

(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 3 月 1 日 (01.03.2018)



(10) 国际公布号
WO 2018/035964 A1

- (51) 国际专利分类号:
G01L 5/00 (2006.01) **G01N 3/08** (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2016/104186
- (22) 国际申请日: 2016 年 11 月 1 日 (01.11.2016)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201610704449.5 2016年8月22日 (22.08.2016) CN
- (71) 申请人: 东南大学 (SOUTHEAST UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国江苏省南京市玄武区四牌楼2号, Jiangsu 210096 (CN)。
- (72) 发明人: 顾一帆 (GU, Yifan); 中国江苏省南京市玄武区四牌楼2号, Jiangsu 210096 (CN)。周再发 (ZHOU, Zaifa); 中国江苏省南京市玄武区四牌楼2号, Jiangsu 210096 (CN)。黄庆安 (HUANG, Qingan); 中国江苏省南京市玄武区四牌楼2号, Jiangsu 210096 (CN)。李伟华

(LI, Weihua); 中国江苏省南京市玄武区四牌楼2号, Jiangsu 210096 (CN)。

- (74) 代理人: 南京经纬专利商标代理有限公司 (NANJING JINGWEI PATENT & TRADEMARK AGENCY CO., LTD); 中国江苏省南京市鼓楼区中山路179号12楼B座, 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, JP, KE, KG, 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。
- (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,

(54) Title: ONLINE MEASUREMENT METHOD AND MEASUREMENT APPARATUS FOR RESIDUAL STRESS OF CONDUCTIVE THIN-FILM MATERIAL

(54) 发明名称: 一种导电薄膜材料残余应力的在线测量方法及测量装置

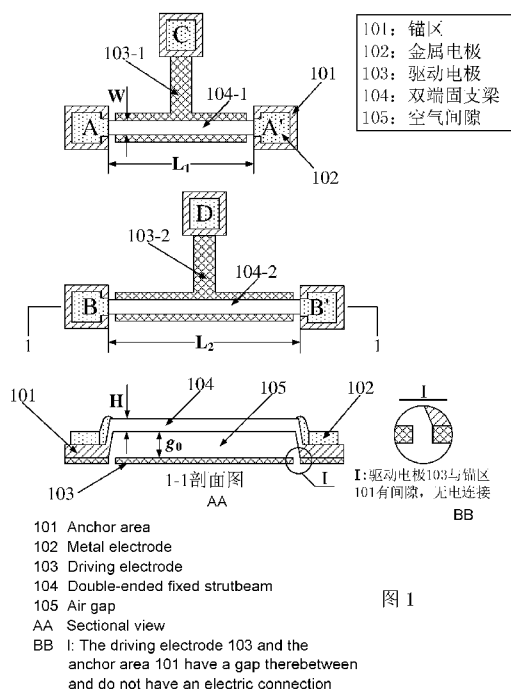


图 1

(57) Abstract: An online measurement method and measurement apparatus for a residual stress of a conductive thin-film material (1). The method comprises: using an electrostatic driving pull-in principle to design a measurement structure; using synchronous processing to control relevance between parameters of two measurement members (104-1, 104-2); by means of limiting relevant parameters of total strain energy of the two measurement members (104-1, 104-2), constraining a partial differential equation set of the total strain energy thereof; and by means of solving the partial differential equation set, obtaining unknown numerical values of residual stress σ_0 and Young's modulus E of the two measurement members (104-1, 104-2).

(57) 摘要: 一种导电薄膜材料(1)残余应力的在线测量方法及其对应的测量装置。利用静电驱动Pull-in(吸合)原理设计测量结构, 并通过采用同步加工控制两个测量件(104-1、104-2)的参数的相关性, 通过限制两个测量件(104-1、104-2)总应变能的相关参数, 进而约束其总应变能的偏微分方程组, 通过求解偏微分方程组的方式得到两测量件(104-1、104-2)未知的残余应力 σ_0 和杨氏模量 E 数值。

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)。

本国际公布：

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

一种导电薄膜材料残余应力的在线测量方法及测量装置

技术领域

本发明涉及导电薄膜在线测量领域,尤其涉及在线测量导电薄膜材料残余应力的测量领域。

背景技术

微机电器件的性能与材料物理参数有密切的关系,而制造微机电器件的材料物理参数又与制造工艺过程有关。即材料的制造工艺过程不同,其物理参数也将不同。在线测量目的就在于实时地测量由具体工艺制造的微机电材料物理参数。

微机电器件结构的基本的材料通常是薄膜材料,通常通过化学气相沉积(CVD)方法制备得到。残余应力是材料的重要物理参数,对微机电器件的性能有着显著的影响。通常,残余应力可以通过制作测量样品由专门的仪器进行离线测量。但离线测量方法无法实时得到材料的物理参数,并且会提高测量成本。因而,微机电产品的制造厂商希望能够在工艺线内通过通用的测量仪器进行在线测量,以及时反映工艺控制水平。因此,在线测量成为工艺监控的必要手段。

传统的方法中,为了测得材料的残余应力,首先需要测得材料的杨氏模量。杨氏模量的测量通常通过施加电压产生静电力来驱动梁结构发生 Pull-in (吸合) 现象而得到。而残余应力的测量则需要额外的测量结构。在线测量通常需要通过特殊的结构和计算以提取材料的物理参数。采用电学激励和电学测量的方法,通过测量得到电学量再配合有针对性的计算方法,才能能够得到材料的物理参数。但是测量结构通常只针对张应力状态或者只针对压应力状态而设计,无法在未知材料参数、未知残余应力的正负(张应力或压应力)情况下进行测量。

