

文章编号 1004-924X(2016)06-1382-07

## SOI 压阻传感器的阳极键合结合面检测

陈立国, 王 挺\*, 李亚娣, 潘明强

(苏州大学 机电工程学院 & 苏州纳米科技协同创新中心, 江苏 苏州 215021)

**摘要:** 由于当前绝缘体上硅(SOI)压阻传感器芯片的封装质量仍依赖人工检测, 本文提出了一种自动实现该项检测的视觉检测方法。分析了压阻传感器的工作原理, 研究了芯片定位精度和结合面质量对传感器性能的影响。以传感器性能和质量为导向, 提出了一种以中心定位偏差和键合面结合度为检测点的封装结合面检测方法。该方法通过对 Hough 圆检测效果和实际图像的分析完成定位精度的检测; 基于对传感器质量影响因素的分析和气泡面积的统计实现结合面质量的检测。在传感器实际制造封装过程中对该视觉检测算法进行了实验验证。结果表明: 该方法能识别的结合面上的最小气泡直径为  $6\ \mu\text{m}$ ; 玻璃内孔半径检测误差约为  $0.015\ \text{mm}$ 。本文提出的基于视觉检测的方法基本满足了压阻传感器封装对结合面检测的要求, 有助于实现封装质量的自动化检测。

**关键词:** 绝缘体上硅(SOI); 压阻传感器; 芯片; 封装质量; 视觉检测; 阳极键合

**中图分类号:** TP212.12; TP23 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162406.1382

## Detection of anodic bonding joint surface for SOI piezoresistive sensor

CHEN Li-guo, WANG Ting\*, LI Ya-di, PAN Ming-qiang

(Mechanical and Electrical Engineering & Collaborative Innovation Center of Suzhou  
Nano Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215021, China)

\* Corresponding author, E-mail: Jerny\_wt@126.com

**Abstract:** As the packaging quality of a SOI(Silicon On Insulator) piezoresistive sensor is still dependent on manual detection, this paper proposes a method to implement its automatic visual inspection. The principle of piezoresistive sensor was analyzed, and the influence of the positioning accuracy of chips and the quality of bonding joint surface on sensor performance was investigated. By taking sensor performance and quality for a research target, a method to inspect the center deviation and bonding area was proposed for joint surface detection. Through analyzing the Hough circle detection and the actual image, the method implements the positioning accuracy detection. By analysis of the effect factors on sensor quality and statistics of the bubble area, the quality of bonding joint surface was measured. The proposed visual inspection method was verified in the practical packaging processing for sensor fabrication. Experimental results indicate that the method identifies the bubble with a diameter over  $6\ \mu\text{m}$  and the error of glass inner hole radius is about  $0.015\ \text{mm}$ . The method proposed satisfies the requirement of piezoresistive sensor package joint surface inspection by detecting center deviation and contributes to the automated inspection of packaging quality.

收稿日期: 2016-01-20; 修订日期: 2016-02-10.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2012AA041201); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(No. 20133201130003)

**Key words:** Silicon On Insulator (SOI); piezoresistive sensor; chip; packaging quality; visual detection; anodic bonding

## 1 引言

压阻传感器作为目前应用最广的 MEMS 压力传感器之一,在石油化工、冶金、汽车、航空发动机等环境下的压力测量领域具有广泛的应用<sup>[1]</sup>。绝缘体上硅(Silicon on Insulator, SOI)传感器是一种新型的半导体高温压阻传感器,它通过 SiO<sub>2</sub> 绝缘层将检测电路与基底硅隔离,避免了高温下电路层与基底硅之间的漏电现象,因而比扩散硅压力传感器具有更高的工作温度,具有耐高温、抗辐射和稳定好等优点<sup>[2]</sup>。实际测试证明:在 220 °C 温度内 SOI 敏感芯片可在压力量程内正常工作,且线性度变化依然控制在较小的范围内<sup>[2-3]</sup>。与谐振式 MEMS 压力传感器相比<sup>[4-5]</sup>,SOI 压力传感器具有制造简单、封装工艺成熟等优点。

典型的压阻传感器的封装工艺是将清洗过的含有敏感电路的芯片与 Pyrex7740 玻璃通过阳极键合形成可靠的静电连接。成熟的硅/玻璃阳极键合的工艺是将硅片和玻璃加热到 300 °C 左右温度后施加 1 000 V 以上的直流电压,在硅片和玻璃界面之间发生不可逆的化学反应。

