芯片上产生的残余应力, 主要来源于硅和封装材料之间的热膨胀不匹配现象^[1]。残余应力的产生不仅会使结构产生预期之外的形变, 同时还会造成 MEMS 器件的热

收稿日期: 2019-01-24; 修回日期: 2019-03-13

基金项目: 中国工程物理研究院“可靠性提升项目”资助项目(TA060606)

作者简介: 刘 猛(1994-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为 MEMS 微加速度计可靠性与长期稳定性。email:lmengle@qq.com

*通信作者: 许 蔚 email:xw198877@gmail.com

漂移,这对于 MEMS 器件的热稳定性和长期贮存稳定性有着十分重大的影响^[2-6]。此外, MEMS 封装应力的改变会导致微结构的形变产生相应变化,甚至会伴随材料老化产生器件分层、断裂等失效模式,这个现象则会对高精度的 MEMS 器件的性能产生不利影响^[7]。对 MEMS 封装残余应力进行高精度的测量,可以定量地监测应力在工艺加工和服役环境中的产生、演变规律,并对优化改进方案给出准确评价,有利于封装应力的研究。目前存在的高精度应力测量方法主要包括差分电容测量法^[4]、基底曲率法^[8-10]、X 射线衍射法(XRD)^[10-12]、拉曼光谱法^[13-19]、在片测量结构法^[20-24]等。差分电容测量应力的方法会在封装过程中由于电学因素的影响而产生精度问题,而基底曲率法一般用于测量衬底上薄膜的应力。XRD 和拉曼光谱法测量应力具有很高的精确度且能够测量局部应力情况,它们都是非接触性检测的方法,不会对测试样品造成损伤,是目前 MEMS 残余应力高精度测量中最常用的方法。高精度的 XRD 和拉曼光谱法的最小应力分辨力约在 5~10 MPa。然而,高性能 MEMS 器件为了追求较好的稳定性,其封装残余应力通常很小。例如,利用有限元分析(FEM)对一款高精度 MEMS 加速度计的封装模型进行应力仿真,得出芯片上的封装残余应力平均应力值只有 0.31 MPa 左右,因此它们均不适用于对低封装残余应力的直接测量。

在片测量结构法一般是将 MEMS 的微小形变进行尺度放大,再通过 MEMS 显微技术观测形变,并计算残余应力大小,其中关键在于放大结构的设计。目前已经有相关研究进行了应力放大结构的设计,例如旋转指针结构^[20-21]、双指针结构^[22]、折叠结构^[23]和杠杆指针测量结构^[23-24]等,通过设计细长指针来观测被放大的微结构形变。然而,对于本文所研究的封装应力而言,受限于工艺和显微技术的精确度(约 $0.15\mu\text{m}$ ^[20]),其应力测量精确度不足以测量 0.31 MPa 的封装应力。此外,目前研究中的放大结构基本都是只针对形变进行放大,其应力未得到显著放大,无法结合拉曼光谱技术进行放大后应力的测量。

针对低封装残余应力的测量问题,在现有应力测试技术的基础上,本文提出了一种融合显微拉曼光谱和在片应力放大结构的方法,即首先利用在片放大结构对封装应力进行定量的放大,再利用显微拉曼光谱对应力集中区的应力进行无损测量,从而可以推算出封装应力的大小。本文提出的封装应力测量方法能够测量到 MEMS 器件中产生的封装应力的平均水平,可用于对封装工艺残余应力的评估或是封装残余应力的长期监测等科学研究。后文针对低封装残余应力测量的特点,提出了应力放大结构的设计方法并推导其应力放大关系。针对一款高精度微加速度计的封装应力测量,本文先后通过仿真和实验对该测量方法进行了验证,并成功测量到微加速度计的平均封装应力大小。

