

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2018 年 11 月 1 日 (01.11.2018)



(10) 国际公布号
WO 2018/196466 A1

(51) 国际专利分类号:
G01N 3/00 (2006.01)

庆安 (HUANG, Qingan); 中国江苏省南京市四牌楼2号, Jiangsu 210096 (CN)。

(21) 国际申请号: PCT/CN2018/076248

(22) 国际申请日: 2018 年 2 月 11 日 (11.02.2018)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
201710299770.4 2017年4月28日 (28.04.2017) CN

(71) 申请人: 东南大学 (SOUTHEAST UNIVERSITY)
[CN/CN]; 中国江苏省南京市四牌楼2号,
Jiangsu 210096 (CN)。

(72) 发明人: 周再发 (ZHOU, Zaifa); 中国江苏省南京市四牌楼2号, Jiangsu 210096 (CN)。 孙超 (SUN, Chao); 中国江苏省南京市四牌楼2号, Jiangsu 210096 (CN)。 郭欣格 (GUO, Xinge); 中国江苏省南京市四牌楼2号, Jiangsu 210096 (CN)。 黄

(74) 代理人: 南京苏高专利商标事务所 (普通合伙) (NANJING SUGAO PATENT AND TRADEMARK FIRM (ORDINARY PARTNERSHIP)); 中国江苏省南京市中山东路198号龙台国际大厦1912室, Jiangsu 210005 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(54) Title: METHOD AND DEVICE FOR MEASURING MECHANICAL PARAMETER OF MULTI-LAYER COMPOSITE THIN FILM STRUCTURE

(54) 发明名称: 多层复合薄膜结构的力学参数测量方法及装置

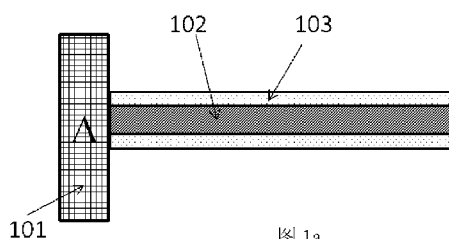


图 1a

(57) Abstract: Provided are a method for measuring a mechanical parameter of a multi-layer composite thin film structure, and a device for measuring a mechanical parameter of a multi-layer composite thin film structure, which fall within the technical field of the online testing of material parameters of a micro-electro-mechanical system (MEMS for short). By means of the method, based on the relationship between a first-order resonance frequency of a multi-layer composite clamped-clamped beam and a multi-layer composite cantilever beam and parameters such as a material characteristic and a structure size, an equivalent Young's modulus of each layer of a multi-layer composite thin film structure and an equivalent residual stress of each layer are obtained in one step by means of solving a set of equations, which can satisfy the online testing of a multi-layer thin film material, has a simple test structure and calculation method, and has a higher accuracy.

(57) 摘要: 一种多层复合薄膜结构的力学参数测量方法和一种多层复合薄膜结构的力学参数测量装置, 属于微机电系统 (Micro-Electro-Mechanical System, 简称MEMS) 材料参数在线测试技术领域。方法基于多层复合双端固支梁和多层复合悬臂梁的一阶谐振频率与材料特性、结构尺寸等参数之间的关系, 利用求解方程组的形式一次性得到多层复合薄膜结构各层的等效杨氏模量和各层的等效残余应力, 可满足多层薄膜材料的在线测试, 且测试结构、计算方法简单, 准确性更高。

(84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

根据细则4.17的声明:

— 发明人资格 (细则4.17(iv))

本国际公布:

— 包括国际检索报告 (条约第21条(3))。

多层复合薄膜结构的力学参数测量方法及装置

技术领域

本发明涉及一种多层复合薄膜结构的力学参数测量方法及装置，属于微机电系统（Micro-Electro-Mechanical System，简称 MEMS）材料参数在线测试技术领域。

背景技术

MEMS 全称为微机电系统，也叫做微电子机械系统、微系统、微机械等，是指尺寸在几毫米乃至更小的高科技装置，其内部结构一般在微米甚至纳米量级，是一个独立的智能系统。MEMS 主要由传感器、动作器（执行器）和微能源三大部分组成。微机电系统涉及物理学、半导体、光学、电子工程、化学、材料工程、机械工程、医学、信息工程及生物工程等多种学科和工程技术，为智能系统、消费电子、可穿戴设备、智能家居、系统生物技术的合成生物学与微流控技术等领域开拓了广阔的用途。常见的产品包括 MEMS 加速度计、MEMS 麦克风、微马达、微泵、微振子、MEMS 压力传感器、MEMS 陀螺仪、MEMS 湿度传感器等以及它们的集成产品。

随着 MEMS 工艺的发展和完善，用表面微机械加工技术和体硅加工工艺，已经做出了多种微型机械构件，如微悬臂梁、微桥等。这些微型机械构件，由于尺寸较小，在宏观上往往被看作薄膜结构，其力学行为与宏观的大块机械材料之间有相当大的差异，不能用我们所熟知的宏观机械材料的机械参数来衡量薄膜材料的力学性能。薄膜材料的力学性能与具有相同化学成分的大体积材料的力学性能有较大的差异，各种传统的力学性能测试技术与设备也不能直接用于薄膜材料的测试，所以在表面微机械结构的加工过程中薄膜材料力学参数（例如，残余应力、杨氏模量、疲劳强度、断裂强度、泊松比）的控制就变得尤其重要，在 MEMS 领域，薄膜力学性能的研究和测试正在成为一个新的研究热点，引起了微电子学、力学、物理、材料等领域研究者的兴趣。

对于很多种材料，尤其是在晶体材料在形成薄膜、细梁等结构，在不同的加工工艺条件下，即使相同的材料也往往会表现出明显不同的材料特性。同样，即使同样的工艺在不同生产环境下所表现出的热学参数也存在明显不同，因而会表现出明显不同的力学参数，如密度、杨氏模量、残余应力等。但是如果以上力学参数已知的话，则对于传感器、执行