本发明提出了一组测量结构和一种微机电系统导电薄残余应力的计算方法,在未知材料参数的基础下,对测量结构进行简单的电压扫描

激励并测量 Pull-in (吸合) 电压, 将测量得到的相应电压代入计算公式, 利用结构关联性消去其他参数影响, 即可最终得到微机电系统导电薄膜材料的残余应力及杨氏模量。这种方法对于压应力或张应力同样适用, 不受限制于加工工艺条件。

发明内容

为了解决现有技术存在的不足, 本发明的目的在于提供一种微机电系统 (Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS) 导电薄膜材料残余应力的在线测量方法及测量装置。通过静电驱动待测材料产生 Pull-in (吸合) 现象, 通过对一组简单的双端固支梁 Pull-in (吸合) 电压测量, 在未知材料参数、未知残余应力的的大小和正负 (张应力或压应力) 情况下, 通过计算测得导电薄膜材料的残余应力及杨氏模量。

首先, 为实现上述目的, 提出一种导电薄膜材料残余应力的测量方法, 其特征在于, 步骤如下:

第一步, 将长度为 L_1 、宽度为 W 、厚度为 H 的第一测量件 (104-1) 安装在第一驱动电极 (103-1) 的上方, 将长度为 L_2 的、宽度为 W 、厚度为 H 的第二测量件 (104-2) 安装在第二驱动电极 (103-2) 的上方;

第二步, 向第一驱动电极 (103-1) 施加缓慢增大的驱动电压, 并实时监测第一驱动电极 (103-1) 与第一测量件 (104-1) 之间的电阻值, 当第一驱动电极 (103-1) 与第一测量件 (104-1) 之间的电阻值跳变为有限值时 (即发生吸合现象), 记录跳变瞬间第一驱动电极 (103-1) 上所施加的驱动电压为第一吸合电压 U_{PI1} ;

第三步, 向第二驱动电极 (103-2) 施加缓慢增大的驱动电压, 并实时监测第二驱动电极 (103-2) 与第二测量件 (104-2) 之间的电阻值, 当第二驱动电极 (103-2) 与第二测量件 (104-2) 之间的电阻值跳变为有限值时 (即发生吸合现象), 记录跳变瞬间第二驱动电极 (103-2) 上所施加的驱动电压为第二吸合电压 U_{PI2} ;

第四步, 对第一测量件和第二测量件分别进行准静态的能量法分

析：

$$\begin{aligned}
 P &= P_\varepsilon + P_e \\
 &= \frac{E \cdot w}{2} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \left(\int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \varepsilon_{total}^2 dx \right) dz + \frac{\varepsilon_e \cdot w \cdot U^2}{2} \cdot \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \frac{1}{g_0 - \omega} dx \\
 \varepsilon_{total} &= \varepsilon_{bending} + \varepsilon_{stretching} + \varepsilon_{residual} \\
 &= -z \cdot \frac{d^2 \omega}{dx^2} + \frac{1}{2l} \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \left(\frac{d\omega}{dx} \right)^2 dx + \frac{\sigma_0}{E} \\
 \omega(x) &= \frac{c}{2} \cdot \left(1 + \cos \left(\frac{2\pi x}{l} \right) \right)
 \end{aligned}$$

其中， ε_e 为空气的介电常数， w 为测量件的宽度， U 为施加的电压， g_0 为测量件与驱动电极之间空气间隙的厚度， x 为测量件长度方向上的位置， l 为测量件的总长度， z 为在测量件厚度方向上的位置， σ_0 为残余应力， E 为杨氏模量， $\omega(x)$ 为挠度函数， c 为幅度值，即测量件中心位置的挠度；

将第一、第二测量件的宽度 W 带入试件的宽度 w ，将第一吸合电压 $UPI1$ 和第二吸合电压 $UPI2$ 分别带入施加的电压 U ，将第一测量件的长度 $L1$ 和第二测量件的长度 $L2$ 分别带入测量件的总长度 l ；

第五步，根据第四步的公式带入求解下面的偏微分方程组：

$$\begin{cases} \frac{dP_1}{dc_1} = 0, \frac{d^2 P_1}{dc_1^2} = 0 \\ \frac{dP_2}{dc_2} = 0, \frac{d^2 P_2}{dc_2^2} = 0 \end{cases}$$

其中，下标 1 代表第四步的公式带入第一测量件参数所得到的方程，下标 2 代表第四步的公式带入第二测量件参数所得到的方程；根据初始的驱动电压为 0 得到初始的测量件中心位置的挠度为：

$$c_0 = \pm \frac{2\sqrt{-h^2 \pi^2 E - 3l^2 \sigma_0}}{\sqrt{3E} \cdot \pi}, \text{ 求解计算上述偏微分方程组即得到残余应力}$$

σ_0 和杨氏模量 E 。

同时，本发明所述测量方法所对应的测量装置，测量装置由 2 个

多晶硅材料制造的双端固支梁测量单元组成，分别为第一测量单元和第二测量结构单元；

第一测量单元，由设置在衬底上的第一驱动电极（103-1）、第一测量件（104-1）和三个锚区组成，三个锚区上分别设置金属电极，在此将三个锚区分别标记为 C、A、A'；第一驱动电极（103-1）为 T 型，三个锚区分别设置在第一驱动电极（103-1）的三个端部，其中只有位于第一驱动电极（103-1）对称轴线上的第一驱动锚区 C 与第一驱动电极（103-1）电连接，第一驱动电极（103-1）两端对称设置的第一接地锚区 A 和第二接地锚区 A' 与第一驱动电极（103-1）之间均无电连接；第一测量件（104-1）的两端架设在第一接地锚区 A 和第二接地锚区 A' 上，构成双端固支梁，第一测量件（104-1）位于第一驱动电极（103-1）的上方，第一测量件（104-1）与第一驱动电极（103-1）之间存在固定间距的空气间隙（105）；