1 测量方法理论分析

本文提出的测量方法核心在于应力放大结构的设计和应力放大关系的推导。

1.1 应力放大结构设计

图 1(a)为残余应力待测量的原始封装模型,是由硅芯片、封装胶和陶瓷基底组成的胶接结构, A_0 表示芯片长度方向的横截面积, L 表示芯片的长度。图 1(b)所示为应力放大结构的设计图,其中芯片结构分为两大部分,分别是外框(frame)和敏感结构,敏感结构包括指针(probe)和其支撑梁

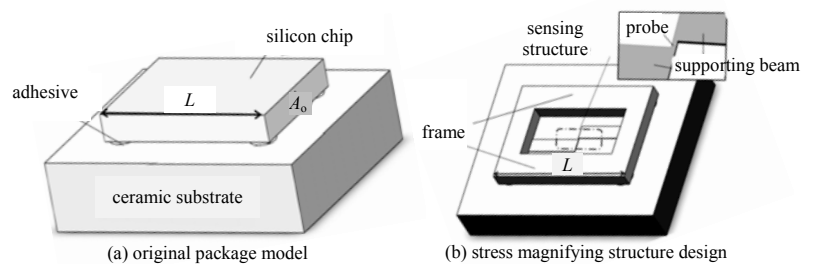


Fig.1 Original package model and stress magnifying structure design

图 1 原始封装模型和应力放大结构设计

(bearing beam)。为了能够实现封装应力的放大,并且应力的放大倍率在一定的待测应力范围内较为稳定,本文对应力放大结构的设计提出了 3 项前提条件: 1) 原始封装模型和应力放大模型中的芯片外围尺寸(总长、总宽和厚度)相同,使得两种模型中的芯片所受到来自封装胶的力基本一致; 2) 外框的刚度远大于敏感结构刚度,使得外框基本上分担全部的封装应力并产生形变; 3) 敏感结构中,支撑梁的刚度远大于指针的刚度,使得支撑梁能够将外框形变转化为位移并传递给指针,使指针能完全根据外框的形变产生变形,实现应力集中。

该结构实现应力放大的基本原理为,应力放大结构的芯片和原始封装模型的芯片在相同的封装工艺下,所受到的来自封装胶的力基本等效,在应力放大结构中由于芯片承载力的截面减小而实现了封装应力的第一级放大。相应产生的外框形变通过敏感结构的支撑梁传递到指针,利用指针尺寸小、易变形的特性实现了应力的第二级放大。

1.2 应力放大关系

图 1 展示了原始封装模型和应力放大设计封装模型的对比，两者区别在于芯片的内部结构不同。两个模型的芯片外围尺寸完全相同，因此在相同的封装条件下(封装温度、封装胶、基底、布胶方式)，由于热膨胀变形只与温度和总体尺寸有关，因此芯片整体的热形变、所受到来自封装胶的力对于原始封装模型和应力放大封装模型而言是相同的。

依据前提条件 1)，可建立原始封装模型和应力放大模型中的应力联系如下：

$$\sigma_o A_o = \text{Thermal Force} = \sigma_f A_f \tag{1}$$

式中： σ_o 和 A_o 分别表示原始封装模型中的芯片中平均封装应力和横截面积； σ_f 和 A_f 分别表示放大设计模型中芯片外框中的封装应力和横截面积。

前提条件 2) 的目的在于使指针上的集中应力能够正确反映外框上封装应力的放大，减小支撑梁和指针所分担的来自封装胶的封装应力。显然，当外框宽度远大于敏感结构厚度时，满足条件 2) 中的刚度要求。如图 2(a) 所示，由于外框的刚度远大于敏感结构刚度，芯片在承受封装应力时，外框基本上分担全部的封装应力并产生形变，而敏感结构由于刚度太小不分担封装应力，仅根据外框的形变产生向内或向外的位移。简化物理模型如图 2(b) 所示，其中 M 为支撑梁对指针产生的转矩， W_b 为支撑梁宽度， l_p 为指针长度， w_p 为指针宽度。结合式 (1)，推导出应力放大结构的第一级放大率：

$$\eta_1 = \frac{\sigma_f}{\sigma_o} = \frac{A_o}{A_f} = \frac{t_c W_o}{2t_c W_f} = \frac{W_o}{2W_f} \tag{2}$$