器部分的一些静态或动响应，就可以方便地由已测得的其它参数估计出来。所以，在线监测薄膜结构的力学参数对于 MEMS 器件具有非常重要的意义。

一方面由于尺寸相对较小，薄膜材料的材料参数难以利用经典的宏观表征技术进行实验测量；另一方面，CMOS MEMS 器件往往使用多层薄膜结构，将已有的测试单层薄膜材料力学参数方法应用到多层薄膜材料参数测量上却并不容易。因此，建立工艺兼容的对多层薄膜材料力学参数的在线测试结构和测试方法，对于监测 MEMS 薄膜材料力学特性，预测和优化产品性能，保证产品性能可靠、均匀一致并且长期稳定，具有重要的意义。

现有测量薄膜材料的杨氏模量的方法包括纳米压痕法、静电吸合法、鼓泡法等。但纳米压痕法会损伤薄膜；静电吸合法多次测量后由于静电积累，会造成测量误差，而且只适合测量导电材料；鼓泡法测量对工作台面的平面度、粗糙度要求高，同时薄膜构件与工作台的粘结质量直接影响试验的成功与否。

中国发明专利 CN101493389 公开了《一种基于谐振频率法在线测量 MEMS 薄膜杨氏模量的方法》。该方法制作了一个中心固定的圆形 MEMS 薄膜，薄膜的锚区固定在平面衬底上，通过测出圆形 MEMS 薄膜的谐振频率从而计算得到薄膜材料的杨氏模量。该发明主要适用于单层薄膜，但是目前对于多层薄膜材料参数的市场需求越来越大，且单层薄膜材料力学参数的提取并不能直接套用到多层薄膜上。

发明内容

本发明所要解决的技术问题在于克服现有技术不足，提供一种多层复合薄膜结构的力学参数测量方法，基于多层复合双端固支梁和多层复合悬臂梁的一阶谐振频率与材料特性、结构尺寸等参数之间的关系，利用求解方程组的形式一次性得到多层复合薄膜结构各层的等效杨氏模量和各层的等效残余应力，可满足多层薄膜材料的在线测试，且测试结构、计算方法简单，准确性更高。

本发明具体采用以下技术方案解决上述技术问题：

多层复合薄膜结构的力学参数测量方法，所述多层复合薄膜结构为初始平直的 N 层复合薄膜结构，N 为大于等于 2 的整数；包括以下步骤：

步骤 1、采用所述多层复合薄膜结构的制备工艺制备一组至少 N 个初始平直的 N 层复合悬臂梁测试结构以及一组至少 N 个初始平直的 N 层复合双端固支梁测试结构，各测试结

构除几何尺寸外的其他材料参数均相同；对于每一组测试结构，以每个测试结构的各层宽度及长度所组成的向量作为该测试结构的尺寸向量，则这一组测试结构的尺寸向量组线性无关；

步骤 2、测量出每个测试结构的一阶谐振频率；

步骤 3、将 N 层复合悬臂梁测试结构的一阶谐振频率分别代入 N 层复合悬臂梁一阶谐振频率表达式，从而得到由至少 N 个线性方程构成的方程组；对所述方程组求解，得到所述多层复合薄膜结构各层的等效杨氏模量；所述 N 层复合悬臂梁一阶谐振频率 f_{1cf} 的表达式具体如下：

$$f_{1cf} = \frac{1.875^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \tilde{E}_i w_i \cdot [(z_i - z_c)^3 - (z_{i-1} - z_c)^3]}{3 \sum_{i=1}^N \rho_i w_i h_i}}$$

式中， l 为所述 N 层复合悬臂梁测试结构的长度；第 i 层薄膜材料的宽度为 w_i ，厚度为 h_i ，材料密度为 ρ_i ，等效杨氏模量为 $\tilde{E}_i$ ； z_i 为第 i 层薄膜材料的顶面在 z 轴上的位置， z_c 是中性面高度；

步骤 4、将 N 层复合双端固支梁测试结构的一阶谐振频率以及步骤 3 所得到的多层复合薄膜结构各层的等效杨氏模量分别代入 N 层复合双端固支梁一阶谐振频率表达式，从而得到由至少 N 个方程构成的方程组；对所述方程组求解，得到所述多层复合薄膜结构各层的等效残余应力；所述 N 层复合双端固支梁一阶谐振频率 f_{1s} 的表达式具体如下：

$$f_{1s} = \frac{4.730^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \tilde{E}_i w_i [(\sum_{i=0}^i h_i - z_c)^3 - (\sum_{i=0}^{i-1} h_i - z_c)^3]}{3 \sum_{i=1}^N \rho_i w_i h_i}} + \frac{l^2}{4\pi^2} \frac{\sum_{i=1}^N \tilde{\sigma}_i w_i h_i}{\sum_{i=1}^N \rho_i w_i h_i}$$

式中， l 为所述 N 层复合双端固支梁测试结构的长度；第 i 层薄膜材料的宽度为 w_i ，厚度为 h_i ，材料密度为 ρ_i ，等效杨氏模量为 $\tilde{E}_i$ ，等效残余应力为 $\tilde{\sigma}_i$ ； z_c 是中性面高度。

根据相同的发明思路还可以得到以下技术方案：

多层复合薄膜结构的力学参数测量装置，所述多层复合薄膜结构为初始平直的 N 层复合薄膜结构，N 为大于等于 2 的整数；该装置包括：

一组至少 N 个初始平直的 N 层复合悬臂梁测试结构，采用所述多层复合薄膜结构的制备工艺制备，各测试结构除几何尺寸外的其他材料参数均相同；以每个测试结构的各层宽

度及长度所组成的向量作为该测试结构的尺寸向量，则这一组测试结构的尺寸向量组线性无关；

一组至少 N 个初始平直的 N 层复合双端固支梁测试结构，采用所述多层复合薄膜结构的制备工艺制备，各测试结构除几何尺寸外的其他材料参数均相同；以每个测试结构的各层宽度及长度所组成的向量作为该测试结构的尺寸向量，则这一组测试结构的尺寸向量组线性无关；