压阻传感器的芯片微小、组装精度要求高。由于传感器性能(灵敏度、线性度)与组装精度关系密切,所以对于压阻传感器,作为核心工艺的键合质量必须加以把控。然而,现阶段常用的阳极键合质量检测手段依然是依靠其他仪器进行,主要包括最大扭矩测试法、气密性测试法、抗拉实验等<sup>[6]</sup>。对于压阻传感器的芯片封装工艺,这些检测方法不太适宜自动化封装工艺的实现,且侧重于键合强度的检测,不符合以实现传感器性能检测的目标。因而压阻传感器封装质量一直依赖人工检测,效率低的同时带来了检测结果的不可靠性。

本文以实现 SOI 压阻传感器芯片封装质量的自动检测为目标。首先从 SOI 压阻传感器的工作原理入手,分析了芯片定位精度和结合面质量对传感器性能的影响,提出一种对中心定位偏差和键合面结合度进行检测的结合面检测方法。

然后,根据实际情况实现了对结合面的视觉检测,并对检测算法流程进行了详细介绍。最后,在传感器实际制造封装过程中对该视觉检测算法进行了实验,给出了检测结果和精度。

## 2 传感器工作原理及封装的影响

与典型 SOI 芯片将基底硅作为电路层支撑不同(图 1(a)),SOI 芯片不经过基底硅的刻蚀,以玻璃环作为电路层的受力支撑(图 1(b))。在降低了封装要求的同时(典型 SOI 芯片需在真空环境封装),带来一个问题:典型 SOI 芯片将电路层部分减薄,在压力作用下可认为只有电路层会受力变形<sup>[7]</sup>,因而影响传感器性能的主要是电路层的设计和工作温度,与定位精度无太大关系;本文芯片以玻璃环内孔作支撑,受力时位于内孔的芯片会变形,从力学角度分析,电路层与玻璃环中心的偏差必然会带来受力不同,造成传感器性能损失。

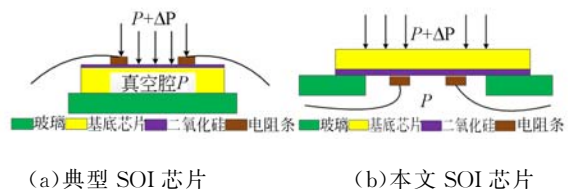


图 1 SOI 芯片原理图  
(a) 典型 SOI 芯片 (b) 本文 SOI 芯片  
(a) Diagram of typical SOI (b) Diagram of proposed SOI

Fig. 1 Principal diagram of SOI chip

对 SOI 芯片作受力分析<sup>[1,8]</sup>。当上下腔存在压差时  $\Delta P$ ,硅片受径向应力  $\sigma_r$  和切向应力  $\sigma_t$  作用:

$$\begin{cases} \sigma_r(r) = \frac{3\Delta P}{8h^2} [(1+\mu)R^2 + (3+\mu)r^2] \\ \sigma_t(r) = \frac{3\Delta P}{8h^2} [(1+\mu)R^2 + (1+3\mu)r^2] \end{cases}, (1)$$

其中: $\Delta P$  为作用在硅膜片的上下腔压差; $R$  为玻璃内孔的半径; $r$  为电阻距离玻璃内孔圆心的距离; $h$  为硅膜片厚度; $\mu$  为泊松比(硅取 0.278)。

硅片  $\langle 110 \rangle$  面上压阻受径向和切向应力作用时压阻变化率如式(2)所示。可以看出,切应力

会使得压阻变化率降低,进而导致传感器灵敏度降低。

$$\frac{\Delta R}{R} = (71.8\sigma_r - 66.3\sigma_t) \times 10^{-11} \text{m}^2/\text{N}, \quad (2)$$

其中:71.8, -66.3 为 P 型电阻纵向和横向压阻系数。

当电阻向玻璃内孔中心移动时,由式(1)、(2)计算其电阻变化率和相对变化值如表 1 所示。

表 1 中心偏差对电阻变化率的影响

Tab.1 Influence of center deviation to resistance

$r/R$	$\Delta R/R (\times 3a^2 P / (8h^2))$	相对变化率/%
0.877	94.53	0
0.789	77.85	17.6
0.75	63.99	32

