

# 基于电流体喷印压电厚膜的力感知探针\*

王大志<sup>1,2,3</sup>, 王伦翔<sup>1</sup>, 李泽飞<sup>1</sup>, 陈相吉<sup>1</sup>, 郑晓虎<sup>1</sup>, 刘梦哲<sup>1</sup>,  
梁世文<sup>3</sup>, 孔令杰<sup>3</sup>, 唐彬<sup>4</sup>

(1. 大连理工大学机械工程学院 大连, 116024)

(2. 高性能精密制造全国重点实验室 大连, 116024)

(3. 大连理工大学宁波研究院 宁波, 315000)

(4. 中国工程物理研究院电子工程研究所 绵阳, 621900)

**摘要** 为了准确感知探针接触,降低探针损坏更换频率,设计并制作了一种基于压电效应的力感知探针。利用有限元软件优化设计压电厚膜感知层的结构尺寸,并基于电流体喷印工艺完成曲面共形压电厚膜的制备。搭建力感知探针标定系统,分析推导出灵敏度公式,并计算不同接触速度下的接触力。测得在 0.2 mm/s 的接触速度下,力感知探针的灵敏度达到 744.203 pC/N,非线性误差为 4.26%。实验结果表明,该力感知探针具有占用空间小、结构简单和灵敏度高的特点,在防止探针接触变形、感知接触力等方面有广阔的应用前景。

**关键词** 曲面压电厚膜;力感知探针;电流体喷印;标定  
**中图分类号** TH823

## 引言

探针用途广泛,可用于芯片电极点测、线路点测以及静电吸附微小样品<sup>[1-2]</sup>。随着半导体芯片制程越来越先进,微机电系统零部件越来越精密,探针的精细化、微型化程度也在持续提升。然而,由于探针尖端细小,较小的外力就会引起针尖塑性变形,导致无法正常使用,因此在操纵过程中需及时感知探针是否发生接触。

起初采用的方法是通过显微视觉系统观察探针的移动,并结合手动进行控制<sup>[3]</sup>,这种方法受观察者观察角度和系统分辨率的影响,存在较大误差。为了克服上述限制,相关研究通过探针传递外界作用力,在其尾端加装传感装置,探针接触变形后带动装置中的悬块产生位移,从而引起传感器的输出电荷或电阻发生变化<sup>[4-5]</sup>。这种方法虽然提高了检测精度,但由于探针具有一定的柔度,不能保证作用力完全传递到传感器中,同时尾部较大的体积会带来操作不便的问题。在提高结构集成度方面,于昌新等<sup>[6]</sup>设计了集成于探针内部的法布里-珀罗(Fabry-Perot,简称 F-P)腔级联布拉格光栅(Fiber

bragg grating,简称 FBG)的光纤力传感器,通过测量 F-P 腔的  $m$  级波谷波长漂移量和 FBG 的特征波长漂移量实现探针尖端受力测量。该方法需要破坏探针结构,且只能实现轴向力的测量,因此只适合于穿刺手术探针末端力测量的单一应用场景。

除了在探针表面或内部后期加装传感器的方法,相关研究通过某些工艺方法实现传感器与探针基底一体制造。Watanabe 等<sup>[7]</sup>提出使用石英晶体谐振器制造平面力感知探针,传感器基于频率与施加的力成比例变化的原理,测量出样品与探针之间的反作用力。一体制造的力感知探针具有结构简单、测量精度高的优点,但制造工艺对探针的材料和形状有特殊要求,具有较大的限制。

笔者采用电喷印工艺<sup>[8-10]</sup>直接在探针表面制备曲面压电厚膜传感器,基于正压电效应,通过电量输出感知探针接触变形。提出的力感知探针中感知层压电性能高,与基底之间无应变损失,从而保障探针的高输出灵敏度。

## 1 力感知探针仿真分析

图 1 为基于压电厚膜的力感知探针结构示意图

\* 国家重点研发计划资助项目(2018YFA0703204);国防基础科研计划资助项目(JCKY2020204B004);国家自然科学基金面上资助项目(51975104,62074138)

收稿日期:2023-03-11;修回日期:2023-05-01

图,主要由探针、锆钛酸铅(lead zirconate titanate,简称PZT)压电厚膜和上电极组成。探针是元件的基础,其整体长度为55 mm,直径为0.8 mm,采用钢材料。PZT压电厚膜是元件的传感部分,将接触力转换为电荷,通过电喷印工艺制备在探针表面,实现两者的一体化体系。上电极制备在压电厚膜表面,起到极化压电厚膜以及引出电荷的作用。