式中： t_c 表示芯片的厚度； W_o 与 W_f 分别表示原始芯片与外框的横截面宽度。第一级放大实质上是减小芯片上承载封装力的有效横截面积来实现应力的放大，这与材料学规律相吻合。

图 2 展示了外框的形变通过支撑梁传递到指针的过程，指针横向形变量 Δl_p 与外框形变量 Δl_f 关系为：

$$\Delta l_p = \Delta l_f \tag{3}$$

根据胡克定律，外框上形变与应力关系为：

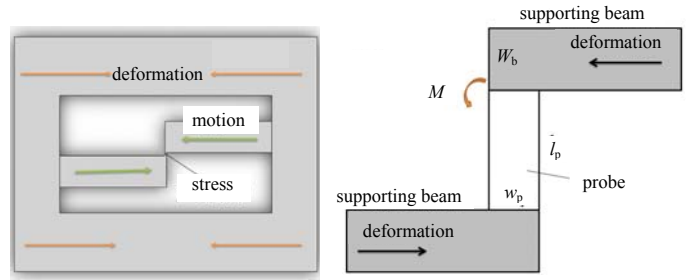
$$\Delta l_f = L \varepsilon_f = \frac{(1-\nu)L\sigma_f}{E} \tag{4}$$

式中： ε_f 表示外框上的应变； E 为硅的杨氏模量； ν 为硅的泊松常数。

前提条件 3) 保证了支撑梁能够将外框形变转化为位移并传递给指针，使指针能完全根据外框的形变产生变形和应力集中。支撑梁的运动和变形主要受外框和指针影响：外框的形变推动支撑梁横向运动，而指针则导致支撑梁产生纵向运动和变形。那么，要实现支撑梁只做横向平移运动，就需要减小指针对支撑梁的影响，即增大支撑梁和指针的刚度差异。当支撑梁刚度远大于指针时，它就能几乎不受指针变形的影响，近似看作一端自由的悬臂梁，在外框形变的推动下进行横向的平移，促使指针产生变形和应力集中。显然，当支撑梁宽度远大于指针宽度时，满足条件 3) 中的刚度要求。将指针的变形情况进行简化，如图 3 所示，其中 F_b 表示从支撑梁输入到指针的力， θ 表示指针的偏转角。图 3 展示了指针的受力与形变情况，在简化物理模型中，指针视为一端固定的悬臂梁，另一端则由支撑梁施加推力，从而产生变形。根据材料学规律，可以得到指针中的应力和形变关系为：

$$\begin{cases} \Delta l_p = \frac{(1-\nu)Ml_p^2}{2EI} \\ Ml_p = F_b \cos \theta \\ \sigma_{pm} = \frac{F_1}{A_1} + \frac{M}{I} \cdot \frac{w_p}{2} = \frac{F_b \sin \theta}{tw_p} + \frac{M}{I} \cdot \frac{w_p}{2} \end{cases} \tag{5}$$

式中： I 表示指针结构在指针长度方向的极矩； σ_{pm} 为指针上最大应力值(位于指针根部)； t 为敏感结构(指针和支撑梁)的厚度； F_1 与 A_1 分别表示指针上长度方向受力与横截面积。考虑到硅材料的热膨胀系数(约 $2.9 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)



(a) deformation and movement in stress magnifying structure (b) simplified physic model of probe

Fig.2 Deformation and movement in stress magnifying structure, and simplified physic model of probe