谐振频率测量单元，用于测量每个测试结构的一阶谐振频率；

计算单元，用于将 N 层复合悬臂梁测试结构的一阶谐振频率分别代入 N 层复合悬臂梁一阶谐振频率表达式，从而得到由至少 N 个线性方程构成的方程组，并对所述方程组求解，得到所述多层复合薄膜结构各层的等效杨氏模量；然后将 N 层复合双端固支梁测试结构的一阶谐振频率以及多层复合薄膜结构各层的等效杨氏模量分别代入 N 层复合双端固支梁一阶谐振频率表达式，从而得到由至少 N 个方程构成的方程组，并对所述方程组求解，得到所述多层复合薄膜结构各层的等效残余应力；其中，

所述 N 层复合悬臂梁一阶谐振频率 f_{1cf} 的表达式具体如下：

$$f_{1cf} = \frac{1.875^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \tilde{E}_i w_i \cdot [(z_i - z_c)^3 - (z_{i-1} - z_c)^3]}{3 \sum_{i=1}^N \rho_i w_i h_i}}$$

式中， l 为所述 N 层复合悬臂梁测试结构的长度；第 i 层薄膜材料的宽度为 w_i ，厚度为 h_i ，材料密度为 ρ_i ，等效杨氏模量为 $\tilde{E}_i$ ； z_i 为第 i 层薄膜材料的顶面在 z 轴上的位置， z_c 是中性面高度；

所述 N 层复合双端固支梁一阶谐振频率 f_{1s} 的表达式具体如下：

$$f_{1s} = \frac{4.730^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \tilde{E}_i w_i [(\sum_{i=0}^i h_i - z_c)^3 - (\sum_{i=0}^{i-1} h_i - z_c)^3]}{3 \sum_{i=1}^N \rho_i w_i h_i}} + \frac{l^2 \sum_{i=1}^N \tilde{\sigma}_i w_i h_i}{4\pi^2 \sum_{i=1}^N \rho_i w_i h_i}}$$

式中， l 为所述 N 层复合双端固支梁测试结构的长度；第 i 层薄膜材料的宽度为 w_i ，厚度为 h_i ，材料密度为 ρ_i ，等效杨氏模量为 $\tilde{E}_i$ ，等效残余应力为 $\tilde{\sigma}_i$ ； z_c 是中性面高度。

相比现有技术，本发明具有以下有益效果：

本发明利用多层悬臂梁和多层双端固支梁的组合测试结构，基于多层双端固支梁和多

层悬臂梁的一阶谐振频率与材料特性、结构尺寸等参数之间的关系，可一次性得到多层复合薄膜结构各层的等效杨氏模量和各层的等效残余应力，有效解决了多层复合薄膜结构的力学参数测量难题；

本发明测试方法简单，对测试设备要求低，且测试过程稳定，计算过程简便，测试准确性高。

本发明测试结构的加工过程与微机电器件加工同步，没有特殊加工要求，因此完全符合在线测试的要求。

附图说明

图 1 a、图 1b 分别为双层复合悬臂梁测试结构的俯视图、主视图；

图 2 a、图 2b 分别为双层复合双端固支梁测试结构的俯视图、主视图。

图中标号含义如下：

101、锚区，102、顶层，103、底层，104、衬底。

具体实施方式

针对多层复合薄膜结构的力学参数在线测量问题，本发明的思路是利用多层悬臂梁和多层双端固支梁的组合测试结构，基于多层双端固支梁和多层悬臂梁的一阶谐振频率与材料特性、结构尺寸等参数之间的关系，可一次性得到多层复合薄膜结构各层的等效杨氏模量和各层的等效残余应力，且计算简便，测试准确性高。

为了便于公众理解本发明技术方案，首先对本发明技术方案的理论原理进行详细说明。

对于由至少两层薄膜结构复合而成的复合薄膜结构而言，当薄膜宽度与其厚度满足 $w_i < 5h_i$ ，即薄膜结构为窄梁时，等效杨氏模量 $\tilde{E}_i$ 就是杨氏模量 E_i 其本身；当薄膜宽度与其厚度满足 $w_i \geq 5h_i$ ，即薄膜为宽梁时，等效杨氏模量 $\tilde{E}_i$ 是一个关于杨氏模量和泊松比的关系式，即 $\tilde{E}_i = \frac{E_i}{1-\nu_i^2}$ 。则第 i 层薄膜的等效杨氏模量 $\tilde{E}_i$ 关于薄膜厚度及其宽度之间的关系

为：

$$\tilde{E}_i = \begin{cases} E_i, & w_i < 5h_i \\ \frac{E_i}{1-\nu_i^2}, & w_i \geq 5h_i \end{cases} \quad (1)$$

假设释放工艺之前（即未发生形变时）梁的长度为 l ；第 i 层薄膜材料的宽度为 w_i ，厚度为 h_i ，材料密度为 ρ_i ，杨氏模量为 E_i 。多层薄膜的底面在 z 轴上位置为 z_0 ， $z_0=0$ ，从下至上第 i 层的顶面在 z 轴上的位置为 z_i ，则：

$$z_i = \sum_{i=1}^i h_i \quad (2)$$

中性面高度 z_c 为：

$$z_c = \frac{\sum_{i=1}^N \tilde{E}_i w_i (z_i^2 - z_{i-1}^2)}{2 \sum_{i=1}^N \tilde{E}_i w_i (z_i - z_{i-1})} \quad (3)$$

第 i 层薄膜材料在横截面上的面积关于中性轴的转动惯量 I_i 为：

$$I_i = \frac{1}{3} w_i \left[(z_i - z_c)^3 - (z_{i-1} - z_c)^3 \right] \quad (4)$$

定义微机械薄膜梁的弯曲刚度为 $\overline{EI}$ ，线性密度为 $\overline{\rho A}$ ，轴向载荷 $\overline{\sigma A}$ ，即：

$$\overline{EI} = \sum_{i=1}^N \tilde{E}_i I_i \quad (5)$$

$$\overline{\rho A} = \sum_{i=1}^N \rho_i A_i \quad (6)$$

$$\overline{\sigma A} = \sum_{i=1}^N \tilde{\sigma}_i A_i \quad (7)$$

其中， A_i 为第 i 层薄膜材料在横截面上的面积， ρ_i 为第 i 层薄膜材料的密度， $\tilde{\sigma}_i$ 为第 i 层薄膜材料的等效残余应力。