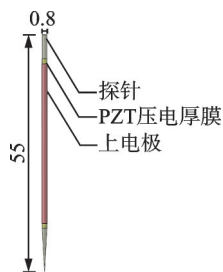


图1 基于压电厚膜的力感知探针结构示意图(单位:mm)  
Fig.1 Schematic diagram of force sensing probe based on piezoelectric thick film (unit:mm)

压电厚膜的结构尺寸对力感知探针的输出电荷有着关键影响,通过有限元软件的单因素分析量化其影响程度,为后续的工艺制备做参考。

### 1.1 极化方向对输出电荷的影响

图2为轴向截面微元变形示意图。沿轴线方向取一段截面微元模型,探针受力后根据应变分布可将其划分为受拉区和受压区,变形引起PZT压电厚膜极化状态发生变化。受拉区PZT内部极化场强减小,释放表面所带电荷;受压区PZT内部极化场强变大,吸引表面所带电荷,等同于释放与表面极性相反的电荷<sup>[11]</sup>。因此,受力后PZT厚膜表面的输出电荷与初始所带电荷、厚膜拉压状态有关。由于初始所带电荷取决于压电厚膜的极化方向,同时探针使用时厚膜的拉压状态是确定的,所以表面输出电荷仅受极化方向的影响。当两分区对应表面输出相反极性的电荷时,同时引出则会发生电荷中和,降低传感器的灵敏度。

在COMSOL有限元软件中设置不同的PZT厚膜的极化方向进行仿真分析。极化方向对输出电荷

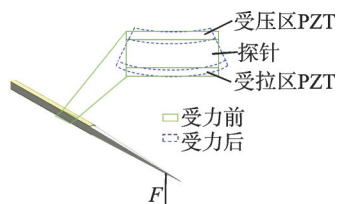


图2 轴向截面微元变形示意图  
Fig.2 Schematic diagram of micro-element deformation in axial section

的影响如图3所示。图3(a)中轴向截面拉压分区极化方向相反,仿真得到两分区外表面产生极性相反的电荷 $4.24 \times 10^{-8} \text{ C}$ 和 $-4.24 \times 10^{-8} \text{ C}$ 。图3(b)中轴向截面拉压分区极化方向相同,仿真得到两分区外表面产生极性相同的电荷均为 $-4.24 \times 10^{-8} \text{ C}$ 。PZT压电厚膜喷印方案如图4所示。因此,在制作传感器时,考虑压电厚膜并同方向极化,以免发生电荷中和。鉴于后者的制备具有较高的工艺难度,所以实验中采用单分区喷印压电厚膜。

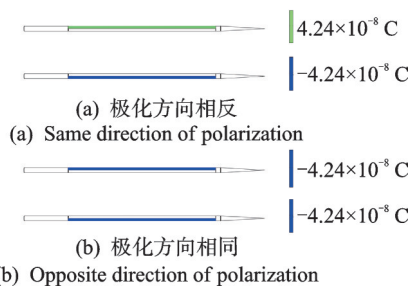


图3 极化方向对输出电荷的影响  
Fig.3 Influence of polarization direction on output charge

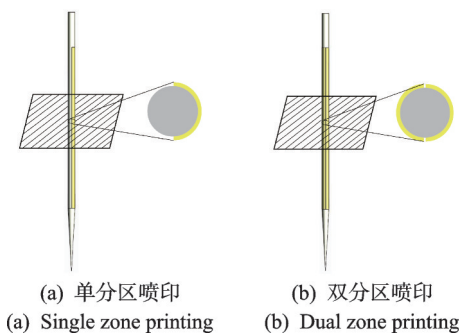


图4 PZT压电厚膜喷印方案  
Fig.4 PZT piezoelectric thick film printing solution

### 1.2 PZT压电厚膜长度及位置对输出电荷的影响

为确定PZT压电厚膜的喷印长度和喷印位置,在COMSOL软件的全局定义中添加PZT长度 $L$ 和喷印起始位置距离针尖的长度 $H$ ,并在研究中添加2个参数的参数化扫描,得到的PZT压电厚膜长度、位置与输出电荷的关系如图5所示。可以看出,PZT起始位置一定时,长度越长,输出电荷量越大;PZT长度一定时,起始位置越远离针尖,输出电荷量越大。因此,确定PZT压电厚膜长度为45 mm,喷印位置距离针尖50 mm。