图 2 放大设计模型中芯片上的形变和位移、指针简化物理模型

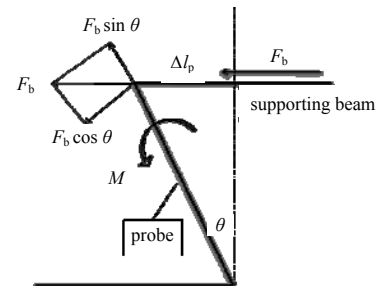


Fig.3 Diagram of force and deformation analysis of probe structure

图 3 指针结构受力与形变示意图

很小, 封装工艺的温度变化不大(环氧树脂胶封装温度一般为 $-40\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$), 实际上芯片的热膨胀形变很小, 从而指针的变形量也很小, 即偏转角度 θ 近似为零。结合式(3)~(5), 推导出应力放大结构第二级放大率为:

$$\eta_2 = \frac{\sigma_{pm}}{\sigma_f} \approx \frac{LW}{l_p^2} \quad (6)$$

结合式(2)与式(6), 推导出应力放大设计的总体应力放大率近似计算公式如下:

$$\eta = \frac{\sigma_{pm}}{\sigma_o} = \frac{\sigma_{pm}}{\sigma_f} \times \frac{\sigma_f}{\sigma_o} = \eta_1 \eta_2 = \frac{W_o L W_p}{2 W_f l_p^2} \quad (7)$$

式中 η 表示应力放大率, 含义为应力放大设计中指针上的最大集中应力与原始封装模型中芯片上的平均封装应力的比值。相应地, 待测封装应力计算公式为:

$$\sigma_o = \frac{\sigma_{pm}}{\eta} = \sigma_{pm} \times \frac{2 W_f l_p^2}{W_o L W_p} \quad (8)$$

式(8)中的指针最大应力 σ_{pm} 可由激光拉曼光谱法获得, 用于计算待测封装应力。后文将针对一款高精度 MEMS 微加速度计的封装应力对本文提出的测量方法进行仿真和实验验证。

2 仿真分析与讨论

为了验证前文的理论分析, 采用 3D FEM 对一款高精度微加速度计的封装应力测量进行了仿真实验, 对比了其中封装应力直接仿真结果和使用本文测量方法的仿真结果。仿真实验主要模拟了芯片的封装温度场变化过程, 即芯片-胶-基底系统的温度变化(由高温固化恢复到室温), 并观察芯片上指针的应力情况。

封装应力产生于微加速度计芯片下极板中, 因此以芯片下极板-封装胶-基底建立原始封装模型。芯片下极板总体尺寸为长 $4\ 000\ \mu\text{m}$, 宽 $3\ 000\ \mu\text{m}$, 厚度 $400\ \mu\text{m}$ 。应力放大结构的芯片总体尺寸与封装模型相同, 满足前提条件 1) 的要求; 其敏感结构厚度为 $20\ \mu\text{m}$, 外框宽度为 $400\ \mu\text{m}$, 满足前提条件 2) 中外框刚度远大于敏感结构刚度的要求; 敏感结构中支撑梁宽度为 $400\ \mu\text{m}$, 指针宽度为 $20\ \mu\text{m}$, 满足前提条件 3) 中支撑梁刚度远大于指针刚度的要求。指针长度为 $40\ \mu\text{m}$, 代入式(7)计算出其理论放大率为 187 倍。此外, 原始封装模型和应力放大结构封装模型封装应力仿真所使用的封装条件相同: 封装胶厚为 $10\ \mu\text{m}$, 四点布胶, 材料为环氧树脂胶; 封装温度变为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 基底为陶瓷材料。

图 4 和图 5 分别为原始封装模型和应力放大结构封装模型的有限元仿真结果。通过有限元分析计算出微加速度计下极板原始封装应力平均大小约为 $0.31\ \text{MPa}$, 为压应力。而经过应力放大结构放大后, 其指针上最大残余应力约 $53.3\ \text{MPa}$, 同样是压应力, 集中在指针根部, 代入式(8)计算得待测封装应力平均值为 $0.285\ \text{MPa}$ 。对比封装应力直接仿真结果和使用本文测量方法的仿真结果, 二者误差为 8% , 吻合度很高, 证明本文提出的测量方法在仿真上具有可信度。

3 实验

为了验证封装应力测量方法的可行性, 本文针对前文所述的一款高精度微加速度计进行了封装应力测量实验, 目的是通过本文提出的测量方法测量其芯片下极板中的平均封装应力大小。