由表 1 可以看出,芯片电路层与玻璃的中心距对传感器灵敏度影响显著。此外,定位偏差还会造成 4 个电阻偏差的不一致性使得传感器线性度降低。因此需要对键合产品的定位偏差进行检测,以保证传感器性能的一致性<sup>[1]</sup>。传感器依赖于密封腔的真空气度,真空气度不足会造成灵敏度降低,整体性能严重受损<sup>[9-10]</sup>。考虑到传感器实际工作环境可能承压较大,键合面结合度的不足可能导致传感器漏气,造成传感器失灵,甚至可能由于键合强度不足使得传感器损坏,产生安全隐患。因此,通过对定位精度和键合面结合度的检测能在一定程度上达到传感器封装质量检测的目的。

### 3 阳极键合结合面检测

#### 3.1 自动化阳极键合系统

基于显微视觉的 6 工位阳极键合系统如图 2 所示。

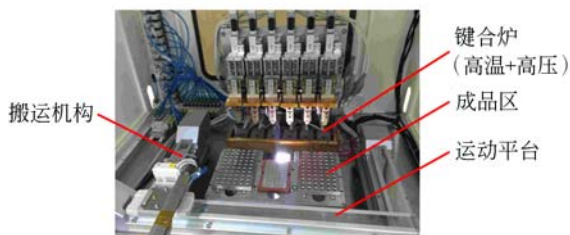


图 2 阳极键合系统图

Fig. 2 Diagram of anodic bonding system

系统主要由运动平台、搬运机构和键合模块(高温、高压)组成,通过视觉实现芯片与玻璃环的中心定位。该阳极键合系统的工作流程如图 3 所示。

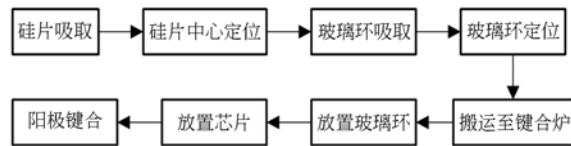


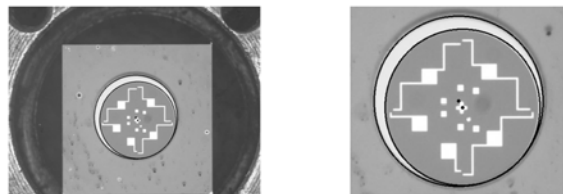
图 3 系统工作流程图

Fig. 3 Block diagram of system workflow

#### 3.2 中心定位偏差的检测

通过视觉对硅片与玻璃环中心的偏差进行检测,系统采用中国大恒公司的 HV3151 型 CMOS 相机,分辨率为  $2048 \times 1536$ ,像素尺寸为  $3.2 \mu\text{m} \times 3.2 \mu\text{m}$ 。

对圆的识别通常采用 Hough 圆变换检测得到圆心坐标。使用 Hough 圆对封装芯片图进行检测,结果如图 4(a)所示。由局部放大图 4(b)可以看出,由制造及与硅片键合带来的影响使得玻璃内孔周围存在阴影,单纯的 Hough 圆检测会带来很大偏差;此外,芯片中心的硅膜片是利用扩散工艺形成的,由该工艺本身的精度及边缘模糊问题使得通过 Hough 圆检测的芯片中心圆也存在一定偏差。



(a) Hough 检测图像 (b) 局部放大图像  
(a) Hough detection image (b) Enlarged image

图 4 Hough 圆检测结果图

Fig. 4 Detection results of Hough circles

利用玻璃内孔的圆特征及芯片理论中心(十字架),通过提取内孔和十字架的轮廓,遍历轮廓上点进行迭代优化,找出包围轮廓的面积最小的圆,实现内孔及硅片圆心的检测。从原理上分析,面积最小圆法能减小阴影的干扰,其检测方法为:

(1)排除吸持夹具的影响,设置图片中心矩形区域为感兴趣区域(ROI);

(2)借助直方图确定分割阈值,对图像二值

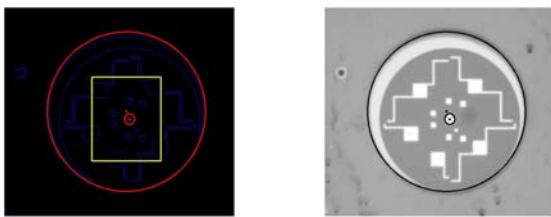
化;

(3)在二值图像中提取所有轮廓,并对各轮廓施以最小包围圆计算。提取各最小包围圆中半径最大的圆作为玻璃内孔圆,如图 5(a)中红色大圆;