第二测量单元与第一测量单元结构相同，两个测量单元的区别仅在于驱动电极和测量件的长度不同。根据选择工艺、材料等不同，测量件的尺寸设计也不同，为防止所需的吸合电压过高，或者过长的双端固支梁发生塌陷粘附等现象，通常情况下两个测量件的长度选择为 50 至 300 微米中的任意数值。

所述测量装置中，衬底由所述衬底由上表面淀积有二氧化硅、和氮化硅的半导体硅材料构成，驱动锚区和接地锚区的底层、驱动电极均由导电薄膜材料 1 组成，驱动锚区和接地锚区的上层、双端固支梁均由导电薄膜材料 2 组成，金属电极通过剥离工艺覆盖在驱动锚区和接地锚区上表面。

其中，所述的导电薄膜材料 1 和导电薄膜材料 2 为掺杂多晶硅或者金属；金属电极材料为金或铝。

所述的导电薄膜材料 1 为在衬底上淀积的一层 500 纳米厚度的多晶硅 Poly0；导电薄膜材料 2 为 2000 纳米厚度的多晶硅 Poly1，多晶硅

Poly1 采用 N 型掺杂，掺杂浓度为 50 欧姆/方。

有益效果

本发明通过两个双端固支梁组成一组测量结构，由于测量结构中的两个测量单元结构相同，仅仅在驱动电极和测量件的长度上有所区别。而且两个测量件由于经由完全相同的工艺条件因而两者可能影响结果的变量均为具有可控性的设计值，两者的参数具有关联性。本发明所提供的测量方法充分利用两个测量件参数的关联性，严格控制测量单元之间的其他参数，因而可以通过求解偏微分方程组的方式直接得出所需的材料参数。而不需要针对材料的残余应力种类（张应力、压应力）及杨氏模量而进行单独的测量。

同时，由于充分利用了静电力驱动的测量结构借助由同步加工而产生的关联性，本发明仅需要两个结构基本相同的测量单元即可不用区分残余应力种类而测量出具体的残余应力种类和大小。具有测量结构与测量方法都很简单，测量设备要求低，电信号加载和测量简便，计算方法仅限于简单数学方程，计算方法简便稳定的特点。

本测量方法中，测量单元的加工过程与微机电器件（MEMS）同步，没有特殊加工要求，完全符合在线测试的要求。在保证测量结果的实时性的同时，本发明简化了测量过程，测量效率更高。

本发明的其它特征和优点将在随后的说明书中阐述，并且，部分地从说明书中变得显而易见，或者通过实施本发明而了解。

附图说明

附图用来提供对本发明的进一步理解，并且构成说明书的一部分，并与本发明的实施例一起，用于解释本发明，并不构成对本发明的限制。在附图中：

图 1 为本发明的测量装置结构示意图；

图 2 为本发明测量装置加工中用到的版图；

图 3 为本发明测量结构在压应力作用下屈曲示意图；

图 4 为本发明所述测量方法的流程图。

具体实施方式

以下结合附图对本发明的优选实施例进行说明，应当理解，此处所描述的优选实施例仅用于说明和解释本发明，并不用于限定本发明。

图 1 为本发明的测量装置结构示意图，由 2 个多晶硅材料制造的双端固支梁测量单元组成，分别为第一测量单元和第二测量结构单元；第一测量单元，由设置在衬底上的第一驱动电极（103-1）、第一测量件（104-1）和三个锚区组成，三个锚区上分别设置金属电极，在此将三个锚区分别标记为 C、A、A'；第一驱动电极（103-1）为 T 型，三个锚区分别设置在第一驱动电极（103-1）的三个端部，其中只有位于第一驱动电极（103-1）对称轴线上的第一驱动锚区 C 与第一驱动电极（103-1）电连接，第一驱动电极（103-1）两端对称设置的第一接地锚区 A 和第二接地锚区 A' 与第一驱动电极（103-1）之间均无电连接；第一测量件（104-1）的两端架设在第一接地锚区 A 和第二接地锚区 A' 上，构成双端固支梁，第一测量件（104-1）位于第一驱动电极（103-1）的上方，第一测量件（104-1）与第一驱动电极（103-1）之间存在固定间距的空气间隙（105）；第二测量单元与第一测量单元结构相同，两个测量单元的区别仅在于驱动电极和测量件的长度不同。根据选择工艺、材料等不同，测量件的尺寸设计也不同，为防止所需的吸合电压过高，或者过长的双端固支梁发生塌陷粘附等现象，通常情况下两个测量件的长度选择为 50 至 300 微米中的任意数值。

图 2 为本发明测量装置加工中用到的版图，下面通过 CMOS 兼容的工艺步骤来举例说明工艺流程：

1. 首先取 N 型半导体硅片，在 N 型半导体硅片上热生长 100 纳米厚度的二氧化硅层，再通过低压化学气相沉积工艺淀积一层 500 纳米厚度的氮化硅，由此构成所述衬底；

2. 在上述衬底上再淀积一层 500 纳米厚度的多晶硅 Poly0，通过光

刻工艺形成 T 形的驱动电极（103）图形，以及三个锚区的底层图形，刻蚀后得到的驱动电极图形与驱动锚区图形相连接，而与两个接地锚区相分离，如图 2 中 a 所示；

3. 在完成步骤 2 后，在整个硅片上淀积一层 2000 纳米厚度的磷硅玻璃（PSG）作为牺牲层（上一步的电极结构上也要进行沉淀），通过光刻工艺形成三个锚区图形，然后刻蚀形成牺牲层上三个锚区的空槽，三个锚区空槽重叠在步骤 2 中由 Poly0 构成的三个锚区底层图形之上，如图 2 中 b 所示；