实验首先完成了对应力放大结构的测量样片的工艺设计和制作, 接着进行封装和指针上最大

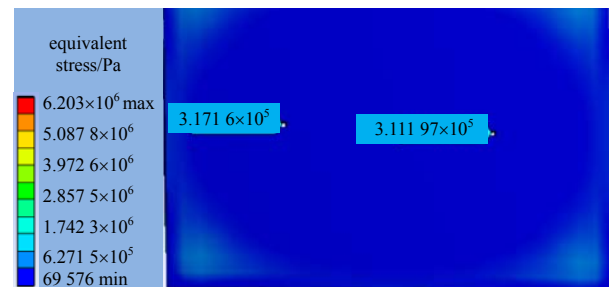


Fig.4 FEM result of residual stress of original package model
图 4 原始封装模型参与应力仿真结果

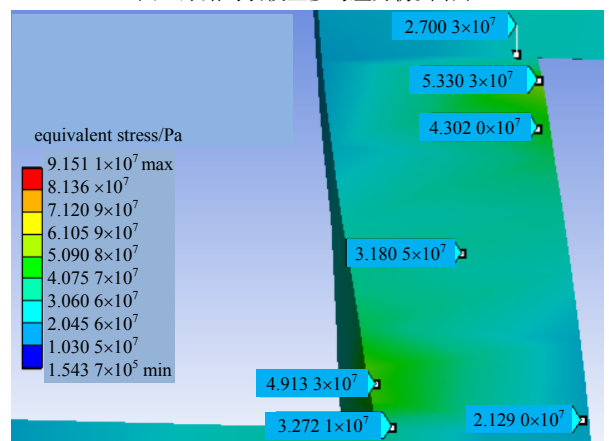


Fig.5 Stress distribution on probe of stress magnifying structure by FEM
图 5 应力放大结构指针上应力分布仿真结果

应力的测量，最后根据式(8)计算待测 MEMS 微加速度计中的封装应力。

3.1 测量样片工艺设计

根据前文的仿真分析，设计了样片的尺寸，使用 SOI 硅片和干法刻蚀工艺加工出芯片，其工艺设计如图 6 所示，共分 6 步：1) 选择厚度分布为 20-0.5-380 μm 的 SOI 硅片；2) 高温氧化处理在正反两面生成氧化硅掩膜；3) 使用干法刻蚀在正面刻蚀出敏感结构的形状；4) 去除氧化硅掩膜，在背面溅射一层 Al 掩膜；5) 背面进行深度干法刻蚀；6) 去除 Al 掩膜和 SOI 的氧化硅层，完成应力放大结构芯片制作。芯片工艺完成后的 SEM 图如图 7 所示。由于现实工艺限制，应力放大结构的制作工艺过程无法避免工艺尺寸误差，但尺寸误差可以通过光学显微镜进行测量并对应力放大率进行修正，例如指针的长度、宽度，支撑梁宽度，外框宽度以及芯片整体尺寸。芯片加工完成后通过光学显微镜对其关键尺寸进行了测量，设计尺寸与实际尺寸对比如表 1 所示。代入式(7)，计算出样片 1 的放大率为 186 倍，样片 2 放大率为 185 倍，样片 3 的放大率为 187 倍。