(4)同样的方法提取包围硅片十字架的最小圆。根据十字架尺寸设定半径为  $d_1 \sim d_2$  (pixel) 筛选出符合条件的最小圆,由于可能存在半径相近的轮廓圆对筛选产生干扰,进一步将圆心限制在图 5(a)黄色矩形范围内,最终找到的圆如图 5(a)中红色小圆;

(5)根据玻璃和硅片圆心坐标,由两点距离公式计算两圆的中心偏差  $D$ (pixels),将其与阈值  $T_1$  比较,超过阈值  $T_1$ ,则视为不合格;反之则视为合格。

圆心检测方法的结果放大如图 5(b)所示,可以看出该方法较 Hough 圆检测具有更好的检测效果。



(a) 轮廓识别图 (b) 检测结果放大图

(a) Contour image (b) Enlarged image of testing result

图 5 中心偏差检测试验

Fig. 5 Experiment of center deviation detection

### 3.3 键合面结合度的检测

如果芯片结合面质量较差,很可能带来传感器上下腔之间漏气以及检测精度降低甚至造成传感器失灵。此外,阳极键合牢固、稳定的关键在于结合面处有足够的 Si-O 键形成,在键合工艺确定的条件下,结合度不足会造成化学键减少,影响键合牢固程度。硅片表面的尘埃和陷入键合面的气体会在键合面产生气泡,是影响结合度最主要因素。此外,键合过程可能会出现部分区域未键合的情况,造成结合度严重不足。通过视觉实现对气泡和未键合区域(下统称为气泡)的检测能有效把控结合面质量。同时,芯片受力变形主要发生在玻璃内孔部分,气泡对结合面的影响不一致,离孔近的影响较大,反之影响微弱。因此,提出一种以距离为权重对气泡有效面积  $E$  进行度量的方

法。其原理和计算公式分别如图 6(a)和式(3)所示:

$$\begin{cases} \omega = 1 - \frac{d}{D}, \\ E = ds \times \omega \end{cases} \quad (3)$$

其中: $ds$ ,  $\omega$  分别为气泡物理面积和对应权重; $d$ ,  $D$  为分别为气泡距内孔距离和最远距离; $E$  为气泡有效面积。

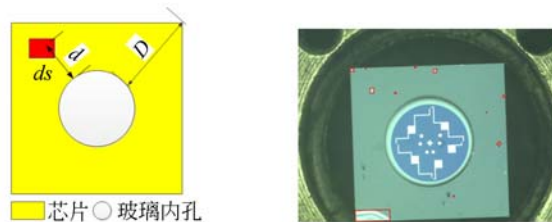
由图 4(a)可看出,键合面的斑点可分为黑色斑点、中间黑色周围白色斑点以及纯白斑点。后两种分别是灰尘和气体产生的气泡,而黑色斑点位于玻璃非键合面,是检测的干扰因素。利用气泡本身的形貌特征:存在一圈白色轮廓区,提出了一种视觉检测方法,并结合面积统计对结合面质量进行判定:

(1)提取感兴趣区域。气泡只存在于芯片与玻璃键合的方形区域内,而敏感电路会使基于白色轮廓的气泡检测产生错误。取硅片与玻璃孔外的重叠区为 ROI;

(2)二值化。利用直方图确定分割阈值。黑色斑点全部转换成背景色,避免了其对后续检测的干扰;

(3)确定气泡轮廓。在二值图像中寻找所有白色轮廓,进而可以寻找出包围每个轮廓的面积最小的矩形。图 6(b)中红色标记即为寻找到的所有气泡。

(4)面积统计。统计单个气泡最大物理面积  $S$  以及所有气泡总有效面积  $S_{total}$ 。设定单个最大阈值  $T_2$ ,总有效面积阈值  $T_3$ ,综合判定结合面质量。



