一种基于氮化铝压电微加工超声发射器的液体密度传感器，不受液体黏度影响

Xuecong Fu [1]、Liang Lou[2, 3**]和 Hao Ren[1*1] 信息科学与技术学院，上海科技大学，中国上海，201210[2] 微电子学院，上海大学，中国上海，201800[3] 上海工业μ技术研究院，中国上海，201899*通讯作者电子邮箱：renhao@shanghaitech.edu.cn**通讯作者电子邮箱：liang.lou@sitrigroup.com

摘要：

为克服传统液体密度传感器体积庞大、样品需求量大且难以自动化等局限，研究人员开发了基于微机电系统的方法。然而，黏度–密度耦合效应往往会损害高黏度液体测量的准确性。尽管已有多种解耦策略被提出，但这些方法通常复杂且效率低下。本研究提出了一种不受 黏度干扰的基于 AlN 的 PMUT 液体密度传感器。该传感器采用两个相同的压电微机械超声换能器，分别作为发射器和接收器。发射器产生的超声波经液体表面反射后，由接收器检测。理论计算表明，在激励频率保持恒定时，接收电信号的振幅与液体密度呈特定关系，而黏度引起的信号振幅变化可以忽略不计。因此，通过拟合接收信号振幅与 0–100% 甘油溶液密度之间的关系，对 PMUT 液体密度传感器进行校准后，该器件即可测量此范围内的密度，且不受液体种类和黏度的影响。实验结果表明，使用经甘油校准的拟合公式，该传感器能够准确测量丙二醇溶液的密度；采用经甘油校准的拟合公式测得的丙二醇溶液密度与实际密度之间的计算误差率低于 0.125%，表明该测量方法对两种液体之间的黏度差异不敏感。所提出的方法在高黏度环境（80%–100% 甘油溶液）下的最大误差率低于 2.5%，仅为其他基于谐振频率的密度测量方法的 20%。所研制的 PMUT 液体密度传感器可测量的密度范围为 0.789 至 1.261 g/cm3。

关键词：液体密度、压电微加工超声换能器（压电微机械超声换能器）、单一测量频率、分辨率、谐振频率。

1. 引言

在许多领域，测量液体的密度都是必不可少的步骤之一。例如，在生物医学应用中，血液和尿液等体液的密度可以反映个人的健康状况 [1]；在

食品工业中，检测液体密度可以确定发酵状态 [2]；在化学工业中，确定液体的密度可以改进过程监测和化学分析 [3]。尽管测量液体密度至关重要，但传统的测量方法，如静水压力法、浮力法和共振法，存在传感器尺寸较大、需要大量液体样品、需人工操作以及不适用于自动测量等局限性 [4-6]。

为应对这些技术挑战，微型化器件不仅能够有效降低生产成本和能耗，还可以通过微量样品实现快速响应。因此，在过去半个世纪中，MEMS技术得到了快速发展并被广泛采用，基于不同传感原理的液体密度传感器也应运而生，例如悬臂梁[7], 声波[8], 音叉[9],和膜片[10] 传感器。然而，在测试高黏度液体的密度时，黏度和密度的耦合效应会显著影响结果的准确性。例如，Ghatkesar 等 [11] 采用Elmer Dreier模型，通过测量甘油水溶液中微悬臂梁密度传感器多个弯曲振动模态的谐振频率和品质因数，区分了液体密度和黏度。然而，该方法需要对所需的两个或更多振动模态进行精确且独立的激励，不同模态的振动可能会相互干扰。此外，为区分黏度和密度而测量多个参数，即多个振动模态中的品质因数（Q）和谐振频率，可能会引入更多测量误差；对于振幅较小的高阶模态，其信号还很容易被强烈的基模信号或噪声淹没。Yang 等 [12] 优化了音叉液体密度传感器的结构，随后使用偏最小二乘模型拟合实验数据的频率-密度特性，并建立了基于黏度补偿的密度计算模型，通过结合频率-黏度特性实验获得更准确的密度值。然而，使用该模型进行每次测量时，都需要额外确定待测液体的黏度，这增加了测量过程的复杂性。Zhang 等 [13]为石英音叉液体密度传感器建立了流体动力学模型，以实现密度和黏度传感，并在测量多个谐振频率和品质因数后，通过求解方程获得密度和黏度。然而，在高黏度液体中，品质因数会急剧下降，导致共振峰变得非常宽且平坦，难以准确确定其峰值频率和半峰宽，从而削弱了f和Q测量的可靠性。Herrmann 等[14] 报道了一种基于分层石英/硅$_2$ 系统的微声学传感器，该系统具有用于Love模态的矢状褶皱，并可通过双延迟线器件实现液体捕获效应，从而分别测量液体密度和黏度。然而，尽管该方法能够使Love模态器件对液体捕获和黏性耦合的响应比石英晶体微天平器件显著更高，黏性耦合仍会对密度测量产生影响。

在众多微型液体密度传感器中，PMUT液体密度传感器凭借其独特优势已成为研究热点。与基于悬臂梁结构的液体密度传感器相比，PMUT液体密度传感器具有更高的 Q 值，因此在

较高密度的液体中工作时，更容易区分谐振频率，从而提高传感器的分辨率 [15, 16]。与CMUT液体密度传感器相比，PMUT液体密度传感器具有偏置电压较低、线性度良好和能量损耗低等优势 [17-19]。表面声波（SAW）传感器的谐振频率较高，通常为数百兆赫兹至数吉赫兹。PMUT液体密度传感器的谐振频率低于SAW传感器，同时功耗也更低 [20-23]。与基于音叉结构的液体密度传感器相比，PMUT传感器具有更高的灵敏度[24-27]。对于基于以非表面波模式振动的谐振器的液体密度传感器，例如Manzanoque 等人 [28] 利用压电驱动微板的二阶面外模态设计的传感器，其锚固结构在恶劣环境中容易损坏，从而导致传感器失效[28-30]。

许多先前的研究尝试通过监测浸没在不同密度液体中的压电微机械超声换能器的谐振频率和品质因数变化来测量液体的密度。然而，黏度与密度之间的相互作用会影响压电微机械超声换能器的谐振频率和品质因数，从而导致高黏度液体的密度测量出现偏差。例如，Ledesma 等人 [31]展示了一款采用双顶部电极的AlScN PMUT-CMOS芯片，该芯片在低浓度液体中表现出谐振频率与液体密度之间的线性关系。然而，在高浓度甘油溶液中，测得的谐振频率与密度之间呈非线性关系，因此该方案难以准确测量高黏度液体的密度。Roy等人 [1] 开发了一种PMUT-流体-PMUT（PFP）系统作为流体密度传感器，该系统利用了低黏度液体中谐振频率与密度之间的线性关系。然而，这种设计需要一对相对放置的压电微机械超声换能器，因此难以将其安装在任意表面上。他们测试了器件在高黏度蓖麻油（994 kg/m^3, 637 cp）和纯水（998 kg/m^3, 0.89 cp）中的振动谐振频率，发现蓖麻油的高黏度影响了谐振频率值，这表明该液体密度传感器无法用于高黏度液体环境。后续研究（例如 Roy 等人的锆钛酸铅（PZT）双电极压阻式微流体传感器集成微流道）解决了PFP系统无法安装在同一表面上的问题 [32]。然而，高黏度液体密度测量精度不足的问题仍然存在 [33]。Tsao 等人 [34] 使用机器学习算法，通过分析压电微机械超声换能器产生的声学信号变化（包括飞行时间、信号幅值等参数）来表征液体性质，从而获得更准确的测量结果，并实现了流体黏度和密度的同步测量。尽管这种方法能够同时检测液体的黏度和密度，但其模型结构相对复杂，且仅在低密度、低黏度条件下有效。

在本研究中，我们介绍了一种基于 AlN 的 PMUT 液体密度传感器，该传感器仅对液体密度敏感，而不受液体黏度变化的影响。我们选用两个并排置于液体中的相同 PMUT，分别作为液体密度传感器的发射器和接收器。施加单频激励电压以驱动发射端 PMUT 产生超声波，超声波经

液体表面反射后，由接收端 PMUT 接收并产生电信号。理论计算表明，当激励频率保持不变时，接收到的电信号振幅与液体密度存在特定关系，而黏度引起的信号振幅变化可以忽略不计。因此，在通过拟合 0-100% 甘油溶液中接收信号振幅与密度之间的关系，对 PMUT 液体密度传感器进行校准后，该器件便可测量此范围内的密度，而不受液体黏度影响。在液体密度范围为 1.013 g/cm^3 至 1.056 g/cm^3, 时，六种不同密度的丙二醇溶液的输出电压与在该密度范围内由甘油溶液建立的校准曲线高度一致；将输出电压值代入拟合方程计算密度后，计算密度与实际密度之间的误差率小于 0.125%。为克服扫描法测量液体密度的局限性，我们采用固定频率作为激励信号频率，并直接根据输出电压幅值计算液体密度。此外，发射器采用固定频率下 3 V 的激励电压，与扫描法的电路相比，激励电路更加简洁。所提出的方法在高黏度环境（80%-100% 甘油溶液）下的最大误差率低于 2.5%，仅为其他基于谐振频率的密度测量方法的 20%。由于接收信号与发射器的激励信号频率相同，且信噪比较高，接收端的测量电路也较为简单。该双压电微机械超声换能器密度传感器系统在水中的 Q 值达到 76.8，性能优于悬臂梁、音叉谐振器和弯曲模态谐振器。PMUT 的腔体半径最大可达 500 μm，在纯水中，输出信号的信噪比最高可达 126 dB。我们对基于 AlN 的 PMUT 液体密度传感器的分辨率进行了评估，结果表明，所提出的 PMUT 液体密度传感器具有出色的检测分辨率，可达 2.6×10^{-4} g/cm^3。