对于初始平直的多层悬臂梁而言，微机械多层薄膜悬臂梁横向振动的微分方程为：

$$\overline{EI} \frac{\partial^4 z(x,t)}{\partial x^4} = -\overline{\rho A} \frac{\partial^2 z(x,t)}{\partial t^2} \quad (8)$$

其中 $z(x,t)$ 是当梁横向振动时在高度上的位移。利用分离变量法对该式进行求解，令 $z(x,t)=Z(x)T(t)$ 带入式(8)中进行求解，得释放后保持平直的多层悬臂梁一阶谐振频率公式：

$$\begin{aligned} f_{1cf} &= \frac{1.875^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{\overline{EI}}{\overline{\rho A}}} \\ &= \frac{1.875^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \tilde{E}_i w_i \cdot \left[(z_i - z_c)^3 - (z_{i-1} - z_c)^3 \right]}{3 \sum_{i=1}^N \rho_i w_i h_i}} \end{aligned} \quad (9)$$

其中频率值的下标 1 表示第一阶谐振频率，cf 表示边界条件为悬臂梁。

基于上述线性方程组，可考虑利用一组除几何尺寸外其他材料参数均相同的多层复合悬臂梁测试结构来分别实测其一阶谐振频率，根据测得的一阶谐振频率及测试结构的尺寸参数可构建线性方程组，对方程组求解即可得到相应的多层薄膜结构各层的等效杨氏模量。

初始平直的多层薄膜双端固支梁在平衡点附近振动时，为线性、小形变振动。当梁横向振动时在高度上的位移为 $z(x,t)$ 时，其内部任意垂直于长度方向的某一横截面不仅仅受到由弯曲形成的内应力产生的弯矩和单位长度上的荷载所产生的弯矩，而且也受到轴向力 P 对横截面偏移平衡位置而产生的弯矩，该弯矩为 $Pz(x,t)$ ，上述关系可以描述为：

$$\kappa \overline{EI} = M + Pz(x,t) \quad (10)$$

在小形变振动条件下，微机械薄膜梁小角度弯曲的微分方程为：

$$\kappa = \frac{d^2 z(x,t)}{dx^2} \quad (11)$$

一段长度为 dx ，带有作用于其上的内作用力和惯性作用力的梁单元，其中剪力 V ，弯矩 M ，单位长度上梁的载荷 $p(x)$ 之间的关系为：

$$\frac{d^2 M}{dx^2} = \frac{dV}{dx} = p(x) \quad (12)$$

且对于横向振动的梁，单位长度上梁的载荷等于克服单位长度上梁的质量（即线性密度 $\overline{\rho A}$ ）与加速度产生的惯性力的载荷，即：

$$p(x) = -\overline{\rho A} \frac{\partial^2 z(x,t)}{\partial t^2} \quad (13)$$

将式 (10)，(11) 和 (13) 带入到式 (12) 中，最终得到：

$$\frac{\overline{EI}}{EI} \frac{\partial^4 z(x,t)}{\partial x^4} - \frac{\overline{\sigma A}}{\sigma A} \frac{\partial^2 z(x,t)}{\partial x^2} = -\frac{\overline{\rho A}}{\rho A} \frac{\partial^2 z(x,t)}{\partial t^2} \quad (14)$$

该方程即为微机械薄膜双端固支梁横向振动的微分方程。运用分离变量法对该式进行求解。设 $z(x,t)=Z(x)T(t)$ ，代入式 (14)，可以得到幅度 $Z(x)$ 的通解为：

$$Z(x) = C_1 \sin(\lambda_1 x) + C_1 \cos(\lambda_1 x) + C_3 \sinh(\lambda_2 x) + C_4 \cosh(\lambda_2 x) \quad (15)$$

其中 $\lambda_1 = \sqrt{(\sqrt{\beta_1^2 + 4\beta_2} - \beta_1)/2}$ ， $\lambda_2 = \sqrt{(\sqrt{\beta_1^2 + 4\beta_2} + \beta_1)/2}$ ， $\beta_1 = \frac{\overline{\sigma A}}{EI}$ ， $\beta_2 = \frac{\overline{\rho A}}{EI} \omega^2$ 。

可以考虑将薄膜双端固支梁的一阶谐振模态假设为余弦函数的形状，即 $Z_1(x)=b/l-$

$\cos(2\pi x/l)]$ 。对于此形式存在以下关系：

$$Z_1^{(4)}(x) = -\frac{4\pi^2}{l^2} Z_1''(x) \quad (16)$$

将该关系式代入到幅度 $Z(x)$ 的方程中，可以得到：

$$\left[\overline{EI} + \frac{l^2}{4\pi^2} \overline{\sigma A} \right] Z^{(4)}(x) - \omega^2 \overline{\rho A} Z(x) = 0 \quad (17)$$

求解可以得到存在残余应力的初始平直的多层薄膜双端固支梁的第一阶谐振频率的近似解析公式为：

$$f_{1s} = \frac{4.730^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{\overline{EI}}{\rho A} + \frac{l^2}{4\pi^2} \frac{\overline{\sigma A}}{\rho A}} \quad (18)$$

其中频率值的下标 1 表示第一阶谐振频率，s 表示释放后保持平直。

由上式可以看出，多层双端固支梁的一阶谐振频率与梁的材料参数和结构几何尺寸有关。在此基础上，可以将多层双端固支梁的一阶谐振频率视为由上式确定的关于杨氏模量和残余应力的隐函数：

$$f_{1s} = \frac{4.730^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \tilde{E}_i w_i [(\sum_{i=0}^i h_i - z_c)^3 - (\sum_{i=0}^{i-1} h_i - z_c)^3]}{3 \sum_{i=1}^N \rho_i w_i h_i} + \frac{l^2}{4\pi^2} \frac{\sum_{i=1}^N \tilde{\sigma}_i w_i h_i}{\sum_{i=1}^N \rho_i w_i h_i}} \quad (19)$$

式中， l 为所述 N 层复合双端固支梁的长度；第 i 层薄膜材料的宽度为 w_i ，厚度为 h_i ，材料密度为 ρ_i ，等效杨氏模量为 $\tilde{E}_i$ ，等效残余应力为 $\tilde{\sigma}_i$ ； z_c 是中性面高度。