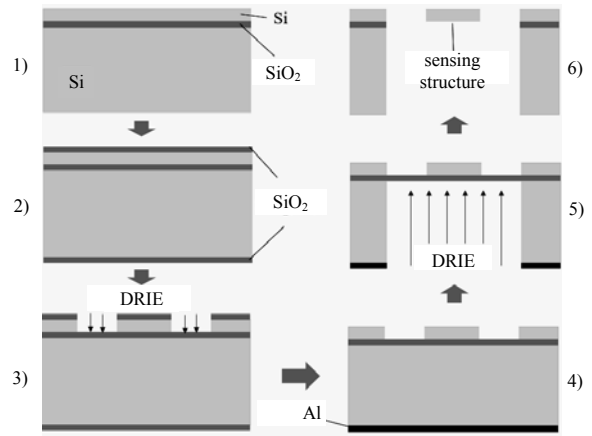


Fig.6 Process design of sample chip
图 6 测量样片芯片工艺设计

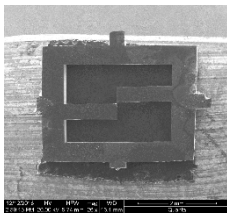


Fig.7 SEM of stress magnifying structure
图 7 应力放大结构电镜图

表 1 样片尺寸的设计值与实测值对比

dimension/ μm	W_f	W_b	w_p	l_p	t
design	400.0	400.0	20.00	40.0	20.00
sample 1	396.8	402.6	19.97	40.4	19.95
sample 2	400.1	398.8	19.99	40.1	20.01
sample 3	393.5	399.4	20.19	40.6	19.97

3.2 样片封装与应力测量

应力测量实验主要包括了对 SOI 硅片、应力放大结构芯片封装前后的应力测量，其中 SOI 硅片经过激光拉曼光谱仪测量，其拉曼峰值位置为 519.797 cm^{-1} 。

样片工艺完成后，立即对所有芯片样片进行拉曼光谱测试，测量芯片指针上的拉曼光谱峰值；随后对样片进行封装，所使用的封装胶为环氧树脂胶，采用四点贴片方式布胶，固化温度为 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ ，固化保持时间为 2 h ，固化完成后恢复至实验室室温 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。封装完成后的实验样片如图 8 所示，通过测量，封装胶厚度约为 $9 \text{ }\mu\text{m}$ 。

拉曼光谱仪被用于测量封装前后的实验样片指针上的最大应力值，例如图 9 所示分别为样片 1#封装前后的拉曼光谱测量结果。利用拉曼光谱应力测量的原理，计算各样片残余应力结果如表 2 所示。表 2 的结果表明，芯片封装前存在大小为 $30\sim 35 \text{ MPa}$ 的拉应力，其来源为芯片制作的工艺过程，由于采用了 SOI 硅片，在进行高温氧化时由于氧化硅层和硅层的热失配会产生内应力。氧化硅热膨胀系数较小，故而在高温恢复常温过程中会在芯片中产生拉应力。

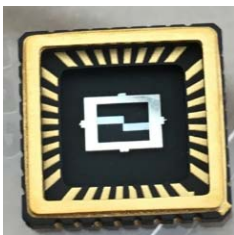


Fig.8 Sample of stress magnifying structure after package
图 8 应力放大结构封装样片

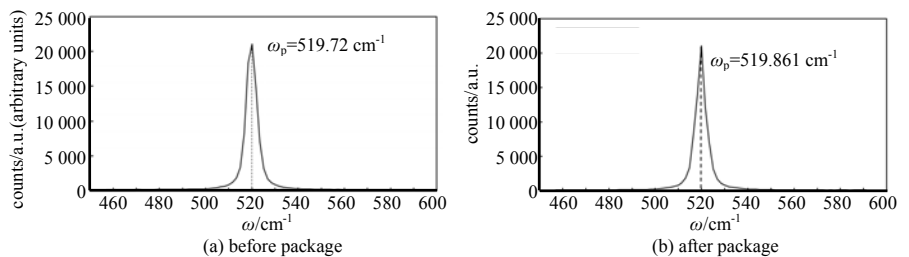


Fig.9 Raman spectra of sample 1# before and after package
图 9 实验样片 1#封装前后的拉曼光谱

显然,表 2 中所测得的样片封装后残余应力应当是芯片制作工艺内应力和封装应力叠加的复合应力,对于封装产生的应力,根据前文理论分析,其性质为压应力,因此封装应力与工艺应力会进行一定程度的抵消,即实际测量值 σ_{measure} 为封装残余应力 σ_{package} 与工艺残余应力 $\sigma_{\text{fabrication}}$ 的叠加,故:

$$\sigma_{\text{package}} = \sigma_{\text{measure}} - \sigma_{\text{fabrication}} \quad (9)$$