(a) 有效面积原理图 (b) 检测结果图

(a) Image of effective area (b) Image of testing result

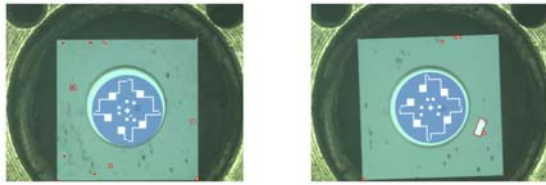
图 6 结合面质量检测

Fig. 6 Diagram of bonding surface detection

对不同气泡进行实验,图 7(a)、7(b)分别为识别出的灰尘和气体产生的气泡。可以看出该检测方法能有效排除外层黑色斑点的干扰,准确识



别出所有气泡。同时,对最大气泡物理面积和所有气泡有效面积的统计能定量地表征结合面质量。



(a) 灰尘引起气泡图 (b) 气体引起气泡图  
(a) Bubbles with dust (b) Bubbles with gas

图 7 多种气泡检测试验

Fig. 7 Experiment of various bubbles detection

### 3.4 结合面检测算法流程

以传感器封装质量的检测为目标,提出了以中心偏差和结合面质量为检测点的结合面检测方法,实施流程如图 8 所示。

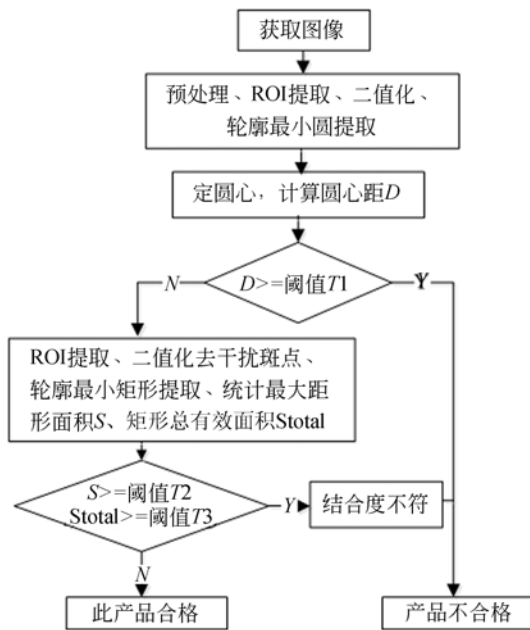


图 8 结合面检测流程图

Fig. 8 Flowchart of joint surface detection

## 4 封装结合面检测实验研究

对用于汽车发动机的压力传感器的芯片封装产品进行了实验分析。实验用玻璃环为 Pyrex7740,内孔半径  $R$  为 1.14 mm,厚为 2.0 mm;芯片为 4 mm×4 mm×0.24 mm,硅膜片半径  $r$  为 1.00 mm。键合采用的是上述 6 工位键合系统,样本容量为 60。经试验,该方法能实现直径

为 2 个像素以上(约 6  $\mu\text{m}$ )气泡的检测,满足结合面检测要求。

由于玻璃内孔存在的阴影使得内孔检测困难较大,检测的内孔半径与标称半径对比结果如表 2 所示。

表 2 玻璃内孔半径检测结果

Tab. 2 Testing result of glass inner hole radius

内孔半径偏差 $D_0/\mu\text{m}$	像素偏差 $D_0/\text{pixel}$	标称半径 $R_0/\text{mm}$	产品 个数	百分比 /%
0~10	<3		40	66.7
10~15	3~5	1.14	18	30
15~20	5~6		2	3.3

封装中心定位偏差的视觉检测结果如表 3 所示。

表 3 中心定位偏差检测结果

Tab. 3 Measuring result of center deviation

中心偏差 $D_0/\mu\text{m}$	产品个数	百分比/%
0~30	14	23.3
30~50	21	35
50~80	17	28.3
80~100	4	6.67
>100	4	6.67

针对本实验下的芯片敏感电路和玻璃环内孔尺寸,理想不偏心状态下: $r/R=0.877$ ,当偏心量达到 100  $\mu\text{m}$  即  $r/R=0.789$  时,由式(1)、(2)可算得其灵敏度相对理想状态大约下降 17.6%,因此以 100  $\mu\text{m}$  作为偏差阈值  $T_1$ 。实验传感器用于高温高压环境下汽车发动机内的压力测量,因而厂商对芯片封装质量较严,要求最大气泡不超过 80  $\mu\text{m}\times 80 \mu\text{m}$ ,结合面所有气泡有效面积不超过键合总面积的 0.1%,即 11 920  $\mu\text{m}^2$ 。实验芯片的封装合格率检测如表 4 所示。

表 4 封装综合检测结果

Tab. 4 Comprehensive testing result of package

	产品个数	百分比/%	不合格原因
合格	28	46.7	
不合格	1	1.67	定位偏差超过阈值
	28	46.7	气泡超过阈值
	3	5	偏差、气泡均超过阈值

## 5 结 论

本文通过对压阻传感器的工作原理进行分析,得出了芯片封装对传感器性能影响的结论,由此提出了检测定位偏差和键合面结合度的结合面

检测方法。在此基础上,提出了定位偏差和键合面结合度的视觉检测算法,并给出了详细的检测流程。最后,对所提出的结合面检测方法进行实验,结果证明:该方法能实现直径  $6\ \mu\text{m}$  以上气泡的检测,内孔检测偏差为  $15\ \mu\text{m}$ ,满足封装结合面检测要求。