基于上述隐函数，可考虑利用一组除几何尺寸外其他材料参数均相同的多层复合双端固支梁测试结构来分别实测其一阶谐振频率，根据测得的一阶谐振频率及测试结构的尺寸参数可构建非线性方程组，对方程组求解即可得到多层复合双端固支梁各层的等效杨氏模量和各层的等效残余应力。

然而考虑到非线性方程组的求解较困难，为了降低计算复杂度，可考虑先利用多层复合悬臂梁测试结构获得多层薄膜结构各层的等效杨氏模量，然后利用多层复合双端固支梁测试结构以及已获得的多层薄膜结构各层的等效杨氏模量，来计算出多层膜结构各层的等效残余应力。综上即可得到本发明技术方案：

步骤 1、采用所述多层复合薄膜结构的制备工艺制备一组至少 N 个初始平直的 N 层复合悬臂梁测试结构以及一组至少 N 个初始平直的 N 层复合双端固支梁测试结构，各测试结

构除几何尺寸外的其他材料参数均相同；对于每一组测试结构，以每个测试结构的各层宽度及长度所组成的向量作为该测试结构的尺寸向量，则这一组测试结构的尺寸向量组线性无关；

步骤 2、测量出每个测试结构的一阶谐振频率；

步骤 3、将 N 层复合悬臂梁测试结构的一阶谐振频率分别代入 N 层复合悬臂梁一阶谐振频率表达式，即式 (9)，从而得到由至少 N 个线性方程构成的方程组；对所述方程组求解，得到所述多层复合薄膜结构各层的等效杨氏模量；

步骤 4、将 N 层复合双端固支梁测试结构的一阶谐振频率以及步骤 3 所得到的多层复合薄膜结构各层的等效杨氏模量分别代入 N 层复合双端固支梁一阶谐振频率表达式，即式 (19)，从而得到由至少 N 个方程构成的方程组；对所述方程组求解，得到所述多层复合薄膜结构各层的等效残余应力。

为了进一步帮助公众理解，下面以最简单的双层膜结构为例来对本发明技术方案进行进一步说明。

步骤 1、采用所述双层复合薄膜结构的制备工艺制备一组至少 2 个初始平直的双层复合悬臂梁测试结构以及一组至少 2 个初始平直的双层复合双端固支梁测试结构，各测试结构除几何尺寸外的其他材料参数均相同；对于每一组测试结构，以每个测试结构的各层宽度及长度所组成的向量作为该测试结构的尺寸向量，则这一组测试结构的尺寸向量组线性无关；

所制备的双层复合悬臂梁测试结构如图 1a、图 1b 所示，所制备的双层复合双端固支梁测试结构如图 2a、图 2b 所示，均包括顶层 102 和底层 103，图中的 101 为锚区，104 为衬底。

对于由双层薄膜材料构成的双层复合悬臂梁，有 2 个需要求解的材料力学特性参数，这时需要至少 2 个不同尺寸的双层复合悬臂梁测试结构。假使以每个测试结构的各层宽度及长度所组成的向量作为该测试结构的尺寸向量，要使得构建的方程组有解，则所有测试结构的尺寸向量组必须满足线性无关。

类似地，对于由双层薄膜材料构成的双层复合双端固支梁，由于各层等效杨氏模量已知，因此仅剩各层的等效残余应力为未知参数，这时需要至少 2 个不同尺寸的双层复合双端固支梁测试结构。同样的，假使以每个测试结构的各层宽度及长度所组成的向量作为该测试结构的尺寸向量，要使得构建的方程组有解，则所有测试结构的尺寸向量组必须满足线性无关。

为了简化测试结构的制备以及计算过程，本实施例中，每一组中的两个测试结构除底层宽度不同外，两个测试结构的其余部分完全相同。

步骤 2、测量出每个测试结构的一阶谐振频率；

一阶谐振频率的测量可采用现有的各种技术实现，例如静电激励法，热激励法，声波激励法等。本实施例中利用德国 Polytech 公司的 MSV-400-M2 型激光多普勒测振仪 (LDV) 对测试结构进行谐振频率测试。具体做法是：将压电陶瓷 (PZT) 平放于 LDV 测试视场区域，把待测试样品芯片粘贴在 PZT 上，使用外加电压信号驱使 PZT 发生振动，芯片在 PZT 的激励下将机械振动信号传递给测试结构，并通过测试结构的锚区将激励信号传给梁结构，最终形成振动力学中的基底激励形式，或称为惯性力激励形式。理想情况下，衬底激励的频谱应该尽可能的平缓，谐振梁在全波段范围内受到均匀的激励发生受迫振动，在本征频率附近因为选频放大作用而产生谐振，在振动频谱上形成谐振峰。假设其中两个双层复合悬臂梁测试结构的一阶谐振频率分别为 f_1 、 f_2 ，两个双层复合双端固支梁测试结构的一阶谐振频率分别为 f_3 、 f_4 。

步骤 3、将双层复合悬臂梁测试结构的一阶谐振频率分别代入双层复合悬臂梁一阶谐振频率表达式，即式 (9)，从而得到由至少 2 个线性方程构成的方程组；对所述方程组求解，得到所述双层复合薄膜结构各层的等效杨氏模量；

假设 2 个测试结构的长度为 l_1 ，每层厚度是 h ，顶层宽度均为 w_1 ，底层宽度分别是 w_2 和 w_3 且 $w_2 \neq w_3$ 。则根据式 (8) 可得到如下所示的方程组：

$$\begin{cases} f_{1cf}(\tilde{E}_1, \tilde{E}_2, w_1, w_2, l_1) = f_1 \\ f_{1cf}(\tilde{E}_1, \tilde{E}_2, w_1, w_3, l_1) = f_2 \end{cases}$$

其中， $\tilde{E}_1, \tilde{E}_2$ 分别为顶层、底层的等效杨氏模量。

因为上式是关于双层悬臂梁一阶谐振频率的线性解析公式，只对应一个频率值（即一阶谐振频率），所以由该式根据已知频率和几何尺寸对材料的力学参数进行求解可以得到有限组关于杨氏模量的实数解和复数解，其中复数解不符合实际情况，而在一般情况下在工程应用中剩下仅有的几组实数解中符合材料参数通常值取值范围的唯一一组解可以很明显被识别出来。计算出的顶层、底层的等效杨氏模量即为采用相同制备工艺制备的双层复合膜结构中的上层、下层的等效杨氏模量。