### 1.3 探针接触角度和受力点对输出电荷的影响

由于压电厚膜采用单分区喷印的方案,探针与物体之间接触角度以及探针尖端受力点的位置会影响压电厚膜覆盖区域的应变分布,进而影响其输

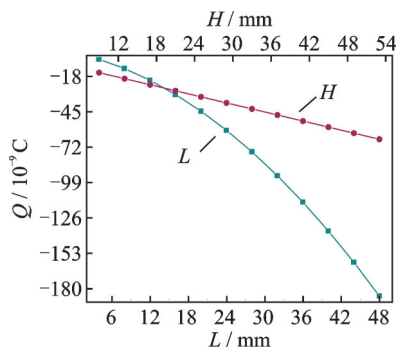


图5 PZT压电厚膜长度、位置与输出电荷的关系

Fig.5 Relationship between length, position and output charge of PZT piezoelectric thick film

出电荷,因此在COMSOL中分别进行仿真分析。首先,固定探针与物体之间的受力点和接触力,调整探针的接触角度为 $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ 和 $80^\circ$ ,仿真各个角度下的输出电荷量;然后,固定探针与物体之间的接触角度和接触力,在探针尖端的圆周方向均匀取8个受力点,仿真不同受力点下的输出电荷量。

探针接触角度、受力点与输出电荷的关系如图6所示。可以看出,随着探针接触角度的增加,压电厚膜的输出电荷量逐渐减少。对此可将探针接触力分解为沿探针长度方向和探针长度的法方向,接触角度增加使得探针发生弯曲变形的法向接触力减小,引起表面应变减小从而降低输出电荷。探针受力点不同,表面输出电荷也不同,原因是受力点的改变影响了探针表面的拉、压应变分布,两者引起的厚膜输出电荷极性相反,叠加后净输出电荷量改变。图6中受力点1与受力点5的输出电荷极性相反、电荷量大小相同,并且是8个受力点中的最大值,这是因为模型中的压电厚膜是沿1,5方向布置的,力作用在1或5位置时,压电厚膜覆盖区域只有拉应变或压应变,不存在电荷中和。因此,探针在标定、测试时,应保证接触角度和受力点始终不变,避免影响接触力与输出电荷间的线性关系,同时受力点可正对

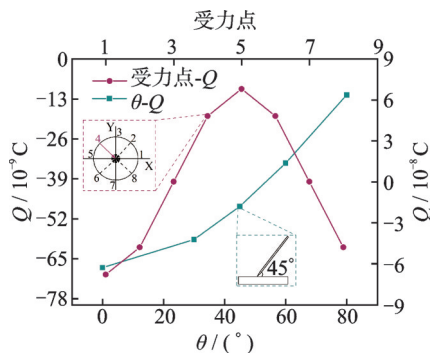


图6 探针接触角度、受力点与输出电荷的关系

Fig.6 Relationship between probe contact angle, force point and output charge

于压电厚膜,以提高力感知的探针的输出灵敏度。

## 2 力感知探针制备

电流体喷印技术是基于电流体动力学,依靠液滴的重力、电场力、粘滞力和表面张力,在喷针处形成远小于喷针内径的稳定锥射流<sup>[12]</sup>,并雾化成纳米级液滴。利用该射流或液滴可在衬底上实现微纳米尺度的结构制造。根据电流体喷印原理,搭建起由 $x$ - $y$ - $z$ 移动平台、高压电源、注射泵以及金属喷针组成的电流体喷印系统。金属喷针与高压电源相连,入口处接微量注射泵。高压电源用于在接地平台和金属喷针之间提供电场。注射泵施加流体动力以促进PZT浆料到达喷针出口。

电流体喷印压电厚膜如图7所示。采用搭建的电流体喷印系统在探针表面制备压电厚膜。设置喷针高度为4 mm、电压为4 kV、流量为 $9 \mu\text{L}/\text{min}$ 的打印参数,使PZT浆料形成稳定锥射流,并通过控制平台的运动使浆料喷印在曲面探针上,移动速度为32 mm/s,单层喷印后需放到 $200^\circ\text{C}$ 和 $350^\circ\text{C}$ 加热平台上各加热60 s,以蒸发溶剂并减少内应力<sup>[13]</sup>。循环交替厚膜喷印和溶剂蒸发过程,层层累加实现 $15 \mu\text{m}$ 厚PZT压电厚膜的增材制造。喷印后的压电厚膜需放到 $720^\circ\text{C}$ 的马弗炉中结晶20 min,以形成具有铁电性质的钙钛矿结构,并使得压电厚膜与探针在不使用粘接剂的情况下紧密结合在一起。