表 2 各样片的拉曼频移与残余应力

Table2 Raman frequency shift and residual stress of samples

samples	Raman peak/cm ⁻¹		frequency shift/cm ⁻¹		residual stress/MPa	
	before package	after package	before package	after package	before package	after package
sample 1#	519.720	519.861	-0.077	0.064	33.495	-27.840
sample 2#	519.717	519.859	-0.080	0.062	34.800	-26.970
sample 3#	519.726	519.855	-0.071	0.058	30.885	-25.230

根据式(9)可以计算出被测样片中实际的封装应力大小,该封装应力为经过本文测量方法放大后的应力,将其代入式(8)计算得到微加速度计中实际的封装应力,各样片的计算结果如表 3 所示。表 3 表明微加速度计中平均封装应力实际大小约为 0.3~0.34 MPa,为压应力,与仿真结果(0.31 MPa)相比,其测量误差低于 8%,具有很高的吻合度,验证了本文所提出的测量方法的可靠性。

表 3 封装应力测量结果与误差

Table3 Results and errors of package residual stress measurement

samples	amplified package residual stress /MPa	magnification	desired value/MPa	error/%
sample 1#	-61.335	186	-0.329	6.4
sample 2#	-61.770	185	-0.333	7.7
sample 3#	-56.115	187	-0.300	3.2

4 结论

针对超低封装应力测量的问题,本文提出了一种融合显微拉曼光谱和在片应力放大结构的方法,运用应力放大关系式能够较为准确地计算出原始 MEMS 器件的封装应力值。针对封装应力的特点,本文提出了一种新型的两级放大结构设计,基于应力放大结构的设计原则,推导出应力放大测量所必需的应力放大关系。随后针对一款高精度 MEMS 微加速度计的封装应力测量,本文成功实现了测量方法中所需应力放大结构的工艺制作,最后测量出其中下极板中平均封装应力大小,实验结果与仿真分析吻合度较高,测量误差低于 8%。相比于目前常用的应力测量方法,本文的测量方法在用于测量 MEMS 封装应力时具有更高的精确度,成功实现了测量。

本文提出的基于在片应力放大结构和显微拉曼光谱法的超低值封装残余应力测量方法,通过改变应力放大结构参数即可以适用于不同的被测应力范围,能够对于目前的 MEMS 封装应力研究提供一个有效的定量测试手段,对于研究封装应力对 MEMS 系统的影响以及其长期稳定性提供了最直接的应力观测。然而,本文提出的测量方法只能测量出 MEMS 器件中封装残余应力的平均水平,但封装应力往往是分布不均的,这是本方法的不足之处,也是未来的研究工作中值得讨论的问题。

参考文献:

- [1] 吴慧,段宝明,秦盼,等. 粘片工艺对 MEMS 器件应力的影响研究[J]. 新技术新工艺, 2016(6):46-51. (WU Hui,DUAN Baoming,QIN Pan,et al. Research on the impact of die attach process on MEMS device stress[J]. New Technology & New Process, 2016(6):46-51.)
- [2] WALWADKAR S S,CHO J. Evaluation of die stress in MEMS packaging: experimental and theoretical approaches[J]. IEEE Transactions on Components & Packaging Technologies, 2006,29(4):735-742.
- [3] WALWADKAR S S,CHO J,FARRELL P W,et al. Tailoring of stress development in MEMS packaging systems[C]// Materials Research Society Symposium Proceedings. Materials Research Society, 2003(741):139-144.
- [4] PENG P,ZHOU W,YU H,et al. Investigation of the thermal drift of MEMS capacitive accelerometers induced by the overflow of die attachment adhesive[J]. IEEE Transactions on Components Packaging & Manufacturing Technology, 2017, 6(5):822-830.
- [5] YADAV I,DUTTA S,KATIYAR A,et al. Evolution of residual stress in benzocyclobutene films with temperature[J]. Materials Letters, 2015(158):343-346.