步骤 4、将双层复合双端固支梁测试结构的一阶谐振频率以及步骤 3 所得到的双层复合薄膜结构各层的等效杨氏模量分别代入双层复合双端固支梁一阶谐振频率表达式，即式 (19)，

从而得到由至少 2 个方程构成的方程组；对所述方程组求解，得到所述双层复合薄膜结构各层的等效残余应力；

假设两个双层复合双端固支梁测试结构的长度都为 l_2 ，顶层宽度均为 w_4 ，两个测试结构的底层宽度分别为 w_5 和 w_6 且 $w_5 \neq w_6$ ，将已经求解得到的等效杨氏模量带入到方程组中并求解，就可以得到测试结构的各层等效残余应力，方程组如下所示：

$$\begin{cases} f_{1s}(\tilde{E}_1, \tilde{E}_2, \tilde{\sigma}_1, \tilde{\sigma}_2, w_4, w_5, l_2) = f_3 \\ f_{1s}(\tilde{E}_1, \tilde{E}_2, \tilde{\sigma}_1, \tilde{\sigma}_2, w_4, w_6, l_2) = f_4 \end{cases}$$

计算出的顶层、底层的等效残余应力即为采用相同制备工艺制备的双层复合薄膜结构中的上层、下层的等效残余应力。

权利要求书

1、多层复合薄膜结构的力学参数测量方法，所述多层复合薄膜结构为初始平直的 N 层复合薄膜结构，N 为大于等于 2 的整数；其特征在于，包括以下步骤：

步骤 1、采用所述多层复合薄膜结构的制备工艺制备一组至少 N 个初始平直的 N 层复合悬臂梁测试结构以及一组至少 N 个初始平直的 N 层复合双端固支梁测试结构，各测试结构除几何尺寸外的其他材料参数均相同；对于每一组测试结构，以每个测试结构的各层宽度及长度所组成的向量作为该测试结构的尺寸向量，则这一组测试结构的尺寸向量组线性无关；

步骤 2、测量出每个测试结构的一阶谐振频率；

步骤 3、将 N 层复合悬臂梁测试结构的一阶谐振频率分别代入 N 层复合悬臂梁一阶谐振频率表达式，从而得到由至少 N 个线性方程构成的方程组；对所述方程组求解，得到所述多层复合薄膜结构各层的等效杨氏模量；所述 N 层复合悬臂梁一阶谐振频率 f_{1cf} 的表达式具体如下：

$$f_{1cf} = \frac{1.875^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \tilde{E}_i w_i \cdot [(z_i - z_c)^3 - (z_{i-1} - z_c)^3]}{3 \sum_{i=1}^N \rho_i w_i h_i}}$$

式中， l 为所述 N 层复合悬臂梁测试结构的长度；第 i 层薄膜材料的宽度为 w_i ，厚度为 h_i ，材料密度为 ρ_i ，等效杨氏模量为 $\tilde{E}_i$ ； z_i 为第 i 层薄膜材料的顶面在 z 轴上的位置， z_c 是中性面高度；

步骤 4、将 N 层复合双端固支梁测试结构的一阶谐振频率以及步骤 3 所得到的多层复合薄膜结构各层的等效杨氏模量分别代入 N 层复合双端固支梁一阶谐振频率表达式，从而得到由至少 N 个方程构成的方程组；对所述方程组求解，得到所述多层复合薄膜结构各层的等效残余应力；所述 N 层复合双端固支梁一阶谐振频率 f_{1s} 的表达式具体如下：

$$f_{1s} = \frac{4.730^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \tilde{E}_i w_i [(\sum_{i=0}^i h_i - z_c)^3 - (\sum_{i=0}^{i-1} h_i - z_c)^3]}{3 \sum_{i=1}^N \rho_i w_i h_i}} + \frac{l^2 \sum_{i=1}^N \tilde{\sigma}_i w_i h_i}{4\pi^2 \sum_{i=1}^N \rho_i w_i h_i}}$$

式中， l 为所述 N 层复合双端固支梁测试结构的长度；第 i 层薄膜材料的宽度为 w_i ，厚度

为 h_i ，材料密度为 ρ_i ，等效杨氏模量为 $\tilde{E}_i$ ，等效残余应力为 $\tilde{\sigma}_i$ ； z_c 是中性面高度。

2、多层复合薄膜结构的力学参数测量装置，所述多层复合膜结构为初始平直的 N 层复合膜结构，N 为大于等于 2 的整数；其特征在于，该装置包括：

一组至少 N 个初始平直的 N 层复合悬臂梁测试结构，采用所述多层复合薄膜结构的制备工艺制备，各测试结构除几何尺寸外的其他材料参数均相同；以每个测试结构的各层宽度及长度所组成的向量作为该测试结构的尺寸向量，则这一组测试结构的尺寸向量组线性无关；

一组至少 N 个初始平直的 N 层复合双端固支梁测试结构，采用所述多层复合薄膜结构的制备工艺制备，各测试结构除几何尺寸外的其他材料参数均相同；以每个测试结构的各层宽度及长度所组成的向量作为该测试结构的尺寸向量，则这一组测试结构的尺寸向量组线性无关；

谐振频率测量单元，用于测量每个测试结构的一阶谐振频率；

计算单元，用于将 N 层复合悬臂梁测试结构的一阶谐振频率分别代入 N 层复合悬臂梁一阶谐振频率表达式，从而得到由至少 N 个线性方程构成的方程组，并对所述方程组求解，得到所述多层复合薄膜结构各层的等效杨氏模量；然后将 N 层复合双端固支梁测试结构的一阶谐振频率以及多层复合薄膜结构各层的等效杨氏模量分别代入 N 层复合双端固支梁一阶谐振频率表达式，从而得到由至少 N 个方程构成的方程组，并对所述方程组求解，得到所述多层复合薄膜结构各层的等效残余应力；其中，