2. 工作原理

如图1(a)所示，该器件由两个完全相同的压电微机械超声换能器组成，其中一个为发射压电微机械超声换能器，另一个为接收端压电微机械超声换能器，二者并排放置于液体介质中。基于氮化铝的压电微机械超声换能器由夹在两层钼金属电极之间的氮化铝压电层、硅支撑层以及带有背面刻蚀腔的硅衬底组成。由电极层、压电层和支撑层构成的层叠板形成振动膜片，该膜片通过从衬底背面进行刻蚀而释放。当在上下电极之间施加交变电压时，压电层发生形变，驱动膜片振动，并由于逆压电效应发射球面超声波。超声波在液体与空气的界面处反射后，被接收端压电微机械超声换能器接收，并因压电效应产生交变信号。由于压电微机械超声换能器处于液体中，液体会对膜片的振动产生附加质量效应。此时，发射端压电微机械超声换能器处的膜片和液体可视为一阶阻尼谐振子

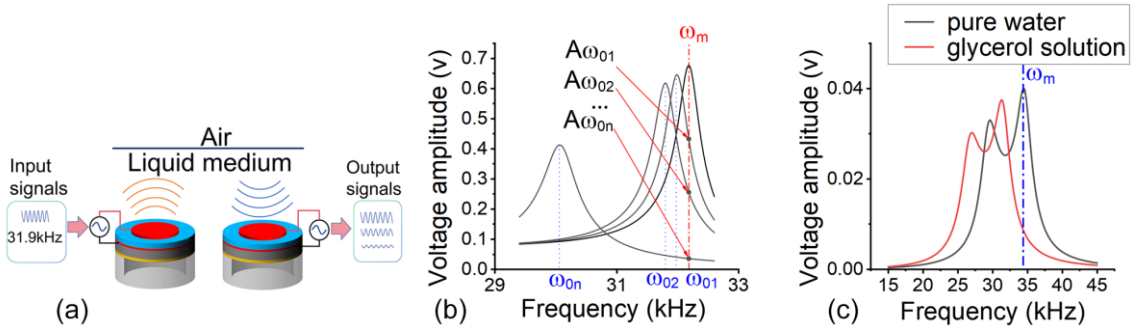

图1。（a）该液体密度传感器的示意图。（b）采用固定频率测量不同密度甘油溶液输出电压的示意图。（c）发射器与接收器的谐振频率不匹配时接收器的幅频特性曲线。黑色曲线表示接收器在纯水中的幅频特性曲线；红色曲线表示接收器在甘油溶液中的幅频特性曲线。蓝线的横坐标表示所选测量频率。

其正在进行受迫振动，可使用质量-弹簧-阻尼器模型 [35, 36]进行分析。考虑流固耦合效应时，液体中压电微机械超声换能器的弹簧模型需要在传统质量-弹簧-阻尼器系统的基础上引入流体惯性和阻尼的影响 [35, 36]。作用于该模型的总外力等于逆压电力减去弹性力和阻力。根据牛顿第二定律：

$$F_{total} = F_{pizeo} - k_{eq}x - b\dot{x} = m_{eff}\ddot{x} \tag{1}$$

其中，F_{total}、F_{pizeo}、 k_{eq}、 x、 b和m_{eff}分别为总力、压电效应力、弹簧常数、位移、阻尼系数，以及包含附加质量在内的等效质量。阻力$b\dot{x}$是机械阻尼力、黏性阻尼力和声辐射阻尼力的合力[37]。它等于机械阻尼系数c_{eq}、黏性阻尼系数c_{vis}和声辐射阻尼系数c_{rad}之和与振动速度的乘积。弹性力等于弹性系数k_{eq}与位移x的乘积。m_{eff}是振动系统的总质量。整理式（1）得：

$$(m_{eff})\ddot{x} + (c_{eq} + c_{vis} + c_{rad})\dot{x} + k_{eq}x = F_{pizeo} \tag{2}$$

由式（2）可得振幅A的解：

$$A = \frac{F_0}{\sqrt{[k_{eq} - \omega^2 m_{eff}]^2 + \omega^2 (c_{eq} + c_{vis} + c_{rad})^2}} \tag{3}$$

$$k_{eq} = {\omega_{eq}}^2 \cdot m_{eq} \tag{4}$$

其中，F_0 是F_{pizeo}的振幅， ω_{eq} 为特征频率，m_{eq} 为压电微机械超声换能器振膜质量，ω 为振动角频率。

机械阻尼系数 c_{eq} 通常用于表征系统内由材料内部摩擦以及结构接头处的能量耗散所产生的阻尼效应，即

$$c_{eq} = \frac{\gamma k_{eq}}{\omega} \tag{5}$$

其中，γ 是硅的损耗因子（γ=1×10^{-4}），ω 是振动角频率。

在共振振动条件下，PMUT 膜表面的流体会与膜一起振动。因此，流体动力学标量参数为斯托克斯数（在一些文献中也称为动态雷诺数）。斯托克斯数表示附加质量力与黏性阻尼力之比。其计算公式为 [38-40]:

$$Stk = \frac{\rho \omega a^2}{\eta} \tag{6}$$

其中，a 是特定流动的特征长度（即 PMUT 膜片的半径），η 是介质的动力黏度，ρ 是介质的密度，ω 是振动角频率。

当斯托克斯数远大于 1 时（该器件在甘油中的斯托克斯数约为 97），这表明惯性占主导地位，黏性效应可以忽略。此时，当圆形 PMUT 薄膜在流体中进行谐振动时，其附加质量的计算公式为 [41]:

$$m_{add} = 0.65\pi\rho a^3 \tag{7}$$

$$m_{eff} = m_{eq} + m_{add} \tag{8}$$

根据 Kozlovsky 2009，黏度导致的品质因数计算如下：[42]

$$Q_{vis} = \frac{0.95}{\xi} \tag{9}$$

其中，ξ 计算如下

$$\xi = \sqrt{\frac{\eta}{\rho_f \omega a^2}} \tag{10}$$

其中，η 是液体的动力黏度，a是振膜半径，ρ_f 是液体密度，ω 是振荡角频率。

根据 Thomson，1983 [43], 该压电微机械超声换能器的黏性阻尼系数（c_{vis}）由 $c_{vis} = {m_{eff}\omega}/{Q}$计算。因此，式（2）中的黏性阻尼系数计算如下：

$$c_{vis} = \frac{m_{eff}\omega}{Q_{vis}} \tag{11}$$

由式（7）至式（11）：

$$c_{vis} = \frac{m_{eff}\omega\sqrt{\eta}}{0.95\sqrt{\rho_f \omega a^2}} = \frac{m_{eff}\sqrt{\eta\omega}}{0.95\sqrt{\rho_f a^2}} \tag{12}$$

对于浸入液体中的压电微机械超声换能器，部分能量以声波的形式耗散，从而产生阻尼[37]。这种阻尼称为声辐射阻尼c_{rad}，其计算公式为[44]:

表 I 压电微机械超声换能器的材料属性。

层	材料	杨氏模量（GPa）	密度(kg/m³)	泊松比
顶部电极	Mo	312	10200	0.31
压电材料	AlN	410	3300	0.27
底电极	Mo	312	10200	0.31
衬底	Si	166	2329	0.28

表 II 水-甘油混合物的性质

性质	甘油质量百分比 (%)					
	0	20%	40%	60%	80%	100%
密度(kg/m³)	1000	1052.2	1104.4	1156.6	1208.8	1261
黏度(cP)	0.89	1.38	2.78	7.56	36.4	648.2
声速(m/s)	1482	1545	1627	1719	1817	1920

$$c_{rad} = R_m = 4\pi a^2 c\rho_f \left[\frac{(ka)^2}{1+(ka)^2}\right] \tag{13}$$

其中，R_m 是声辐射阻抗Z_{rad} 复数形式的实部（$Z_{rad}=R_m+jX_m$）。根据 Kinsler 等人2000 [44], 的研究，R_m 表示能量耗散，其数值等于声辐射阻尼系数c_{rad}。c是波速，k是声辐射波数，$k=2\pi f/c$，声辐射效率因子为 $ka=2\pi fa/c$。在我们的实验中，声源在水中振动产生的声波频率为f=31.9 kHz，a=500×10^{-6} m，c=1482 m/s，因此ka=0.0676≪1，辐射阻抗R_m 采用单极子声源模型计算。上述公式正是单极子声源声辐射阻抗的计算公式。