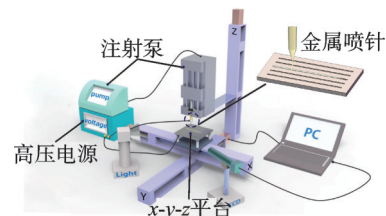


图7 电流体喷印压电厚膜

Fig.7 Piezoelectric thick film prepared by electrohydrodynamic jet printing

对电喷印压电厚膜的微观结构进行表征。采用日本Hitachi公司的SU8220型扫描电子显微镜(scanning electron microscope,简称SEM)观测其表面微观形貌,日本Shimadzu公司的X射线衍射仪(X-ray diffractometer,简称XRD)分析其晶粒结构。图8为电喷印压电厚膜微观结构表征图。从图8(a)可以看到,厚膜与探针形成一体结构,表面致密无裂纹。图8(b)表明该膜显示出优先(110)取向且峰宽很小,说明晶体结构良好。未观察到(100)和(110)取向之间的峰,表明压电厚膜具有纯钙钛矿结构。



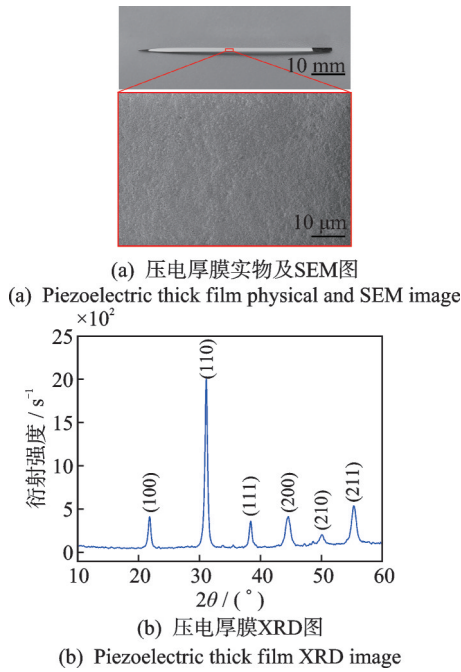


图 8 电喷印压电厚膜微观结构表征图

Fig.8 Microstructure characterization image of piezoelectric thick film prepared by electrohydrodynamic jet printing

压电厚膜喷印后在其表面被覆电极。利用磁控溅射技术和掩模版制备图案化 Ti/Pt 上电极,其中:Ti 厚度为 50 nm;Pt 厚度为 200 nm。探针是导电的钢材料,可直接作为厚膜的底电极。在厚膜的上下电极之间施加 10 V/μm 的电场,并在 200 °C 下保持 20 min,使厚膜中的电畴按外电场方向取向排列,从而显示出压电性能。制备的力感知探针如图 9 所示。

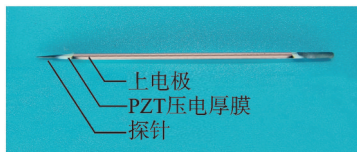


图 9 力感知探针

Fig.9 Force sensing probe

### 3 力感知探针标定

图 10 为力感知探针标定系统。电动升降位移台中配有步进电机和精密丝杠,可实现位移台的匀速升降。电荷放大器将电荷转换成电压并进行放大。数据采集装置采集电压信号,并显示在上位机上。标定过程是通过调整位移台使探针匀速下压精密天平,得到精密天平上的标准接触力以及上位机显示对应的电压,多次调整接触力,建立输出电压与接触力之间的关系曲线。