- [6] 戴强,苏伟,张德,等. 三明治型微加速度计温度漂移封装胶关系研究[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(1): 169–173. (DAI Qiang,SU Wei,ZHANG De,et al. Relationship between temperature drift and adhesive of sandwich type micro-accelerometers[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(1):169–173.)
- [7] XIN Z,PARK S,JUDY M W. Accurate assessment of packaging stress effects on MEMS sensors by measurement and sensor–package interaction simulations[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2007,16(3):639–649.
- [8] GRIESELER R,KLAUS J,STUBENRAUCH M,et al. Residual stress measurements and mechanical properties of AlN thin films as ultra-sensitive materials for nanoelectromechanical systems[J]. Philosophical Magazine, 2012,92(25–27):3392–3401.
- [9] PABST O,SCHIFFER M,OBBERMEIER E,et al. Measurement of Young’s modulus and residual stress of thin SiC layers for MEMS high temperature applications[J]. Microsystem Technologies, 2012,18(7–8):945–953.
- [10] KILINC Y,UNAL U,ALACA B E. Residual stress gradients in electroplated nickel thin films[J]. Microelectronic Engineering, 2015(134):60–67.
- [11] TAMURA N,CELESTRE R S,MACDOWELL A A,et al. Submicron X-ray diffraction and its applications to problems in materials and environmental science[J]. Review of Scientific Instruments, 2002,73(3):1369–1372.
- [12] BANDI T,DOMMANN A,NEELS A. Analysis of stress in silicon-based microsystems by X-ray diffraction techniques[C]// Microelectronics Packaging Conference. Grenoble,France:IEEE, 2014.
- [13] LIEBOLD C,MÜLLER W H. Strain maps on statically bend (001) silicon microbeams using AFM-integrated Raman spectroscopy[J]. Archive of Applied Mechanics, 2015,85(9–10):1353–1362.
- [14] STARMAN L A,JR R A C. Using micro-Raman spectroscopy to assess MEMS Si/SiO₂ membranes exhibiting negative spring constant behavior[J]. Experimental Mechanics, 2013,53(4):593–604.
- [15] PILUSO N,ANZALONE R,CAMARDA M,et al. Micro-Raman analysis and finite element modeling of 3 C - SiC microstructures[J]. Journal of Raman Spectroscopy, 2013,44(2):299–306.
- [16] DUTTA S,SAXENA G,SHAVETA,et al. Comparison of residual stress in deep boron diffused silicon (100), (110) and (111) wafers[J]. Materials Letters, 2013(100):44–46.
- [17] MIYATAKE T,PEZZOTTI G. Tensor-resolved stress analysis in silicon MEMS device by polarized Raman spectroscopy[J]. Physica Status Solidi (a), 2011,208(5):1151–1158.
- [18] STARMAN L A,LOTT J A,AMER M S,et al. Stress characterization of MEMS microbridges by micro-Raman spectroscopy[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2003,104(2):107–116.
- [19] ZHAO C,LI M,YIN M,et al. Micro-Raman spectroscopy analysis of residual stress in polysilicon MEMS resonators[C]// IEEE International Conference on Nano/micro Engineered & Molecular Systems. Suzhou,China:IEEE, 2013.
- [20] VAN DRIEËNHUIZEN B P,GOOSEN J F L,FRENCH P J,et al. Comparison of techniques for measuring both compressive and tensile stress in thin films[J]. Sensors & Actuators A: Physical, 1993(37–38):756–765.
- [21] ANZALONE R,D'ARRIGO G,CAMARDA M,et al. Advanced residual stress analysis and FEM simulation on heteroepitaxial 3CSiC for MEMS application[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2011,20(3):745–752.
- [22] ERICSON F,GREEK S,SÖDERKVIST J,et al. High-sensitivity surface micromachined structures for internal stress and stress gradient evaluation[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 1997,7(1):30–36.
- [23] LIN L,PISANO A P,HOWE R T. A micro strain gauge with mechanical amplifier[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 1997,6(4):313–321.
- [24] HE Q,LUO Z X,CHEN X Y. Comparison of residual stress measurement in thin films using surface micromachining method[J]. Thin Solid Films, 2008,516(16):5318–5323.