通过上述理论方程，我们可以得到压电微机械超声换能器在不同密度的液体中振动时阻尼系数的理论值。根据本文实验装置的参数（表 I 和表 II），

表 III 不同浓度液体的阻尼系数

甘油体积百分比	0	20%	40%	60%	80%	100%
c_{eq}	2.96×10^{-6}	3.017×10^{-6}	3.076×10^{-6}	3.137×10^{-6}	3.2×10^{-6}	3.27×10^{-6}
c_{vis}	2.35×10^{-4}	2.96×10^{-4}	4.24×10^{-4}	7.07×10^{-4}	1.57×10^{-3}	6.6×10^{-3}
c_{rad}	1.95×10^{-2}	1.88×10^{-2}	1.79×10^{-2}	1.69×10^{-2}	1.61×10^{-2}	1.57×10^{-2}

我们可以分别使用式（5）、（12）和（13）计算该装置在不同浓度的甘油溶液中的c^{eq}、c_{vis}和c_{rad}，如表 III 所示。

表 III 显示，在甘油浓度测量范围 0-100% 内，c_{eq} 和c_{vis}远小于c_{rad}，因此可以忽略c_{eq} 和c_{vis} 对 (3) 的影响。因此，在我们的实验环境中，对于 0-100% 的甘油溶液，可以忽略黏度对振幅的影响。根据 (4)、(7)、(8) 和 (13)，(3) 可以改写为：

$$A \approx \frac{F_0}{\sqrt{\left[(\omega_{eq}{}^2-\omega^2)m_{eq}-0.65\pi\omega^2\rho_f a^3\right]^2+\omega^2\left(\frac{4\pi a^2 c\rho_f (ka)^2}{(1+ka)^2}\right)^2}} \tag{14}$$

图 1(b) 显示了传感器浸入甘油溶液时经仿真得到的幅频特性曲线。从该曲线可以看出，在一定范围内，随着液体密度增加，压电微机械超声换能器的谐振频率会降低（$\omega_{01}>\omega_{02}>...\omega_{0n}$）[31]。当待测未知液体对应的压电微机械超声换能器谐振频率介于 ω_{01} 和 ω_{0n} 之间时，只要选择一个大于或等于 ω_{01} 的激励频率，就可以将该密度范围内所有液体对应的压电微机械超声换能器输出电压与液体密度一一对应。例如，在图 1(b) 中，选择大于或等于 ω_{01} 的单一激励频率 ω_m，得到电压值$A\omega_{0i}$（$i=0\sim n$），其随液体密度增加而降低（$A\omega_{01}>A\omega_{02}>...A\omega_{0n}$）。因此，在定频测量方案中，液体密度与压电微机械超声换能器的振幅之间存在一一对应关系。

声波传播过程中，振幅的减小是由于声传播路径（球面声波）以及黏度引起的声介质损耗[31]。对于这种固定距离的超声波传播，黏性衰减系数为 $\alpha \approx \frac{2\cdot\pi^2\cdot f_{liquid}{}^2\cdot\eta}{\rho_f\cdot c_{liquid}{}^3}$，其中 f_{liquid} 是液体中声波的频率，在固定频率测量中为常数；η 是液体的黏度；ρ_f 是液体的密度；c_{liquid} 是液体中的声速；ρ_f 是液体的密度 [31]。因此，PMUT接收器接收到的信号会因黏性损耗而呈指数衰减（$e^{-\alpha\cdot AP}$，AP 是超声波的传播距离）。如表 IV 所示，黏性衰减系数非常小，因此 $e^{-\alpha\cdot AP}$ 接近 1（0.99999995< $e^{-\alpha\cdot AP}$ <0.999989）。这表明，在我们的实验中，声波传播过程中由黏度造成的衰减可以忽略不计。

根据理论推导可知，随着液体密度增加，PMUT 振膜发射端的声波振幅会减小。同时，PMUT 接收端接收到的声波振幅也会减小，振膜振幅随之减小。相应地，接收端的输出电压振幅也会减小。

表 IV 不同浓度甘油溶液中的声波衰减系数

甘油溶液浓度	0	20%	40%	60%	80%	100%
衰减系数 α	5.04×10^{-6}	6.25×10^{-6}	9.81×10^{-6}	2.06×10^{-5}	7.73×10^{-5}	1.07×10^{-3}

图 1(c) 展示了在本实验的仿真过程中，当发射压电微机械超声换能器和接收端压电微机械超声换能器的谐振频率不匹配时接收器的幅频特性曲线。当两个压电微机械超声换能器出现谐振频率失配时（表现为幅频响应曲线上的双峰），测量频率应大于或等于图 1(c) 中所示的 ω_m。在这种情况下，随着密度增加，发射压电微机械超声换能器的振幅和接收端压电微机械超声换能器的输出电压仍然遵循上述结论。因此，这种固定—

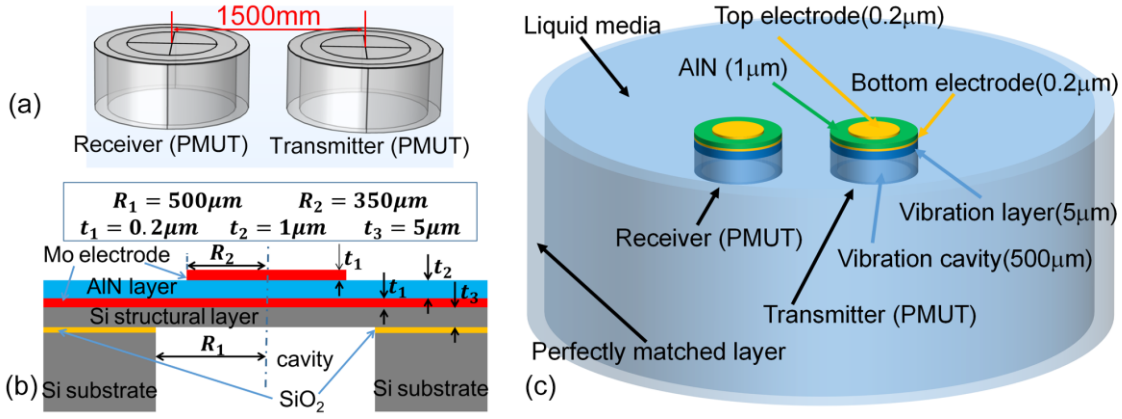

图 2. (a) 发射压电微机械超声换能器的有限元 T. (c) 参数（FEM）仿真模型和接收端压电微机械超声换能器。（b）压电微机械超声换能器压电微机械超声换能器模型的参数。

频率测量方法不仅能够补偿发射器-接收器 PMUT 失配所引起的误差，还能实现不受黏度影响的密度测量。

3. 器件设计与建模

我们采用有限元法（FEM）仿真验证了压电微机械超声换能器发射与接收系统工作原理的可行性，并使用三维模型进行建模。建模结构如图 2 所示。

如图 2(a) 所示，我们设计了两个压电微机械超声换能器单元的三维模型，两者相距 1.5 mm，放置在液体介质底部中央。PMUT 振膜自上而下由以下各层组成：0.2 μm 顶部电极层（钼）；1 μm 氮化铝层；0.2μm 底部电极层（钼）； 5 μm 硅层。顶部电极直径为 700 μm，振动腔直径为 1000 μm。PMUT 单元的结构如图 2(b) 所示。整个液体介质呈圆柱形，其顶部的圆形横截面作为介质与空气的接触面。超声波经该表面反射后，从发射端压电微机械超声换能器传播至接收端压电微机械超声换能器。圆柱形液体介质的侧面设有厚度为 0.5 mm 的完美匹配层。接下来，我们为三维模型设置物理场，以便进行后续仿真。PMUT 单元结构设为“固体力学”物理场；氮化铝层设为“静电”和“压电效应”物理场；液体介质设为“压力声学”物理场，其中介质上部横截面作为介质与空气的接触面，也就是声波反射面。介质周围区域设为用于吸收声波的完美匹配层，其余界面均设为硬声场边界，如图 2(c) 所示。在发射端 PMUT 单元的电极间施加电压为 3 V 的交变信号，通过测量接收端 PMUT 单元电极间输出信号的电压幅值，即可计算液体介质的电流密度。