图 11 为实测输出电压曲线。可以看出,当接触力一定时,接触速度不同,输出电压也不同,即力感

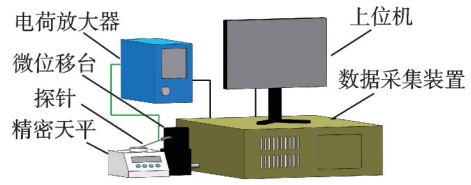


图 10 力感知探针标定系统

Fig.10 Force sensing probe calibration system

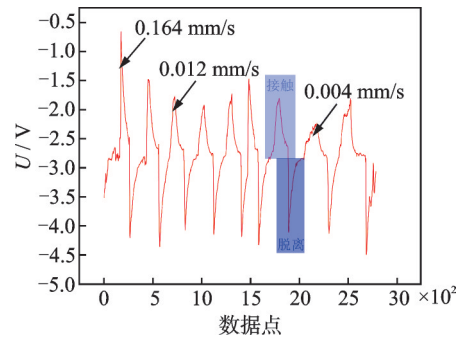


图 11 实测输出电压曲线

Fig.11 Measured output voltage curve

知探针的灵敏度与接触速度有关,因此对压电厚膜以及后续测量电路组成的测量系统进行分析。压电厚膜属于电容性负载,受力后在电容上产生电荷,由于测量系统的绝缘漏电阻不可能无限大,故电荷将通过绝缘漏电阻逐步泄漏掉<sup>[14]</sup>。电荷泄漏对压电厚膜输出电压的影响如图 12 所示。

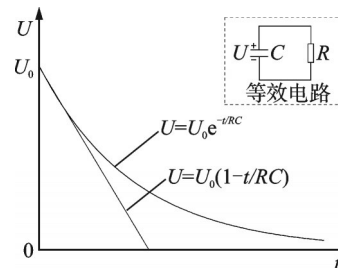


图 12 电荷泄漏对压电厚膜输出电压的影响

Fig.12 Effect of charge leakage on output voltage of piezoelectric thick film

对图 12 中电路进行分析,在任意时间  $t$  有

$$U = U_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad (1)$$

其中: $U$  为力作用后压电厚膜两端电压; $U_0$  为力作用后瞬间压电厚膜两端电压; $R$  为测量系统的绝缘漏电阻; $C$  为测量系统的电容。

将式(1)按级数展开并取前 2 项,得到

$$U = U_0 \left( 1 - \frac{t}{RC} \right) \quad (2)$$

为估算电荷泄漏速度,将方程两边同乘电容  $C$ ,整理后得到

$$Q = Q_0 - \frac{Q_0}{RC} t = Q_0 - \Delta Q \quad (3)$$

其中: $Q$ 为压电厚膜的净输出电荷量; $Q_0$ 为力作用后瞬间压电厚膜产生电荷量; $Q_0/RC$ 为电荷泄漏速度; $\Delta Q$ 为电荷泄漏量。

由式(3)可知,电荷泄漏速度的大小取决于力作用后瞬间压电厚膜产生电荷量 $Q_0$ 、测量系统的电容 $C$ 及其绝缘漏电阻 $R$ 。根据正压电效应,当接触力一定时,压电厚膜产生的电荷总量 $Q_0$ 一定,而 $R, C$ 在系统搭建完成后是确定的,因此电荷泄漏速度为常数。此时电荷产生速度越快,产生同等电荷所需的时间 $t$ 越少,因此电荷泄漏量 $\Delta Q$ 减少,净输出电荷量 $Q$ 增加。考虑到探针接触变形使表面压电厚膜产生电荷以及压电厚膜的响应时间是亚毫秒级,所以可以用探针接触速度表示电荷产生速度。可见,探针接触速度越快,输出电压越高,力感知探针的灵敏度就越高。

力感知探针的灵敏度与接触速度的关系推导过程如下。

将输出电荷速度 $\vartheta_Q$ 和时间 $t$ 相乘,得到输出电荷量 $Q$

$$Q = \vartheta_Q t \quad (4)$$

其中: $\vartheta_Q$ 由输出电压速度 $\vartheta_u$ 与电荷放大器的放大倍数 $A_u$ (20 pC/V)相乘得到。

$\vartheta_u$ 与接触速度 $\vartheta_{\text{cnt}}$ 有关,通过标定系统建立两者之间的关系。接触速度与输出电压速度关系曲线如图13所示。将拟合关系式代入后得到

$$\vartheta_Q = A_u \vartheta_u = 20(25.963\vartheta_{\text{cnt}} - 0.083) \quad (5)$$