锚区的底层与驱动电极同时沉积得到，锚区的底层用来把锚区垫高，从而使得最终双端固支梁（即测量件）和驱动电极之间的空气间隙距离 g_0 = 牺牲层的厚度。而牺牲层的目的是让后面的 Poly1 有一部分结构落上去，最后把牺牲层释放掉就可以得到悬空的 Poly1 结构。

4. 采用低压化学气相沉积工艺淀积一层 2000 纳米厚度的多晶硅 Poly1，对多晶硅进行 N 型掺杂，掺杂浓度控制在 50 欧姆/方左右，之后采用光刻工艺形成所有的测量结构图形，包括落在步骤 3 中三个锚区空槽中的 Poly1 锚区（101），以及落在牺牲层上方的 Poly1 梁结构（即测量件 104）。由于牺牲层留出了 3 个空槽，此时淀积的多晶硅 Poly1 有一部分会落入空槽中，而其他部分将留在牺牲层上表面，落入空槽中的材料构成锚区的上层。刻蚀留下的 Poly1 双端固支梁结构（104）与两个接地锚区相连，而与驱动锚区相分离，如图 2 中 c 所示；

5. 采用剥离工艺在形成金属电极（102），如图 2 中 d 所示。

图 2 中的 a 为底层，c 中的图形叠加在 a 上。为了让 c 中双端固支梁的两边固定而中间架空，需要在 a 和 c 之间夹上牺牲层 b。在牺牲层 b 上刻出空槽 2 以露出覆盖在下面的 a 的三个方块图形。这样 c 中的三个方块就能和 a 中的三个方块连接，而 c 中的那根梁（即双端固支梁结构，也就是测量件）因为落在了牺牲层上，而牺牲层上没给它开孔，因

此牺牲层释放掉之后，c 中测量件就成了悬空的。最后通过剥离工艺在三个锚区上都形成金属电极，方便测量时通电。

图 3 为本发明测量结构在压应力作用下屈曲示意图，当薄膜材料中的压应力达到一定值时，牺牲层释放之后，在压应力的作用下双端固支梁会发生屈曲现象。如果薄膜材料中的压应力并未达到屈曲的临界值，或者薄膜材料中的应力为张应力，则释放后双端固支梁仍然呈现平直状态。对于上述压应力状态下的薄膜以及张应力状态下的薄膜，本发明中的导电薄膜材料残余应力的测量方法均适用，且可以在未知残余应力性质的情况下进行求解，并根据结果中残余应力的正负状态得到残余应力的性质。

图 4 为本发明所述测量方法的流程图，测量时，第一步加工得到长度为 L_1 、宽度为 W 、厚度为 H 的第一测量件（104-1），它通过第一接地锚区 A 和第二接地锚区 A'（101）固定在第一驱动电极（103-1）的上方，测量件与驱动电极之间空气间隙（105）的厚度为 g_0 。同时，使用相同工艺过程制作出来第二测量件（104-2），它通过第二测量单元的第一接地锚区 B 和第二接地锚区 B' 固定在第二驱动电极（103-2）的上方。第二测量件与第一测量件相比，差别仅仅是长度不同，第二测量件的长度为 L_2 。

在第一步加工好两个测量件之后，第二步分别通过第一驱动锚区 C 上的电极向第一驱动电极（103-1）施加缓慢增大的驱动电压，同时，通过第二驱动锚区 D 上的电极向第二驱动电极（103-2）施加缓慢增大的驱动电压。同时，测量第一驱动电极（103-1）与第一测量件（104-1）之间的电阻值，同时测量第二驱动电极（103-2）与第二测量件（104-2）之间的电阻值，即 AC 间阻值和 BD 间阻值。在环境温度下，将 A-A' 端和 B-B' 端都接地电位（0V），在 C 端和 D 端接入一个一定范围内缓慢增大的电压扫描信号进行激励。此时，由于驱动锚区 C 或 D 与双端固支梁下方固定于衬底的驱动电极之间存在电气连接，因此驱动电极与上方

双端固支梁之间，即驱动电极与测量件之间存在静电力，测量件将因此而被向下吸引。当双端固支梁（即测量件）处于悬空状态时，由于其与下方的驱动电极并未发生接触，因此此时 AC 间或 BD 间的电阻值应该为无穷大。当驱动扫描电压增大至一定值时，由于测量件与下方驱动电极之间的静电力发生 Pull-in（吸合）现象，此时电阻会从无穷大跳变至一个有限值。

第三步，当第一驱动电极（103-1）与第一测量件之间的电阻值跳变为有限值时，记录跳变瞬间第一驱动电极（103-1）上施加的驱动电压为第一吸合电压 U_{PI1} ；同样的，当第二驱动电极（103-2）与第二测量件之间的电阻值跳变为有限值时，记录跳变瞬间第二驱动电极（103-2）上施加的驱动电压为第二吸合 U_{PI2} ；

第四步，对第一测量件和第二测量件分别进行准静态的能量法分析：

$$\begin{aligned}
 P &= P_{\varepsilon} + P_e \\
 &= \frac{E \cdot w}{2} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \left(\int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \varepsilon_{total}^2 dx \right) dz + \frac{\varepsilon_e \cdot w \cdot U^2}{2} \cdot \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \frac{1}{g_0 - \omega} dx \\
 \varepsilon_{total} &= \varepsilon_{bending} + \varepsilon_{stretching} + \varepsilon_{residual} \\
 &= -z \cdot \frac{d^2 \omega}{dx^2} + \frac{1}{2l} \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \left(\frac{d\omega}{dx} \right)^2 dx + \frac{\sigma_0}{E} \\
 \omega(x) &= \frac{c}{2} \cdot \left(1 + \cos \left(\frac{2\pi x}{l} \right) \right)
 \end{aligned}$$