我们在发射器处采用固定的非谐振频率作为激励信号频率，以模拟

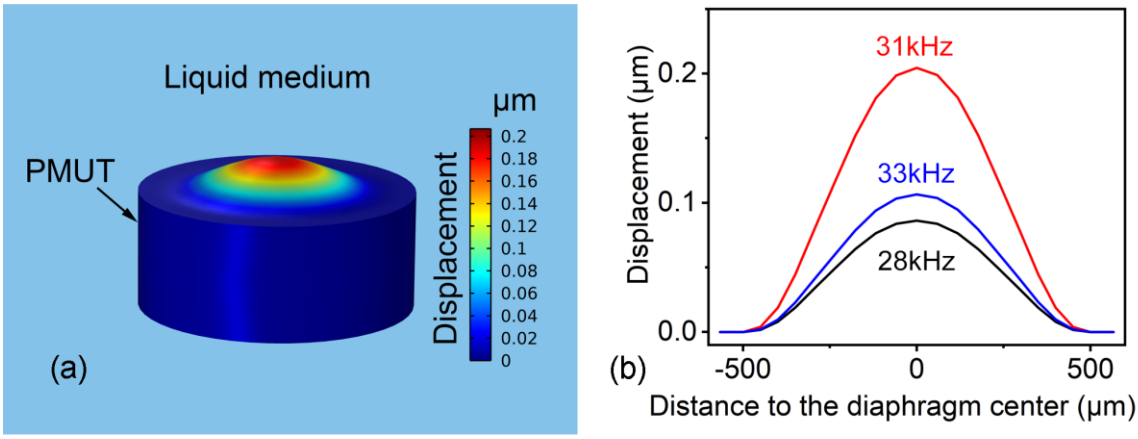

图 3. (a) 压电微机械超声换能器在非谐振频率下振动模态的有限元仿真结果。 (b) 不同频率下压电微机械超声换能器振动模态位移的有限元仿真结果。

PMUT 振膜在非谐振频率下的振动状态。

A. 压电微机械超声换能器在非谐振频率下的振动模态有限元仿真

图 3(a) 展示了介质中 PMUT 振膜位移分布的仿真结果。可以看出，最大位移出现在 PMUT 的中心，而膜片位移从中心到边缘单调递减，可判定为典型的一阶谐振模态。图 3(b) 展示了接收端压电微机械超声换能器中膜片直径上各点的位移幅值。三条曲线分别表示在三个不同频率的交变信号激励下的位移幅值曲线。红线表示激励信号设为器件谐振频率时的位移幅值曲线，黑线和红线则表示激励信号设为器件非谐振频率时的位移幅值曲线。对于所有曲线，越靠近膜片中心，位移幅值越大。从图中可以看出，接收端压电微机械超声换能器中膜片的振动属于一阶振动模态。这证明，在采用非谐振频率进行测量时，接收端压电微机械超声换能器也会输出交变信号。

仿真结果表明，发射压电微机械超声换能器与接收端压电微机械超声换能器并排布置构成的组合系统，在理论上可用于表征液体密度。

B. 不同 AlN 层厚度下压电微机械超声换能器的仿真

我们首先为压电微机械超声换能器（PMUT）选择了 1000 μm 的空腔尺寸。由于氮化铝层厚度会影响 PMUT 薄膜的刚度和面密度，因此会影响发射端 PMUT 的振幅和谐振频率，以及接收端 PMUT 的输出电压幅值。在有限元仿真中，我们将介质设为密度为 1 g/cm^3 的纯水。我们改变氮化铝层的厚度，并在激励信号频率为谐振频率时，测量接收端 PMUT 电极间输出信号的电压幅值，如图 4(a) 所示。氮化铝层厚度为

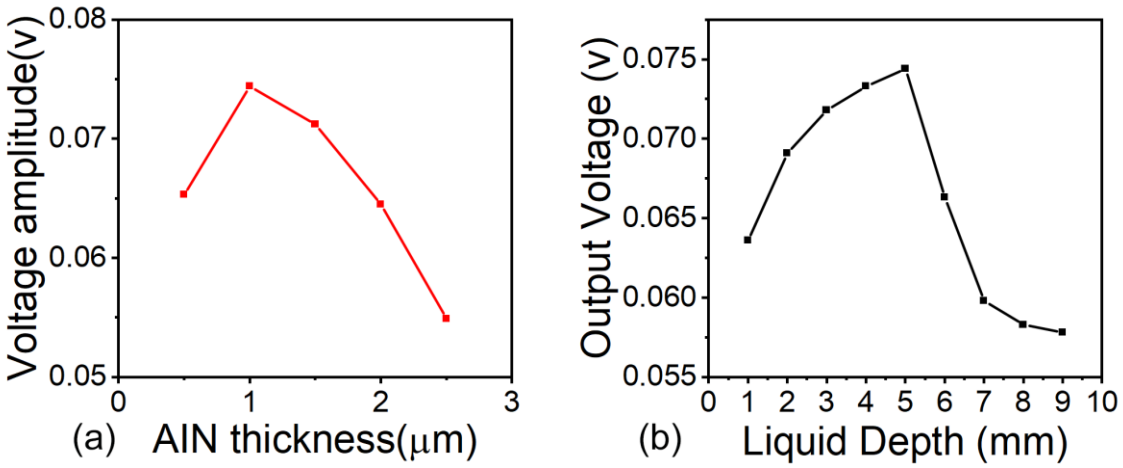

图4。（a）仿真接收端压电微机械超声换能器 i 不同AlN层厚度下压电微机械超声换能器的仿真结果。(b).....的仿真输出电压幅度不同深度的纯水中。

1 μm 时，输出信号最强，因此我们将氮化铝层厚度设为 1 μm。

C. 不同腔体直径的压电微机械超声换能器仿真

将两个压电微机械超声换能器的氮化铝厚度设为1 μm，腔体直径分别设为700、1000和1300 μm。介质密度分别设为1、1.0261、1.0522、1.0783、1.1044、1.1305和1.1566g/cm^3，分别对应浓度为0–60%的甘油水溶液的密度。表V显示了仿真测量浓度为0–60%的甘油水溶液的谐振频率范围。若将该范围内的最高频率用作测量信号频率（即该压电微机械超声换能器在纯水中的谐振频率），并将介质密度设为上述值，则接收端压电微机械超声换能器的输出电压范围如表V第四行所示。从表中数据可以看出，当腔体直径为1000 μm时，使用单一测量信号频率代替扫频测量，可以采集到大小适宜的电压信号。当腔体直径为1300 μm时，输出信号的电压幅值较高，而谐振频率带宽较窄。少量固定测量频率即可覆盖整个

表V 不同尺寸压电微机械超声换能器的谐振频率、品质因数和输出电压仿真结果

腔体直径（μm）	700	1000	1300
谐振频率带宽（kHz）	5.3	3.2	1.5
品质因数	83.8	81.75	74.7
接收端压电微机械超声换能器的电压幅值(V)	0.03319	0.07444	0.0945

频率带宽较大，但此时器件的品质因数较低。当腔体直径为 700 μm时，输出信号的电压幅值不高，且谐振频率范围较大。需要采用更多固定测量频率才能覆盖整个频率

带宽，这会增加测量电路的复杂度。因此，选择腔体直径为1000 μm是一种较为理想的折中方案。

表VI 不同距离下PMUT的输出电压值

距离（μ米）	1200	1500	1800	2000	2500	3000
电压幅值（V）	0.0747	0.0744	0.0717	0.0701	0.0659	0.0444

D. 不同距离下PMUT的仿真

为研究压电微机械超声换能器之间的距离对器件性能的影响，我们将发射端和接收端压电微机械超声换能器之间的距离设为1200、1500、1800、2000、2500和3000 μm，输出电压如表VI所示。结果发现，随着距离缩短，接收端压电微机械超声换能器的输出电压振幅增大。因此，在确保没有横波干扰的前提下，我们将两个压电微机械超声换能器之间的距离确定为1500 μm。

E. 不同深度纯水中PMUT的仿真

为研究液体深度对测量结果的影响，我们将PMUT的振动腔直径、AlN厚度和PMUT距离分别设为1000 μm、1 μm和1500 μm。液体深度分别设为1、2、3、4、5、6、7、8和9 mm。液体为纯水。接收端的仿真输出电压幅度如图4(b)所示。根据仿真数据，液体深度为5 mm时输出信号最强。因此，将液体深度设为5 mm。

F. 制造引起的尺寸误差对器件性能的仿真

为了研究制造工艺导致的 PMUT 尺寸参数误差对器件性能的影响，我们模拟了一个腔体直径为 1000 μm 的 PMUT 器件。我们改变了腔体

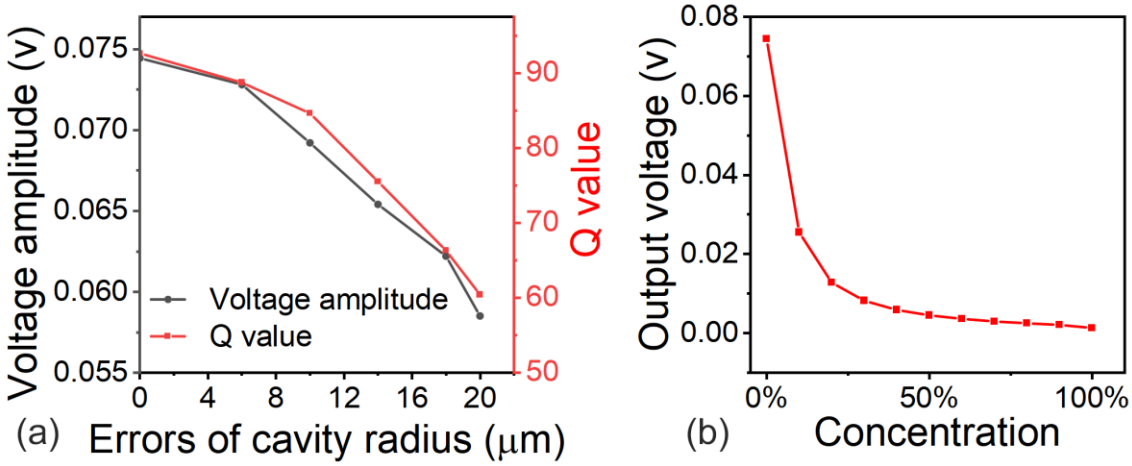

图5. (a) 制造工艺引起的尺寸参数误差对器件性能的影响。(b) 在固定频率31.9 kHz下，接收端压电微机械超声换能器在不同密度介质中的输出电压值。

直径，使发射压电微机械超声换能器的腔体半径分别减小 6、10、14、18 和 20 μm。当纯水中的激励信号频率为纯水的谐振频率时，接收端压电微机械超声换能器的输出电压如图5(a)所示，分别为 0.0728 V、0.0692 V、0.0654 V、0.0622 V 和 0.0585 V。当两个压电微机械超声换能器的释放腔半径误差为 20 μm 时，接收端压电微机械超声换能器的输出电压下降 21.37%，品质因数下降 34.8%。这也证明了制造工艺对于提升器件性能的重要性。