$t$ 可以用接触移动距离 $h$ 和 $\vartheta_{\text{cnt}}$ 表示为

$$t = h/\vartheta_{\text{cnt}} \quad (6)$$

接触力与接触距离关系曲线如图14所示。 $h$ 与接触力 $F$ 成正比,得到两者的比例系数为1.464,即

$$h = 1.464F \quad (7)$$

将式(5)~(7)代入式(4),得到灵敏度与接触速度的变化规律。当电荷产生速度低于电荷泄漏速度时,无净电荷输出,此时对应力感知探针的最小使用速度。将图13拟合关系式中输出电压速度 $y$ 设为

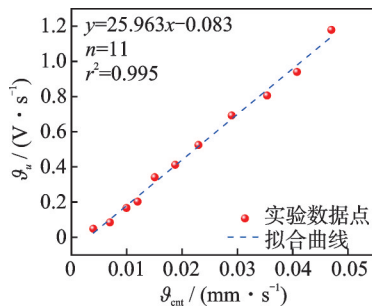


图13 接触速度与输出电压速度关系曲线

Fig.13 Relationship curve between contact speed and output voltage speed

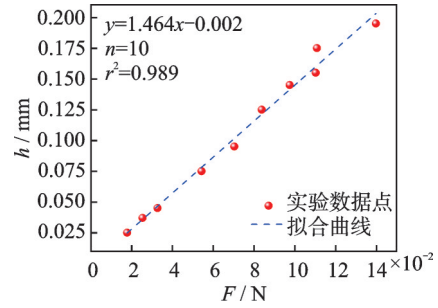


图14 接触力与接触距离关系曲线

Fig.14 Relationship curve between contact force and contact distance

0,求解 $x$ 值为0.003,即为最小使用速度。灵敏度推导公式为

$$\frac{Q}{F} = 760.2 - \frac{2.43}{\vartheta_{\text{cnt}}} \quad (\vartheta_{\text{cnt}} > 0.003 \text{ mm/s}) \quad (8)$$

为了验证式(8)的正确性,对比某一接触速度下灵敏度的实验标定值与公式计算值。通过电动升降位移台将探针的接触速度控制为0.2 mm/s,依次改变接触力大小,记录对应的输出电荷,得到接触力与输出电荷关系曲线如图15所示。输出电荷 $Q$ 与接触力 $F$ 具有良好的线性关系,说明灵敏度在接触速度一定的情况下是常数,即力感知探针的灵敏度与接触速度具有明显的相关性。实测数据的拟合曲线斜率表示在0.2 mm/s的接触速度下探针的灵敏度为744.203 pC/N,式(8)计算出的数值是748.050 pC/N,误差仅为0.52%,说明式(8)有较高的使用价值:明确了力感知探针灵敏度与速度之间的关系,当实际测试确定了接触速度以及对应的输出电荷后,即可计算出当前的接触力,避免了不同速度下接触力与输出电荷之间的重复标定。

对0.2 mm/s接触速度下的探针进行线性度分析,采用最小二乘法对实验数据进行线性拟合。图15为接触力与输出电荷关系曲线。计算力感知探针的非线性误差为4.26%,略高于标准传感器的非线性要求,这是由于操作力感知探针过程中产生感应电荷以及环境因素干扰引起的。

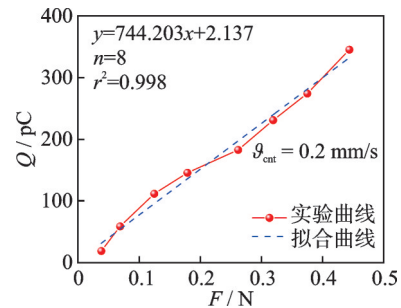


图15 接触力与输出电荷关系曲线

Fig.15 Relationship curve between contact force and output charge

## 4 结束语

笔者对基于电流体喷印压电厚膜的力感知探针进行了仿真与实验研究。首先,通过COMSOL有限元软件分析了极化方向、PZT压电厚膜尺寸以及探针接触角度和受力点对输出电荷的影响,确定了压电厚膜单面喷印极化,喷印长度为45 mm、喷印位置靠近夹持端,探针使用时的接触角度和受力点保持不变;其次,通过电喷印、溅射和极化等工艺完成力感知探针的制备;最后,搭建标定平台,计算出力感知探针的最小使用速度为0.003 mm/s,并推导出探针的灵敏度公式,可用于计算不同接触速度下的接触力。在实测0.2 mm/s的接触速度下,灵敏度良好,达到744.203 pC/N,非线性误差为4.26%,相对于标准传感器较大,这是由于测量过程中产生感应电荷以及环境因素干扰引起的。