其中， ε_e 为空气的介电常数， w 为测量件的宽度， U 为施加的电压， g_0 为测量件与驱动电极之间空气间隙的厚度， x 为测量件长度方向上的位置， l 为测量件的总长度， z 为在测量件厚度方向上的位置， σ_0 为残余应力， E 为杨氏模量， $\omega(x)$ 为挠度函数， c 为幅度值，即测量件中心位置的挠度；将第一、第二测量件的宽度 W 带入试件的宽度 w ，将第一吸合电压 U_{PI1} 和第二吸合电压 U_{PI2} 分别带入施加的电压 U ，将第一测量件的长度 L_1 和第二测量件的长度 L_2 分别带入测量件的总长度 l ，由此将

分别得到第一测量件的总应变能 P_1 和第二测量件的总应变能 P_2 ;

第五步, 根据第四步得到的 P_1 、 P_2 带入求解下面的偏微分方程组:

$$\begin{cases} \frac{dP_1}{dc_1} = 0, \frac{d^2P_1}{dc_1^2} = 0 \\ \frac{dP_2}{dc_2} = 0, \frac{d^2P_2}{dc_2^2} = 0 \end{cases}$$

其中, 根据初始的驱动电压为 0 得到初始的测量件中心位置的挠度为:

$$c_0 = \pm \frac{2\sqrt{-h^2\pi^2E - 3l^2\sigma_0}}{\sqrt{3E} \cdot \pi}, \text{ 求解计算偏微分方程组即得到残余应力 } \sigma_0 \text{ 和杨氏模量 } E。$$

观察以上公式可知, 仅有两个未知量, 即残余应力 σ_0 和杨氏模量 E , 并且该式有且仅有唯一组解。利用数值方法求解偏微分方程组, 即可求得残余应力 σ_0 和杨氏模量 E 。显然, 此方法没有特殊加工要求, 可以通用于存在张应力或者压应力的情况, 完全符合在线测试的要求。

本发明技术方案通过利用两个测量件的参数的关联性, 通过采用同步加工得到的两个测量件限制两个测量件总应变能的相关参数, 进而通过普通的求解偏微分方程组的方式得出偏微分方程组当中未知的残余应力 σ_0 和杨氏模量 E 数值。这样的测量方法不需要针对不同残余应力而选取不同的测量机构, 而是通过计算得到的残余应力 σ_0 的正负判断残余应力的种类。因而, 简化了测量和计算的步骤, 只需要通过电激励得到相应的吸合电压就能够计算, 测量效率更高。

本领域普通技术人员可以理解: 以上所述仅为本发明的优选实施例而已, 并不用于限制本发明, 尽管参照前述实施例对本发明进行了详细的说明, 对于本领域的技术人员来说, 其依然可以对前述各实施例记载的技术方案进行修改, 或者对其中部分技术特征进行等同替换。凡在本发明的精神和原则之内, 所作的任何修改、等同替换、改进等, 均应包含在本发明的保护范围之内。

权利要求书

1. 一种导电薄膜材料残余应力的测量方法，其特征在于，步骤如下：

第一步，将长度为 L_1 、宽度为 W 、厚度为 H 的第一测量件（104-1）安装在第一驱动电极（103-1）的上方，将长度为 L_2 的、宽度为 W 、厚度为 H 的第二测量件（104-2）安装在第二驱动电极（103-2）的上方；

第二步，向第一驱动电极（103-1）施加缓慢增大的驱动电压，并实时监测第一驱动电极（103-1）与第一测量件（104-1）之间的电阻值，当第一驱动电极（103-1）与第一测量件（104-1）之间的电阻值跳变为有限值时，记录跳变瞬间第一驱动电极（103-1）上所施加的驱动电压为第一吸合电压 U_{PI1} ；

第三步，同样的，向第二驱动电极（103-2）施加缓慢增大的驱动电压，并实时监测第二驱动电极（103-2）与第二测量件（104-2）之间的电阻值，当第二驱动电极（103-2）与第二测量件（104-2）之间的电阻值跳变为有限值时（即发生吸合现象），记录跳变瞬间第二驱动电极（103-2）上所施加的驱动电压为第二吸合电压 U_{PI2} ；

第四步，对第一测量件和第二测量件分别进行准静态的能量法分析：

$$\begin{aligned}
 P &= P_\varepsilon + P_e \\
 &= \frac{E \cdot w}{2} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \left(\int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \varepsilon_{total}^2 dx \right) dz + \frac{\varepsilon_e \cdot w \cdot U^2}{2} \cdot \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \frac{1}{g_0 - \omega} dx \\
 \varepsilon_{total} &= \varepsilon_{bending} + \varepsilon_{stretching} + \varepsilon_{residual} \\
 &= -z \cdot \frac{d^2 \omega}{dx^2} + \frac{1}{2l} \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \left(\frac{d\omega}{dx} \right)^2 dx + \frac{\sigma_0}{E} \\
 \omega(x) &= \frac{c}{2} \cdot \left(1 + \cos \left(\frac{2\pi x}{l} \right) \right)
 \end{aligned}$$

其中， ε_e 为空气的介电常数， w 为测量件的宽度， U 为施加的电压， g_0 为测量件与驱动电极之间空气间隙的厚度， x 为测量件长度方向上的位置， l 为测量件的总长度， z 为在测量件厚度方向上的位置， σ_0 为残余应力， E 为杨氏模量， $\omega(x)$ 为挠度函数， c 为测量件中心位置的挠度；