G. 不同密度介质中压电微机械超声换能器在固定频率下的仿真 y

在仿真中，氮化铝层的厚度设为1 μm，腔体直径设为1000 μm，硅层厚度设为5 μm，两个压电微机械超声换能器器件之间的距离设为1500 μm，并且

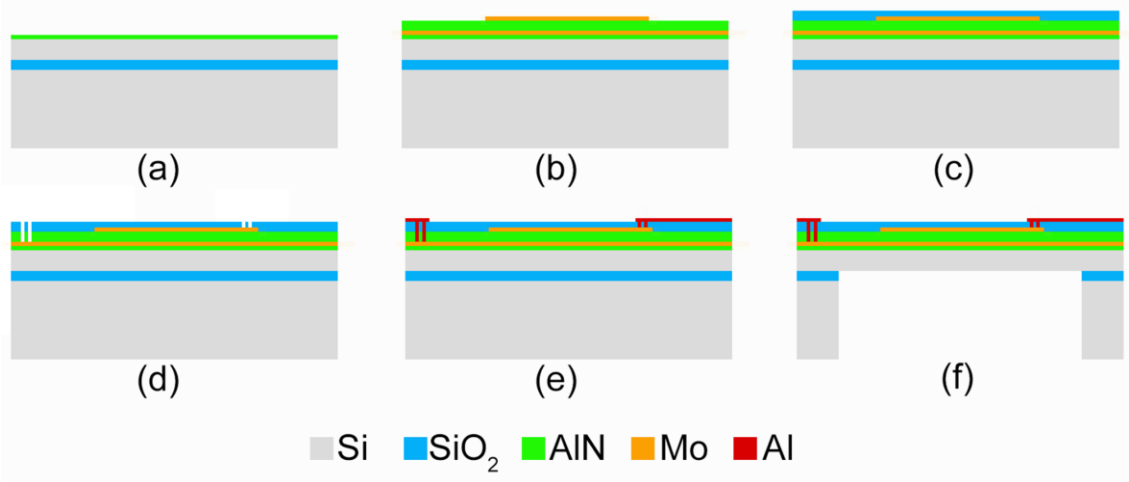

图6. 制造工艺 流程图。（a）氮化铝种子层沉积。（b）顶部电极图案化。（c）氧化层沉积。(d) 顶 部及电极开口。(e) 铝焊盘图形化。(f) 底部释放。

液体深度设为5 mm。介质参数以递增方式从1变为1.261 g/cm^3，表示介质浓度从0%变为100%。图5(b)显示了不同密度介质中接收端压电微机械超声换能器在31.9 kHz固定频率下的输出电压。随着介质密度增加，电压值近似呈指数下降。

4. 制造工艺

PMUT 的制造工艺如图 6 所示。PMUT 采用五掩模工艺，在 MEMS 专用绝缘体上硅晶圆上制造。首先，如图 6(a) 和 (b) 所示，在 MEMS 专用绝缘体上硅晶圆上依次溅射沉积 0.02 μm 氮化铝种子层、0.2 μm 钼下电极层、1 μm 氮化铝压电层和 0.2 μm 钼上电极层。通过等离子体刻蚀顶部圆形钼层。随后，采用等离子体增强化学气相沉积（PECVD）沉积 0.2 μm 低应力二氧化硅，如图 6(c) 和 (d) 所示。在图 6(e) 中，制作上、下电极的通孔时，使用三氟甲烷通过反应离子刻蚀（RIE）刻蚀二氧化硅层，并使用

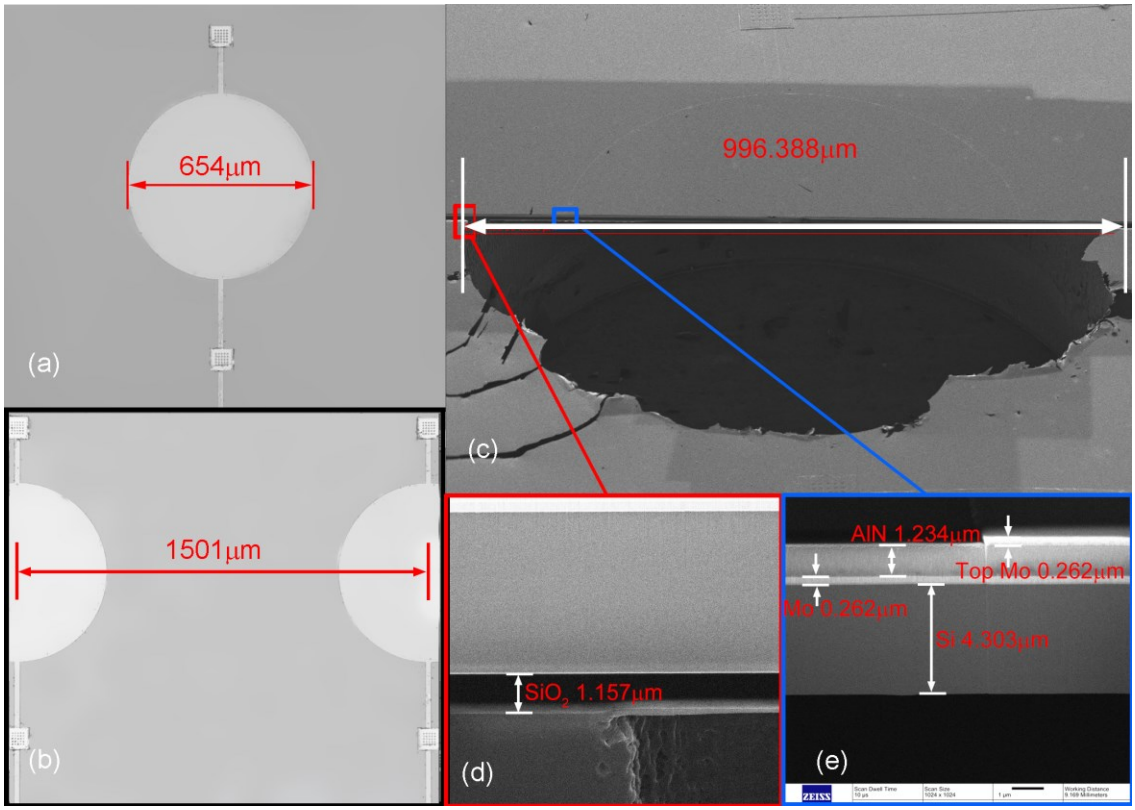

图 7. (a) 和 (b) PMUT 的显微镜图像。(c) 切开膜片及暴露腔体的倾斜氦离子显微镜图像。(d) 背面刻蚀腔边界的放大氦离子显微镜图像。 (e) 释放膜片横截面结构的放大氦离子显微镜图像。

结合氯气和三氯化硼气体的反应离子刻蚀。随后，沉积 0.7 μm 铝层并将其刻蚀成键合焊盘。最后，对 MEMS 专用绝缘体上硅晶圆背面进行深反应离子刻蚀（DRIE）和缓冲氧化物刻蚀（BOE），去除硅层和 SiO_2 层，释放 PMUT 薄膜，如图 6(f) 所示。图 7 展示了压电微机械超声换能器的显微镜图像。 图 7(a) 和 (b) 展示了 PMUT 的显微图像，顶部电极直径为 654 μm，相邻两个 PMUT 之间的中心距为 1501 μm。图 7(c) 为倾斜氦离子显微镜（HIM）拍摄的横截面图像。通过镓基聚焦离子束（FIB）铣削释放膜层并露出背面刻蚀腔，测得腔体直径为 996.388 μm。图 7(d) 和 (e) 中 PMUT 膜横截面结构的放大图清晰显示了实验测得的各层厚度。

5. 结果与讨论

A. 实验装置

PMUT液体密度传感器的表征装置如图8(a)所示。装有压电微机械超声换能器的印刷电路板粘接在培养皿底部，发射压电微机械超声换能器和接收端压电微机械超声换能器的电极通过导线与印刷电路板相连。印刷电路板通过

同轴电缆连接至测量装置。向培养皿中加入适量甘油溶液作为介质。

我们使用锁相放大器（MFLI 500，Zurich Instrument，瑞士）测量液体介质中的器件。如图8(a)所示，该锁相放大器的信号输出端口连接到发射压电微机械超声换能器的两个电极，并输出交变激励信号。该锁相放大器的信号输入端口连接到SR560信号放大器的输出端，而SR560信号放大器的输入端连接到接收端压电微机械超声换能器的两个电极。这样，接收端压电微机械超声换能器产生的交变电信号经过SR560滤波和放大（20倍）后，输入锁相放大器，从而测得该交变信号的电压幅值。