### 参 考 文 献

- [1] 吴晓. 面向LED芯片检测与分选的机器视觉定位系统的开发[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2013, 30(3): 93-103.  
WU Xiao. Development of machine vision locating system for LED chips' detection and sorting[J]. Journal of Guizhou University (Natural Science), 2013, 30(3): 93-103. (in Chinese)
- [2] 于亚民, 张茜. 一种限域生长有机半导体晶体的方法[J]. 纳米技术, 2020, 10(1): 6.  
YU Yamin, ZHANG Qian. A method for growing organic semiconductor crystals in limited area[J]. Journal of Nanotechnology, 2020, 10(1): 6. (in Chinese)
- [3] 沈飞, 徐德, 唐永建, 等. 微操作/微装配中微力觉的测量与控制技术研究现状综述[J]. 自动化学报, 2014, 40(5): 785-797.  
SHEN Fei, XU De, TANG Yongjian, et al. Review of measuring and control technology of microforce in micromanipulation and microassembly[J]. Acta Automatica Sinica, 2014, 40(5): 785-797. (in Chinese)
- [4] 李孟祥, 龚红英, 曹磊, 等. 板料弯曲载荷测试用压电式探针测力传感器设计[J]. 锻压技术, 2020, 45(1): 156-162.  
LI Mengxiang, GONG Hongying, CAO Lei, et al. Design on piezoelectric probe force sensor to test sheet bending load [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45(1): 156-162. (in Chinese)
- [5] 邱霖玄, 王佩英, 王欢, 等. 用于机器人手指的SOI基板微压阻式力传感器[J]. 微纳电子技术, 2021, 58(6): 515-521, 530.  
QIU Jixuan, WANG Peiying, WANG Huan, et al. Micro piezoresistive force sensor on SOI substrate for robot fingers [J]. Micronanoelectronic Technology, 2021, 58(6): 515-521, 530. (in Chinese)
- [6] 于昌新, 何彦霖, 何超江, 等. 用于微创手术探针的光纤力传感器设计[J]. 光学精密工程, 2022, 30(20): 2421-2429.  
YU Changxin, HE Yanlin, HE Chaojiang, et al. Design of fiber force sensors for surgical probes[J]. Optics and Precision Engineering, 2022, 30(20): 2421-2429. (in Chinese)
- [7] WATANABE S, SUGIURA H, ARAI F. Stiffness measurement of organoids using a wide-range force sensor probe fabricated using a quartz crystal resonator[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2022, 7(2): 2535-2540.
- [8] PARK J U. High-Resolution electrohydrodynamic jet printing methods for applications in electronics and biotechnology [D]. Champaign: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2009.
- [9] WANG D Z, ZHAO X J, LIN Y G, et al. Fabrication of micro/nano-structures by electrohydrodynamic jet technique[J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2017, 12(4): 477-489.
- [10] WANG D Z, ZHAO X J, LIN Y G, et al. Nanoscale coaxial focused electrohydrodynamic jet printing[J]. Nanoscale, 2018, 10(21): 9867-9879.
- [11] NIU X, JIA W, QIAN S, et al. High-performance PZT-based stretchable piezoelectric nano-generator[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2018, 7(1): 979-985.
- [12] YIN Z, HUANG Y, DUAN Y, et al. Electrohydrodynamic direct-writing for flexible electronic manufacturing [M]. Singapore: Springer, 2018: 4-6.
- [13] WANG D, LI X, SHI P, et al. Electrohydrodynamic atomization deposition and mechanical polishing of PZT thick films[J]. Ceramics International, 2016, 42(11): 12623-12629.
- [14] WEN B, SHIMIZU Y, MATSUKUMA H, et al. A differential strategy for measurement of a static force in a single-point diamond cutting by a force-controlled fast tool servo[J]. Measurement Science and Technology, 2020, 31(7): 074014.



**第一作者简介:**王大志,男,1978年8月生,博士、教授。主要研究方向为纳米打印技术与纳米器件、高性能压电传感器与执行器、复杂工况下多物理量融合传感技术与系统。曾发表《A zine oxide resonant nano-acceleromet with ultra-high sensitivity》(《Nature Communications》2024, Vol.15)等论文。  
E-mail: d.wang@dlut.edu.cn