将第一、第二测量件的宽度 W 带入试件的宽度 w ，将第一吸合电压 U_{PI1} 和第二吸合电压 U_{PI2} 分别带入施加的电压 U ，将第一测量件的长度 L_1 和第二测量件的长度 L_2 分别带入测量件的总长度 l ；

第五步，根据第四步的公式带入求解下面的偏微分方程组：

$$\begin{cases} \frac{dP_1}{dc_1} = 0, \frac{d^2P_1}{dc_1^2} = 0 \\ \frac{dP_2}{dc_2} = 0, \frac{d^2P_2}{dc_2^2} = 0 \end{cases}$$

其中，下标 1 代表第四步的公式带入第一测量件参数所得到的方程，下标 2 代表第四步的公式带入第二测量件参数所得到的方程；根据初始的驱动电压

为 0 得到初始的测量件中心位置的挠度为： $c_0 = \pm \frac{2\sqrt{-h^2\pi^2E - 3l^2\sigma_0}}{\sqrt{3E} \cdot \pi}$ ，求解计

算上述偏微分方程组得到残余应力 σ_0 和杨氏模量 E 。

2. 一种导电薄膜材料残余应力的测量装置，其特征在于，测量装置由 2 个导电薄膜材料制造的双端固支梁测量单元组成，分别为第一测量单元和第二测量单元；

第一测量单元，由设置在衬底上的第一驱动电极(103-1)、第一测量件(104-1)和三个锚区组成，三个锚区上分别设置金属电极；第一驱动电极(103-1)为 T 型，三个锚区分别设置在第一驱动电极(103-1)的三个端部，其中只有位于第一驱动电极(103-1)对称轴线上的第一驱动锚区 C 与第一驱动电极(103-1)电连接，第一驱动电极(103-1)两端对称设置的第一接地锚区 A 和第二接地锚区 A' 与第一驱动电极(103-1)之间均无电连接；第一测量件(104-1)的两端架设在第一接地锚区 A 和第二接地锚区 A' 上，构成双端固支梁，第一测量件(104-1)位于第一驱动电极(103-1)的上方，第一测量件(104-1)与第一驱动电极(103-1)之间存在固定间距的空气间隙(105)；第二测量单元与第一测量单元结构相同，两个测量单元的区别仅在于驱动电极和测量件的长度不同。

3. 根据权利要求 2 所述的测量装置，其特征在于：所述衬底由上表面淀积有二氧化硅和氮化硅的半导体硅材料构成，驱动锚区和接地锚区的底层、驱动电极均由导电薄膜材料 1 组成，驱动锚区和接地锚区的上层、双端固支梁均由导电薄膜材料 2 组成，金属电极通过剥离工艺覆盖在驱动锚区和接地锚区上

表面。

4. 根据权利要求 3 述的测量装置，其特征在于：所述导电薄膜材料 1 和导电薄膜材料 2 为掺杂多晶硅或者金属；金属电极材料为金或铝。
5. 根据权利要求 3 述的测量装置，其特征在于：所述导电薄膜材料 1 为在衬底上淀积的一层 500 纳米厚度的多晶硅 Poly0；导电薄膜材料 2 为 2000 纳米厚度的多晶硅 Poly1，多晶硅 Poly1 采用 N 型掺杂，掺杂浓度为 50 欧姆/方。