理论上，只需一个频率就足以区分不同密度下传感器的输出电压

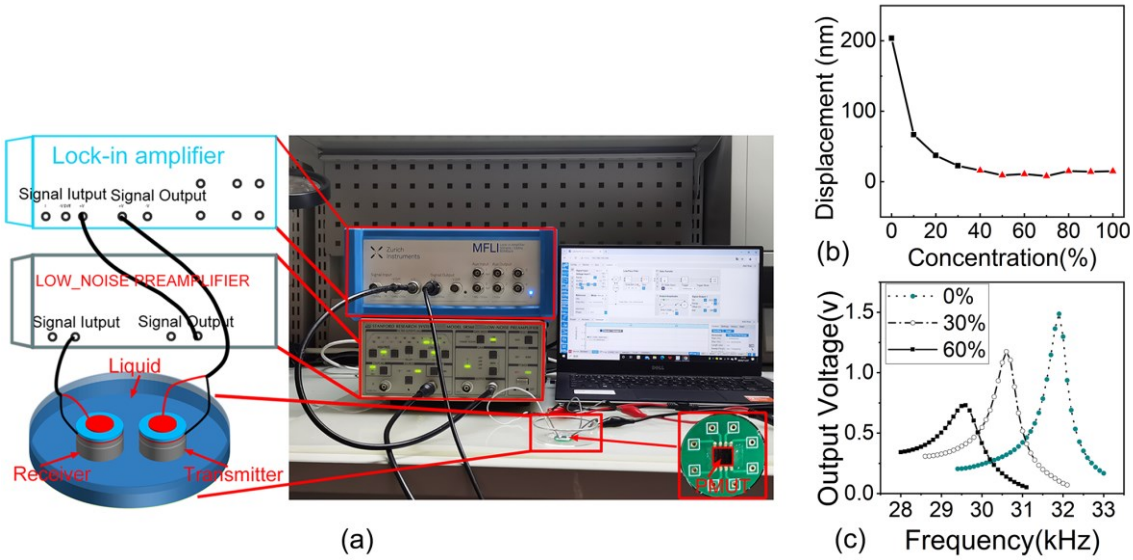

图8. (a) 压电微机械超声换能器液体密度传感器的实验装置。 (b)使用DHM镜头测得的激励信号频率为0%浓度下谐振频率时，液体中浓度范围为0%至100%的压电微机械超声换能器输出端振动位移值。 (c) 三种浓度分别为0、30%和60%的流体中接收器接收到的信号（峰峰值幅度）。

。因此，如图8(b)所示，当输入信号为单一频率时，我们使用数字全息显微镜（DHM-R2100，Lyncée Tec SA，瑞士）测量液体浓度范围为0–100%的甘油溶液中接收端压电微机械超声换能器的振动位移值。

然而，实验结果表明，当 PMUT 发射器的激励信号设为对应于 0% 甘油溶液的谐振频率时，随着液体浓度从 0% 变化到 30%，PMUT 接收器的输出电压值会逐渐降低。当甘油溶液的浓度从 30% 升高到 100% 时，输出电压值过小，容易受到噪声影响，因此无法准确测量输出电压。因此，如果激励信号设为单一频率，那么 DHM 作为一种高分辨率器件，只能检测

浓度范围为 0%–30% 的甘油溶液。这证明，单频测量液体浓度的实际实验范围比理论值更窄。为了扩大测量范围，我们采用三频测量法测量液体密度。

B. 0–100%浓度甘油溶液实验

根据工作原理，固定测量频率必须高于所有待测液体的谐振频率。例如，当甘油溶液的浓度范围为0–30%时，压电微机械超声换能器在该浓度范围内的液体中振动时，其谐振频率会随浓度增加而降低。因此，我们选择的激励频率应大于或等于压电微机械超声换能器在浓度为0%的甘油溶液中的谐振频率。首先，我们将浓度为0%至100%的测试液体——甘油溶液（对应的密度范围为1–1.261 g/cm3）划分为三个浓度区间：0–30%、30–60%和60–100%，并为每个区间确定一个固定测量频率。为此，我们对压电微机械超声换能器进行了频率扫描，以确定其在三种参考溶液（甘油浓度分别为0%、30%和60%）中的谐振频率。接收器接收到的信号峰峰值幅度如图8(c)所示。根据这些结果，我们选定31.9 kHz、30.6 kHz和29.6 kHz这三个频率，分别作为对应浓度区间的指定测量频率；它们分别是压电微机械超声换能器在纯水、30%甘油溶液和60%甘油溶液中的谐振频率。

对于浓度范围为 0% 至 30%（对应密度范围为 1–1.0783 g/cm3）的甘油溶液，选用压电微机械超声换能器在纯水中的谐振频率（31.9 kHz）作为测量频率，以确定甘油溶液的密度。这样可以确保固定测量频率高于所有待测液体的谐振频率。配制了 16 个液体样品，浓度在 0% 至 30% 之间均匀分布，密度分别为 1（0%）、1.0052（2%）、1.0104（4%）、1.0157（6%）、1.0209（8%）、1.0261（10%）、1.0313（12%）、1.0365（14%）、1.0418（16%）、1.047（18%）、1.0522（20%）、1.0574（22%）、1.0626（24%）、1.0679（26%）、1.0731（28%）和 1.0783 g/cm^3（30%）。在 31.9 kHz 的频率下测量器件在每种液体中的输出电压，并绘制液体密度与输出电压之间的关系。由于输出电压幅值随液体密度增大而呈指数衰减，因此采用指数衰减函数对数据进行拟合，如图 9(a) 所示。用于计算该密度范围内甘油溶液密度的拟合方程如下：

$$\rho = 0.95107 + 0.08847 \times e^{-\frac{x}{0.19579}} + 0.07362 \times e^{-\frac{x}{3.62561}} \quad \left(1\frac{g}{cm^3} \le \rho < 1.0783\frac{g}{cm^3}\right) \tag{15}$$

其中x为测得的输出电压值，单位为伏特。

对于浓度范围为 30% 至 60%（对应密度范围为 1.0783–1.1566 g/cm3）的甘油溶液，选取压电微机械超声换能器在 30% 甘油溶液中的谐振频率（30.6 kHz）作为测量频率，以测定该范围内的密度。这确保固定测量频率高于所有受测液体的谐振频率。同样，制备了十六种液体

样品，其密度分别为 1.0783（30%）、1.0835（32%）、1.0887（34%）、1.0940（36%）、1.0992（38%）、1.1044（40%）、1.1096（42%）、1.1148（44%）、1.1201（46%）、1.1253（48%）、1.1305（50%）、1.1357（52%）、1.1409（54%）、1.1462（56%）、1.1514（58%）和 1.1566（60%）g/cm^3, , 其浓度在 30% 至 60% 之间均匀分布。在每种液体中，以 30.6 kHz 的频率测量器件的输出电压，并绘制液体密度与输出电压之间的关系。由于输出电压幅值随液体密度增加呈指数衰减，因此使用指数衰减函数对数据进行拟合，如图 9(b) 所示。用于计算该范围内甘油溶液密度的拟合方程如下：

$$\rho = 4614.059 \times e^{-\frac{x}{113355.113}} + 0.08397 \times e^{-\frac{x}{0.15987}} - 4612.9818$$

$$\left(1.0783\frac{g}{cm^3} \le \rho < 1.1566\frac{g}{cm^3}\right) \tag{16}$$

对于浓度范围为 60% 至 100%（对应密度范围为 1.1566–1.261 g/cm3）的甘油溶液，选取 60% 甘油溶液中的压电微机械超声换能器谐振频率（29.6 kHz）作为测量频率。按照上述相同步骤，配制了 21 个液体样品，其密度分别为 1.1566（60%）、1.1618（62%）、1.167（64%）、1.1723（66%）、1.1775（68%）、1.1827（70%）、1.1879（72%）、1.1931（74%）、1.1984（76%）、1.2036（78%）、1.2088（80%）、1.214（82%）、1.2192（84%）、1.2245（86%）、1.2297（88%）、1.2349（90%）、1.2401（92%）、1.2453（94%）、1.2506（96%）、1.2558（98%）和 1.261 g/cm^3（100%）；这些样品的浓度在 60% 至 100% 之间均匀分布。测量了