所述 N 层复合悬臂梁一阶谐振频率 f_{lcf} 的表达式具体如下：

$$f_{lcf} = \frac{1.875^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \tilde{E}_i w_i \cdot \left[(z_i - z_c)^3 - (z_{i-1} - z_c)^3 \right]}{3 \sum_{i=1}^N \rho_i w_i h_i}}$$

式中， l 为所述 N 层复合悬臂梁测试结构的长度；第 i 层薄膜材料的宽度为 w_i ，厚度为 h_i ，材料密度为 ρ_i ，等效杨氏模量为 $\tilde{E}_i$ ； z_i 为第 i 层薄膜材料的顶面在 z 轴上的位置， z_c 是中性面高度；

所述 N 层复合双端固支梁一阶谐振频率 f_{ls} 的表达式具体如下：

$$f_{1s} = \frac{4.730^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \tilde{E}_i w_i [(\sum_{i=0}^i h_i - z_c)^3 - (\sum_{i=0}^{i-1} h_i - z_c)^3]}{3 \sum_{i=1}^N \rho_i w_i h_i}} + \frac{l^2 \sum_{i=1}^N \tilde{\sigma}_i w_i h_i}{4\pi^2 \sum_{i=1}^N \rho_i w_i h_i}$$

式中， l 为所述 N 层复合双端固支梁测试结构的长度；第 i 层薄膜材料的宽度为 w_i ，厚度为 h_i ，材料密度为 ρ_i ，等效杨氏模量为 $\tilde{E}_i$ ，等效残余应力为 $\tilde{\sigma}_i$ ； z_c 是中性面高度。

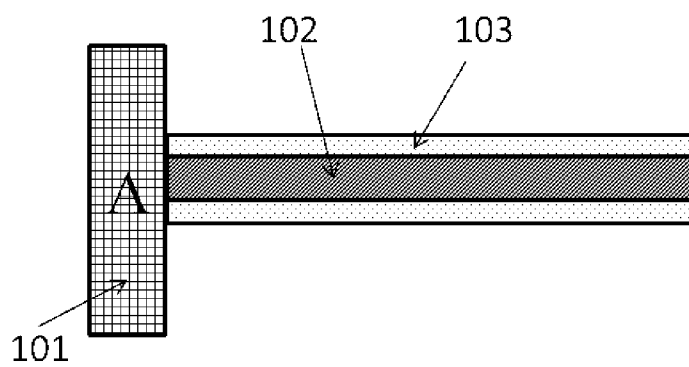


图 1a

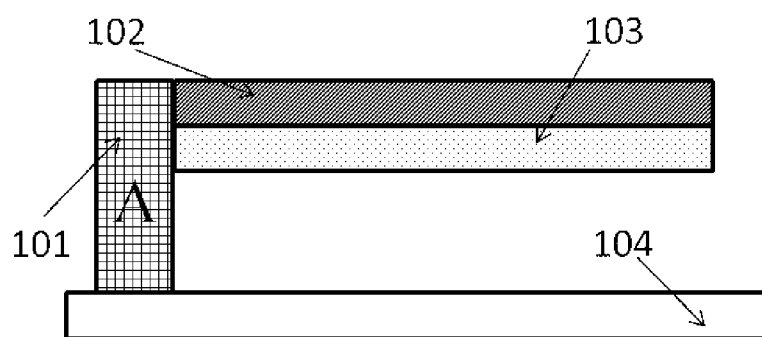


图 1b

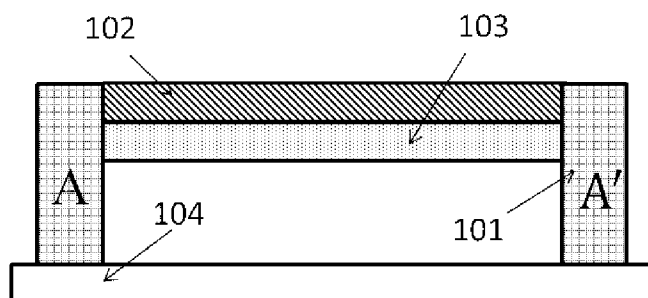
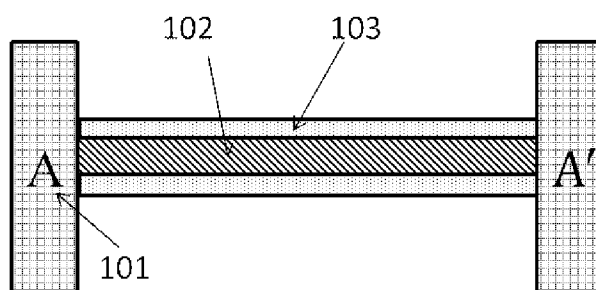


图 2b

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2018/076248

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01N 3/00 (2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01N

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNPAT, CNKI, WPI, EPODOC: 东南大学, 周再发, 复合 4d 膜, 薄膜, 力学, 多层, 层 s 膜, 杨氏模量, 等效残余应力, 悬臂梁, 固支梁, 谐振频率, multilayer?, layer?, mems, stress, microbeams, beam?, residual stress, young's modulus, resonant frequency

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 107063839 A (SOUTHEAST UNIVERSITY), 18 August 2017 (18.08.2017), claims 1-2	1-2
A	聂萌, "MEMS 多层膜力学参数在线提取方法的研究", 东南大学博士学位论文, 17 March 2008 (17.03.2008), chapter 3, (Doctoral Dissertations of Southeast University), non-official translation (NIE, Meng; Study on In-situ Extracting Method for MEMS Multilayer Mechanical Parameter)	1-2
A	CN 101769898 A (NANJING NORMAL UNIVERSITY), 07 July 2010 (07.07.2010), entire document	1-2
A	CN 106353404 A (SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY), 25 January 2017 (25.01.2017), entire document	1-2
A	US 2013330232 A1 (THE GOVERNMENT OF THE UNITED STATES OF AMERICA, AS REPRESENTED BY THE SECRETARY OF THE NAVY), 12 December 2013 (12.12.2013), entire document	1-2
A	CN 102374948 A (EAST CHINA NORMAL UNIVERSITY), 14 March 2012 (14.03.2012), entire document	1-2