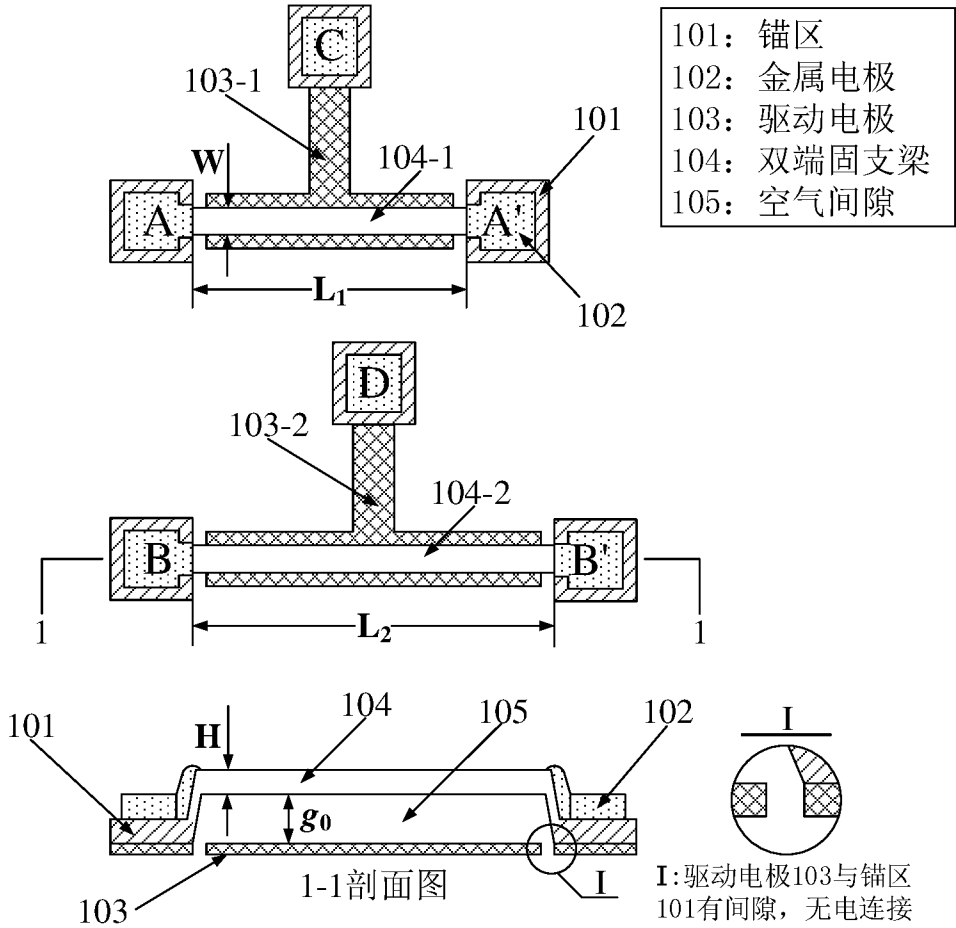


图 1

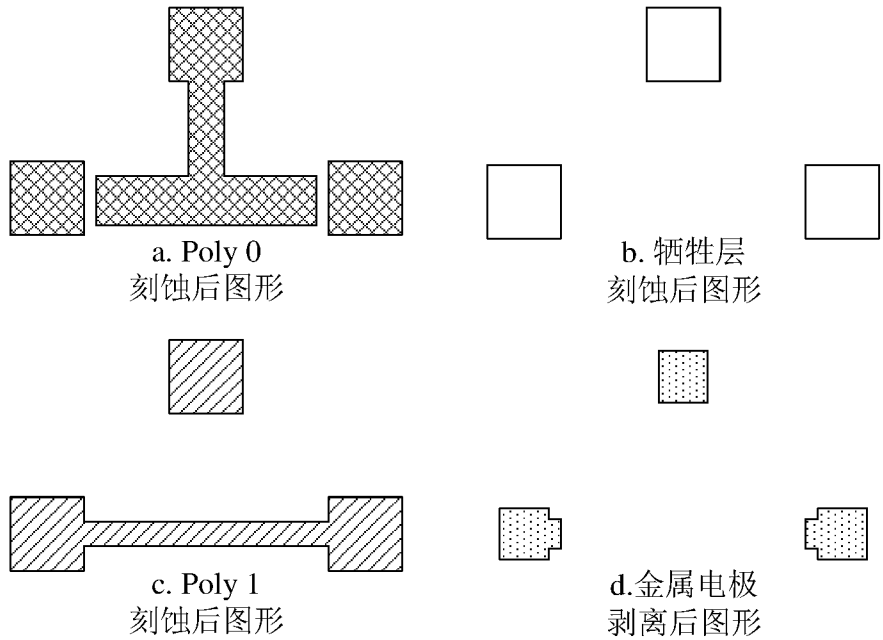


图 2

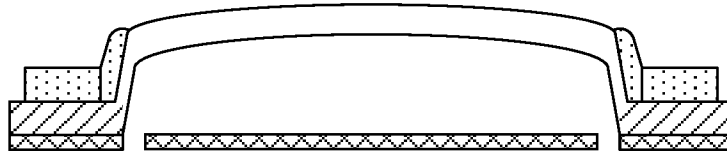


图 3

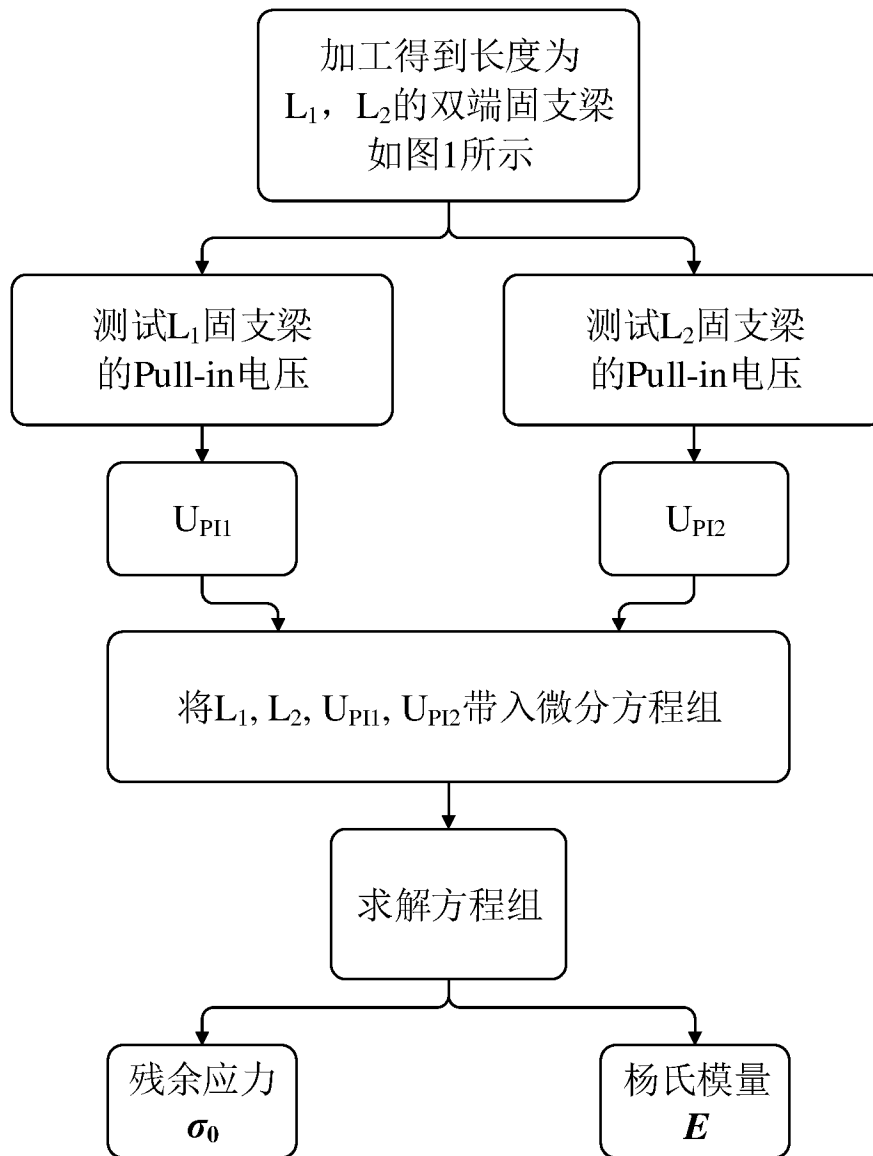


图 4

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2016/104186

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01L 5/00 (2006.01) i; G01N 3/08 (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)