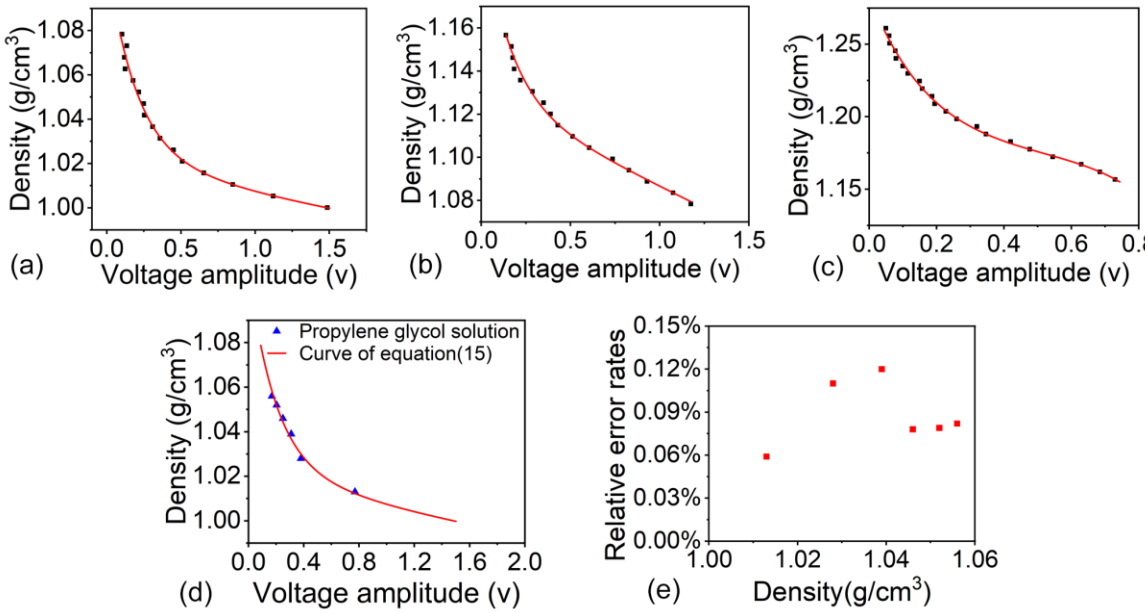

图 9. (a) 对浓度范围为 0–30% 的输出电压值采用指数衰减函数进行拟合。(b) 对浓度范围为 30%–60% 的输出电压值采用指数衰减函数进行拟合。(c) 对浓度范围为 60%–100% 的输出电压值采用指数衰减函数进行拟合。(d) 六种丙二醇溶液的输出电压与第 5B 节中使用甘油溶液建立的传感器校准曲线高度吻合。(e) 丙二醇溶液的测量密度误差率。

器件在每种液体中的输出电压，测量频率为 29.6 kHz，并绘制了液体密度与输出电压之间的关系图。由于输出电压幅值随液体密度增加而呈指数衰减，因此采用指数衰减函数对数据进行拟合，如图 9(c) 所示。用于计算该范围内甘油溶液密度的拟合方程如下：

$$\rho = 1.17245 + 0.11159 \times e^{-\frac{x}{0.18459}} - 0.0001616 \times e^{-\frac{x}{0.15525}}$$
$$\left(1.1566\frac{g}{cm^3} \le \rho \le 1.261\frac{g}{cm^3}\right) \quad (17)$$

至此，液体密度传感器的校准完成。

完成密度传感器的校准后，可以使用三段曲线测量密度未知的甘油溶液。具体策略如下：首先，使用31.9 kHz的测量频率测量浓度未知的甘油溶液。如果根据（15）计算出的密度满足1 g/cm^3≤ρ<1.0783 g/cm^3（对应的甘油溶液浓度为0%–30%），则表明已获得测量结果，测量结束。否则，继续使用30.6 kHz的测量频率，并根据（16）计算液体密度。如果结果满足1.0783 g/cm^3≤ρ<1.1566 g/cm^3（对应的甘油溶液浓度为30%–60%），则表明已获得测量结果，测量结束。否则，继续使用29.6 kHz的测量频率，并根据（17）计算液体密度；此时即可获得测量结果。完成上述过程后，测量结束。

C. 对液体黏度变化不敏感性的验证

为验证本文提出的方法在液体密度测量中受黏度影响极小，使用经甘油溶液校准的液体密度传感器测量丙二醇水溶液的密度。配制了六种丙二醇溶液，其密度范围为 1.013 g/cm^3 至 1.056 g/cm^3。如表VII所示，与甘油溶液相比，密度相同的丙二醇溶液具有显著不同的黏度。例如，在密度同为 1.056 g/cm^3, 时，丙二醇溶液的黏度为 21.04 cP，是甘油溶液的

T表 VII

COMP相同密度下丙二醇溶液与甘油溶液的黏度比较 Y

密度(g/cm^3)	黏度(cp)	
	丙二醇溶液	甘油溶液
1.013	1.83	1.08
1.028	3.06	1.31
1.039	5.25	1.56
1.046	10.04	1.68
1.052	14.15	1.76
1.056	21.04	1.88

11.19 倍。按照测量程序，将激励频率固定为 31.9 kHz，测量 PMUT接收器在丙二醇溶液中的输出电压。为尽可能减小实验误差，重复进行三次电压测量并取平均值。如图 9(d)所示，红线为使用浓度为 0–30% 的甘油溶液建立的传感器校准曲线，六个三角形数据点为 PMUT接收器在六种丙二醇溶液中输出电压的平均值。可以看出，这六个数据点与校准曲线基本重合。将输出电压值代入式 (15)，计算密度与真实密度之间的误差率如图 9(e)所示。结果表明，对于不同类型的液体，只要其密度处于传感器的可测量范围内，即使黏度存在差异，仍可实现准确测量。这验证了在固定激励频率下工作的液体密度传感器，其密度测量受黏度变化的影响可以忽略。因此，式 (15) 的校准曲线不仅适用于甘油，也适用于液体密度范围内的其他类型液体。

D. 测量未知液体的密度

按照以下步骤测量密度未知的液体的密度，如图 10 所示:

1) 将激励频率设为 31.9 kHz（该测量频率对应的密度范围为 1–1.0783 g/cm3），并测量未知液体中接收端压电微机械超声换能器的输出电压。

2) 将测量电压代入对应密度范围 1–1.0783 g/cm3 的公式 (15)。如第 V(B) 节所示，公式 (15) 不仅适用于甘油，也适用于液体密度范围内的其他类型液体。如果计算密度落在 1–1.0783 g/cm3 范围内，则该值即为未知液体的密度。否则，继续下一步。

3) 将激励频率设为 30.6 kHz（该测量频率对应的密度范围为 1.0783–1.1566 g/cm3），并测量未知液体中接收端压电微机械超声换能器的输出电压。

4) 将测量电压代入式（16），对应的密度范围为 1.0783–1.1566 g/cm3。如果计算密度落在 1.0783–1.1566 g/cm3 的范围内，则该值就是未知液体的密度。否则，继续下一步。

5) 将激励频率设为 29.6 kHz（该测量频率对应的密度范围为 1.1566–1.261 g/cm3），并测量未知液体中接收PMUT的输出电压。

将测量电压代入式（17），对应的密度范围为 1.1566–1.261 g/cm3。如果计算密度落在 1.1566–1.261 g/cm3 的范围内，则该值就是未知液体的密度。否则，未知液体的密度超出了可测量范围（1–1.261 g/cm3）。

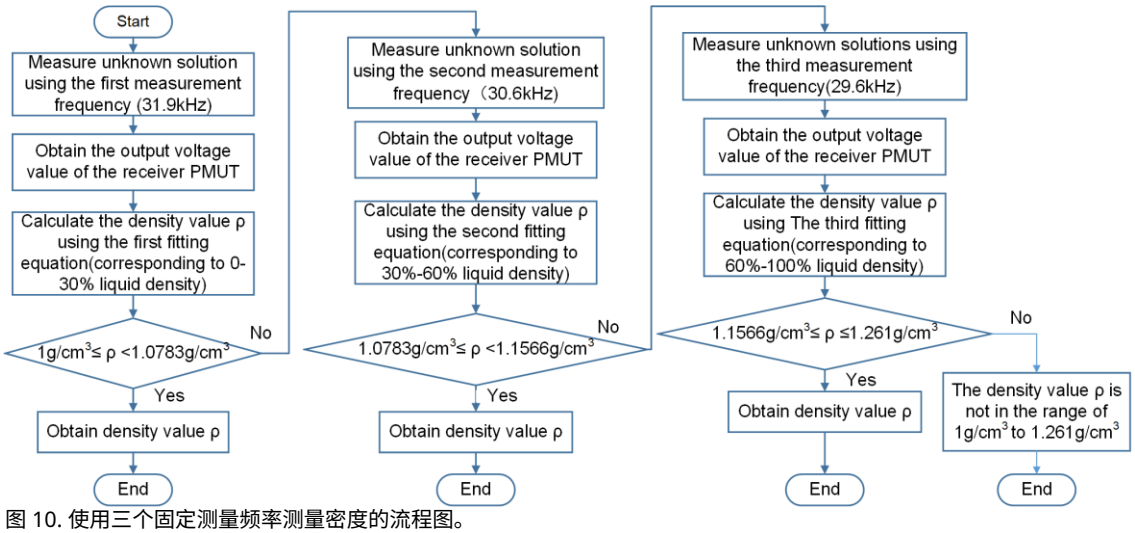

图 10. 使用三个固定测量频率测量密度的流程图。

E。 器件制造误差对密度测量的影响 y

测量

由于器件制造过程中 PMUT 发射器与 PMUT接收器之间不可避免地存在误差，这些误差可能会影响密度测量。我们使用这 5 个器件测量其在纯水中的输出电压幅值和品质因数。测量结果如图 11 所示。测量结果表明，制造过程对器件一致性的影响在 5% 以内。