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	"&" document member of the same patent family
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search 04 April 2018	Date of mailing of the international search report 28 April 2018
Name and mailing address of the ISA State Intellectual Property Office of the P. R. China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088, China Facsimile No. (86-10) 62019451	Authorized officer WANG, Yi Telephone No. (86-10) 53962417

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2018/076248

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	SOMA, A. et al., "Residual stress measurement method in MEMS microbeams using frequency shift data", Journal of Micromechanics and Microengineering, vol. 19, 01 September 2009 (01.09.2009), pages 1-16	1-2

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2018/076248

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 107063839 A	18 August 2017	None	
CN 101769898 A	07 July 2010	CN 101769898 B	15 June 2011
CN 106353404 A	25 January 2017	None	
US 2013330232 A1	12 December 2013	US 2015323466 A1	12 November 2015
		US 9335271 B2	10 May 2016
		WO 2010111229 A1	30 September 2010
		US 8848197 B2	30 September 2014
		US 2010238454 A1	23 September 2010
		US 8542365 B2	24 September 2013
CN 102374948 A	14 March 2012	None	

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2018/076248

A. 主题的分类 G01N 3/00 (2006.01) i 按照国际专利分类 (IPC) 或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类																							
B. 检索领域 检索的最低限度文献 (标明分类系统和分类号) G01N 包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献 在国际检索时查阅的电子数据库 (数据库的名称, 和使用的检索词 (如使用)) CNPAT, CNKI, WPI, EPODOC: 东南大学, 周再发, 复合 4d 膜, 薄膜, 力学, 多层, 层 s 膜, 杨氏模量, 等效残余应力, 悬臂梁, 固支梁, 谐振频率, multilayer?, layer?, mems, stress, microbeams, beam?, residual stress, young's modulus, resonant frequency																							
C. 相关文件 <table border="1"> <thead> <tr> <th>类 型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PX</td> <td>CN 107063839 A (东南大学) 2017年 8月 18日 (2017 - 08 - 18) 权利要求1-2</td> <td>1-2</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>聂萌. "MEMS多层膜力学参数在线提取方法的研究" 东南大学博士学位论文, 2008年 3月 17日 (2008 - 03 - 17), 第三章</td> <td>1-2</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 101769898 A (南京师范大学) 2010年 7月 7日 (2010 - 07 - 07) 全文</td> <td>1-2</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 106353404 A (上海交通大学) 2017年 1月 25日 (2017 - 01 - 25) 全文</td> <td>1-2</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>US 2013330232 A1 (THE GOVERNMENT OF THE UNITED STATES OF AMERICA, AS REPRESENTED BY THE SECRETARY OF THE NAVY) 2013年 12月 12日 (2013 - 12 - 12) 全文</td> <td>1-2</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 102374948 A (华东师范大学) 2012年 3月 14日 (2012 - 03 - 14) 全文</td> <td>1-2</td> </tr> </tbody> </table>			类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	PX	CN 107063839 A (东南大学) 2017年 8月 18日 (2017 - 08 - 18) 权利要求1-2	1-2	A	聂萌. "MEMS多层膜力学参数在线提取方法的研究" 东南大学博士学位论文, 2008年 3月 17日 (2008 - 03 - 17), 第三章	1-2	A	CN 101769898 A (南京师范大学) 2010年 7月 7日 (2010 - 07 - 07) 全文	1-2	A	CN 106353404 A (上海交通大学) 2017年 1月 25日 (2017 - 01 - 25) 全文	1-2	A	US 2013330232 A1 (THE GOVERNMENT OF THE UNITED STATES OF AMERICA, AS REPRESENTED BY THE SECRETARY OF THE NAVY) 2013年 12月 12日 (2013 - 12 - 12) 全文	1-2	A	CN 102374948 A (华东师范大学) 2012年 3月 14日 (2012 - 03 - 14) 全文	1-2
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求																					
PX	CN 107063839 A (东南大学) 2017年 8月 18日 (2017 - 08 - 18) 权利要求1-2	1-2																					
A	聂萌. "MEMS多层膜力学参数在线提取方法的研究" 东南大学博士学位论文, 2008年 3月 17日 (2008 - 03 - 17), 第三章	1-2																					
A	CN 101769898 A (南京师范大学) 2010年 7月 7日 (2010 - 07 - 07) 全文	1-2																					
A	CN 106353404 A (上海交通大学) 2017年 1月 25日 (2017 - 01 - 25) 全文	1-2																					
A	US 2013330232 A1 (THE GOVERNMENT OF THE UNITED STATES OF AMERICA, AS REPRESENTED BY THE SECRETARY OF THE NAVY) 2013年 12月 12日 (2013 - 12 - 12) 全文	1-2																					
A	CN 102374948 A (华东师范大学) 2012年 3月 14日 (2012 - 03 - 14) 全文	1-2																					
☒ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 见同族专利附件。																							
* 引用文件的具体类型: "A" 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 "E" 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 "L" 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) "O" 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 "P" 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件 "T" 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 "X" 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 "Y" 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 "&" 同族专利的文件																							
国际检索实际完成的日期 2018年 4月 4日		国际检索报告邮寄日期 2018年 4月 28日																					
ISA/CN的名称和邮寄地址 中华人民共和国国家知识产权局 (ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10)62019451		受权官员 王毅 电话号码 (86-10)53962417																					

C. 相关文件		
类 型*	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
A	SOMÀ, Aurelio等. "Residual stress measurement method in MEMS microbeams using frequency shift data" JOURNAL OF MICROMECHANICS AND MICROENGINEERING, 第19卷, 2009年 9月 1日 (2009 - 09 - 01), 第1-16页	1-2

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2018/076248

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	107063839	A	2017年 8月 18日	无			
CN	101769898	A	2010年 7月 7日	CN	101769898	B	2011年 6月 15日
CN	106353404	A	2017年 1月 25日	无			
US	2013330232	A1	2013年 12月 12日	US	2015323466	A1	2015年 11月 12日
				US	9335271	B2	2016年 5月 10日
				WO	2010111229	A1	2010年 9月 30日
				US	8848197	B2	2014年 9月 30日
				US	2010238454	A1	2010年 9月 23日
				US	8542365	B2	2013年 9月 24日
CN	102374948	A	2012年 3月 14日	无			