G01L; 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)

WPI, EPODOC, CNPAT, CNKI, IEEE: 导电, 导体, 薄膜, 层, 残余, 应力, 应变, 测量, 测试, 能量法, 杨氏模量, 顾一帆, 周再发, 黄庆安, 李伟华, 东南大学, test, measure, MEMS, residual+, stress, anchor?, beam?, Pull?in, film?, conduct+, module, young, electrostat+, SOUTHEAST

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 102565143 A (SOUTHEAST UNIVERSITY), 11 July 2012 (11.07.2012), description, paragraphs [0004]-[0018] and [0024]-[0064], and figures 1-2	1-5
A	CN 101520385 A (INSTITUTE OF SEMICONDUCTORS, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES), 02 September 2009 (02.09.2009), entire document	1-5
A	CN 104034574 A (SOUTHEAST UNIVERSITY), 10 September 2014 (10.09.2014), entire document	1-5
A	CN 104568586 A (SOUTHEAST UNIVERSITY), 29 April 2015 (29.04.2015), entire document	1-5
A	CN 104568585 A (SOUTHEAST UNIVERSITY), 29 April 2015 (29.04.2015), entire document	1-5
A	WO 2015184946 A1 (LI, Weihua), 10 December 2015 (10.12.2015), entire document	1-5
A	US 5847283 A (MASSACHUSETTS INST. TECHNOLOGY), 08 December 1998 (08.12.1998), entire document	1-5

☒ 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	"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
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"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
"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)	"&" document member of the same patent family
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
"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 18 May 2017	Date of mailing of the international search report 25 May 2017
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 ZENG, Yuxin Telephone No. (86-10) 62414014

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2016/104186

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP H06265428 A (YAMATAKE HONEYWELL CO., LTD.), 22 September 1994 (22.09.1994), entire document	1-5

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN20

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 102565143 A	11 July 2012	WO 2013102352 A1	11 July 2013
		CN 102565143 B	29 January 2014
CN 101520385 A	02 September 2009	None	
CN 104034574 A	10 September 2014	CN 104034574 B	11 January 2017
CN 104568586 A	29 April 2015	CN 104568586 B	22 February 2017
CN 104568585 A	29 April 2015	CN 104568585 B	22 February 2017
WO 2015184946 A1	10 December 2015	CN 104034449 B	13 April 2016
		CN 104034449 A	10 September 2014
US 5847283 A	08 December 1998	WO 9800698 A1	08 January 1998
		AU 3650697 A	21 January 1998
JP H06265428 A	22 September 1994	JP 2852593 B2	03 February 1999

A. 主题的分类 G01L 5/00(2006.01)i; G01N 3/08(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) G01L; 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)) WPI, EPODOC, CNPAT, CNKI, IEEE: 导电, 导体, 薄膜, 层, 残余, 应力, 应变, 测量, 测试, 能量法, 杨氏模量, 顾一帆, 周再发, 黄庆安, 李伟华, 东南大学, test, measure, MEMS, residual+, stress, anchor?, beam?, Pull?in, film?, conduct+, module, young, electrostat+, SOUTHEAST		
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	CN 102565143 A (东南大学) 2012年 7月 11日 (2012 - 07 - 11) 说明书第[0004]-[0018]、[0024]-[0064]段、附图1-2	1-5
A	CN 101520385 A (中国科学院半导体研究所) 2009年 9月 2日 (2009 - 09 - 02) 全文	1-5
A	CN 104034574 A (东南大学) 2014年 9月 10日 (2014 - 09 - 10) 全文	1-5
A	CN 104568586 A (东南大学) 2015年 4月 29日 (2015 - 04 - 29) 全文	1-5
A	CN 104568585 A (东南大学) 2015年 4月 29日 (2015 - 04 - 29) 全文	1-5
A	WO 2015184946 A1 (李伟华) 2015年 12月 10日 (2015 - 12 - 10) 全文	1-5
A	US 5847283 A (MASSACHUSETTS INST. TECHNOLOGY) 1998年 12月 8日 (1998 - 12 - 08) 全文	1-5
☒ 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 2017年 5月 18日		国际检索报告邮寄日期 2017年 5月 25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		授权官员 曾宇昕 电话号码 (86-10)62414014

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	JP H06265428 A (YAMATAKE HONEYWELL CO., LTD.) 1994年 9月 22日 (1994 - 09 - 22) 全文	1-5

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2016/104186

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	102565143	A	2012年 7月 11日	WO	2013102352	A1	2013年 7月 11日
				CN	102565143	B	2014年 1月 29日
CN	101520385	A	2009年 9月 2日	无			
CN	104034574	A	2014年 9月 10日	CN	104034574	B	2017年 1月 11日
CN	104568586	A	2015年 4月 29日	CN	104568586	B	2017年 2月 22日
CN	104568585	A	2015年 4月 29日	CN	104568585	B	2017年 2月 22日
WO	2015184946	A1	2015年 12月 10日	CN	104034449	B	2016年 4月 13日
				CN	104034449	A	2014年 9月 10日
US	5847283	A	1998年 12月 8日	WO	9800698	A1	1998年 1月 8日
				AU	3650697	A	1998年 1月 21日
JP	H06265428	A	1994年 9月 22日	JP	2852593	B2	1999年 2月 3日