### 参考文献:

- [1] 陈立国,凌云峰,陈涛. MEMS 压力传感器自动组装系统[J]. 纳米技术与精密工程, 2008, (4):297-301.
- CHEN L G, LING Y F, CHEN T. Development of automatic microassembly system for MEMS pressure sensor packaging [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2008,(4):297-301. (in Chinese)
- [2] 李丹丹,梁庭,李赛男,等. 基于 MEMS 工艺的 SOI 高温压力传感器设计[J]. 传感技术学报, 2015, 28(9).
- LI D D, LIANG T, LI S D, *et al.*. Design of SOI high temperature pressure sensor based on MEMS process [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2015, 28(9). (in Chinese)
- [3] 伞海生,宋子军,王翔,等. 适用于恶劣环境的 MEMS 压阻式压力传感器[J]. 光学精密工程, 2012, 20(3):550-555.
- SAN H SH, SONG Z J, WANG X, *et al.*. Piezoresistive pressure sensors for harsh environments [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(3): 550-555. (in Chinese)
- [4] 陈德勇,曹明威,王军波,等. 谐振式 MEMS 压力传感器的制作及圆片级真空封装[J]. 光学精密工程, 2014, 22(5):1235-1242.
- CHEN D Y, CAO M W, WANG J B, *et al.*. Fabrication and wafer-level vacuum packaging of MEMS resonant pressure sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(5): 1235-1242. (in Chinese)
- [5] 李玉欣,陈德勇,王军波,等. 基于自停止腐蚀技术的 H 型谐振式微机械压力传感器[J]. 光学精密工程, 2011, 12(12):2927-2934.
- LI Y X, CHEN D Y, WANG J B, *et al.*. H type micro machined resonant pressure sensor based on self-stoped etch technique [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 12(12):2927-2934. (in Chinese)
- [6] 曹欣,李宏,杜芸. 阳极键合强度及其评价方法[J]. 传感器与微系统, 2007, 3(03):10-12.
- CAO X, LI H, DU Y. Anodic bonding strength and its evaluation [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2007, 3(03):10-12. (in Chinese)
- [7] 李丹丹,梁庭,姚宗,等. 一种高温压阻式压力传感器的制备与倒装焊接[J]. 微纳电子技术, 2015.
- LI D D, LIANG T, YAO Z, *et al.*. Preparation and flip-chip bonding of a high temperature piezoresistive pressure sensor [J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2015. (in Chinese)
- [8] 朱目成,张立红. 硅压阻式传感器性能影响因素的研究[J]. 兵工自动化, 1999, 4(4):10-13.
- ZHU M CH, ZHANG L H. Research on the properties of piezoresistive transducer [J]. *Ordnance Industry Automation*, 1994, 4(4): 10-13. (in Chinese)
- [9] 蒋恒,孙笠,董健. 一种 MEMS 压阻式压力传感器及其制造方法, CN104062059A[P], 2014.
- JIANG H, SUN L, DONG J. MEMS piezoresistive

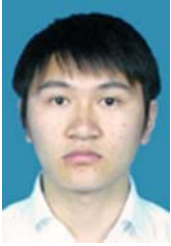
pressure sensor and its manufacturing method, CN104062059A[P], 2014.

- [10] 陈德勇, 曹明威, 王军波. 一种基于 SOI 工艺的高精度硅微谐振式气压传感器, CN103900753A

[P], 2014.

CHEN D Y, CAO M W, WANG J B. High-precision MEMS resonant pressure sensor based on SOI, CN103900753A[P]. 2014.

#### 作者简介:



王 挺(1992—),男,江苏泰州人,硕士研究生,2014 年于苏州大学获得工学学士学位,主要从事全景视觉方面的研究。E-mail: Jermy\_wt@126.com

#### 导师简介:



陈立国(1974—),男,辽宁葫芦岛人,博士生导师,教授。1997 年于哈尔滨理工大学获得学士学位,2000 年于哈尔滨理工大学获得硕士学位,2003 年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事微操作、微驱动机器人方面的研究。E-mail: chenliguo@suda.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)