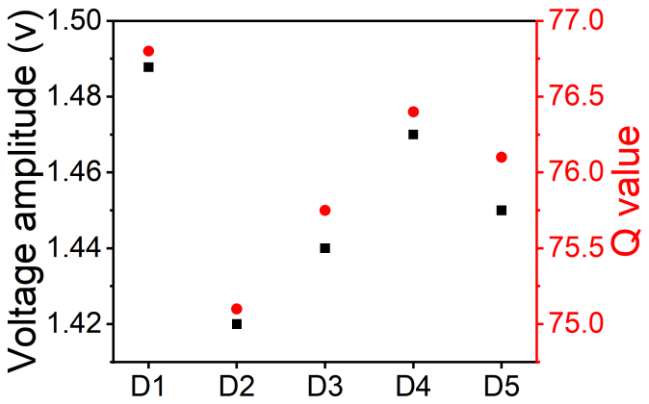

图 11. 5 个相同规格的器件在纯水中的输出电压幅值和品质因数。

F. 与频率扫描模式的比较

为考察本文方法的测量极限，进一步稀释甘油溶液，以测试在较小浓度差下，该方法所用压电微机械超声换能器测得的液体密度变化。为此，选取了六种浓度：0%、0.1%、0.25%、0.5%、1%和2%进行测试。每种浓度均连续测量五次。

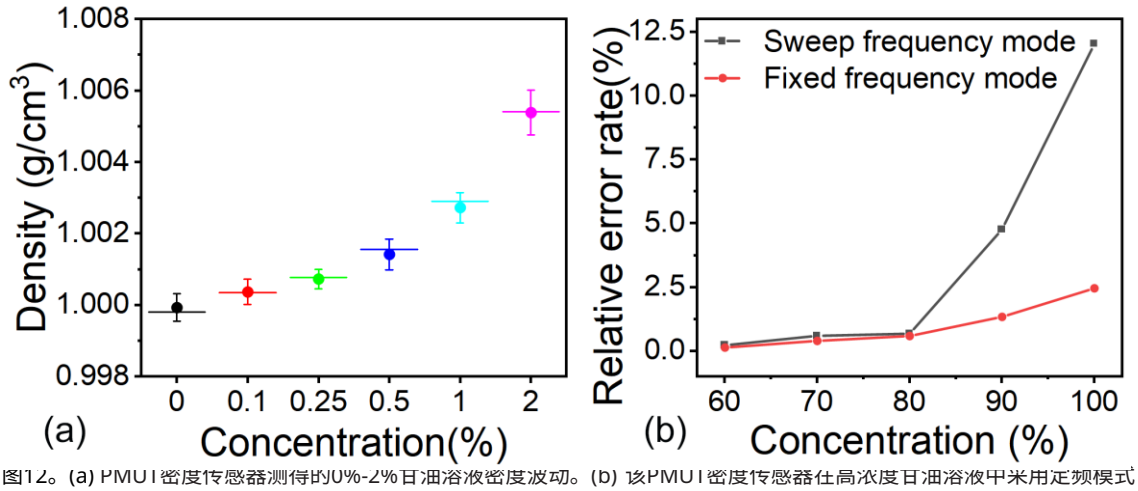

图12。(a) PMUT密度传感器测得的0%-2%甘油溶液密度波动。(b) 该PMUT密度传感器在高浓度甘油溶液中采用定频模式和扫频模式进行密度测量时的误差率对比。

图12(a)显示了本文方法测得的甘油水溶液密度随浓度（0至2%）的变化。对多次测量结果取平均后，平均密度呈现出差异，因此可以区分浓度变化。在最低浓度变化范围内，纯水与0.1%甘油溶液的平均密度值从1升至1.00026 g/cm^3。可以认为，该方法测量甘油浓度的分辨率为0.1%，据此可计算密度检测限为

$$\text{Resolution} = \rho_{0.1\%glycerol} - \rho_{purewater} = 2.6 \times 10^{-4}\,\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \tag{18}$$

其中，$\rho_{0.1\%glycerol}$ 是0.1%甘油的密度，$\rho_{purewater}$ 是纯水的密度。测量结果表明，该方法能够以较高的分辨率测量液体密度，最小可测至2.6×10^{-4} g/cm^3。

频率扫描模式首先找出各个密度对应的谐振频率，然后根据谐振频率与密度之间的线性关系计算密度。然而，在高黏度液体中，由于黏度的影响，这种线性关系并不存在，因此该方法无法测量高黏度液体的密度。我们分别采用该方法和定频测量法测量高黏度甘油溶液，结果如图12(b)所示；两种方法在高浓度下的误差率存在显著差异。

G. PMUT密度传感器的滞后

为测试基于PMUT的液体密度传感器的滞后特性，首先将纯水注入PMUT储液槽中。随后，逐渐向储液槽中加入纯甘油溶液，以提高甘油浓度，直至储液槽中装满甘油。之后，逐渐向储液槽中加入纯水，以降低甘油浓度，直至储液槽中装满纯水。测量不同甘油浓度下的接收信号，并将其转换为密度值，如图13(a)所示。实验结果表明，在此过程中，测得的密度值基本保持不变

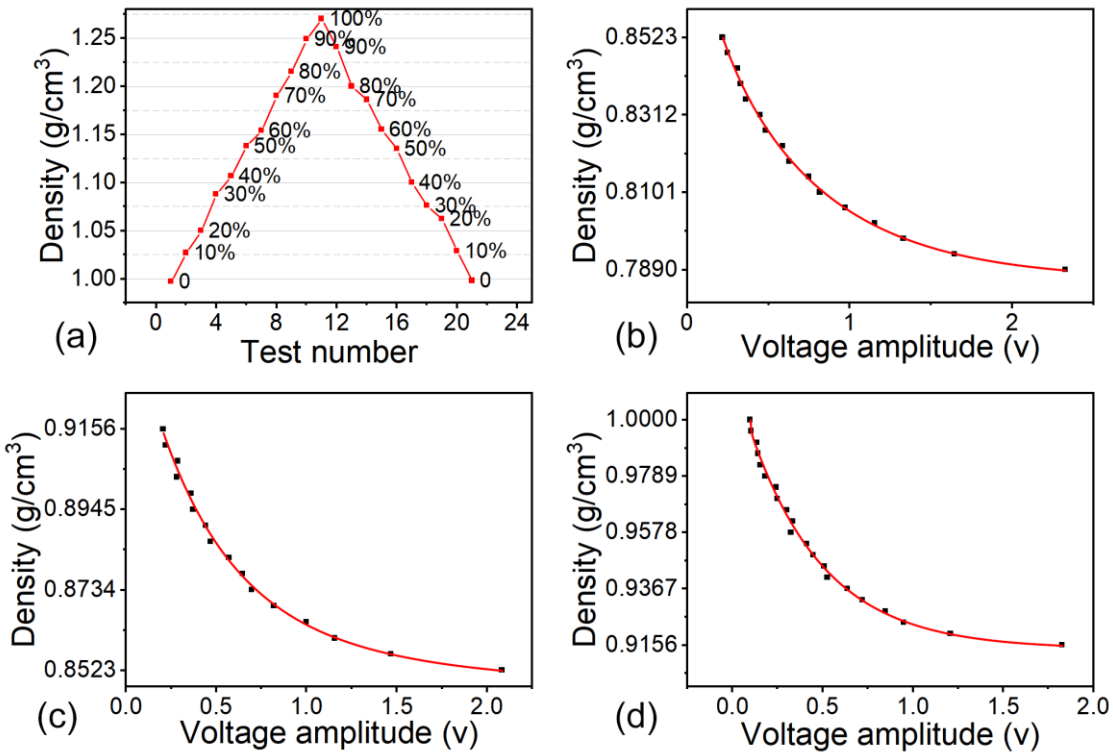

图13. (a) PMUT密度传感器的滞后测试结果。(b) 使用指数衰减函数拟合浓度范围为100%-70%的酒精溶液的输出电压值。(c) 使用指数衰减函数拟合浓度范围为70%-40%的酒精溶液的输出电压值。(d) 使用指数衰减函数拟合浓度范围为40%-0的酒精溶液的输出电压值。

通过增加和降低液体浓度的过程，证明该器件没有明显的滞后效应。

H. 测量酒精溶液的密度

为了说明除甘油溶液和丙二醇溶液外，我们的测量方法也能测量液体密度，我们采用上述三频测量法测量酒精溶液的密度。三个测量频率分别为35.4 kHz、34.35 kHz和33.3 kHz，分别对应酒精溶液浓度为100%、70%和40%时的谐振频率。测量策略仍从较高的测量频率开始：第一个频率用于测量0.789–0.8523 g/cm^3, 的密度范围，第二个频率用于测量0.8523–0.9156 g/cm^3, 的密度范围，第三个频率用于测量0.9156–1 g/cm^{3}的密度范围。拟合曲线如图13(b)(c)(d)所示。利用这些拟合曲线得到的三个拟合方程，可按照图10所示的流程计算酒精溶液的密度。

7. 结论

在本研究中，我们提出了一种仅对液体密度敏感、而不受液体黏度变化影响的基于 AlN 的 PMUT 液体密度传感器。将两个并排放置于液体中的相同 PMUT 分别作为液体密度传感器的发射器和接收器。施加单频激励电压驱动发射 PMUT 产生超声波，超声波经液体表面反射后，由接收 PMUT 接收并产生电信号。理论计算表明，当激励频率保持不变时，接收电信号的振幅与液体密度呈特定关系，而由黏度引起的信号振幅变化可以忽略不计。因此，在通过拟合 0-100% 甘油溶液中接收信号振幅与密度之间的关系，对 PMUT液体密度传感器进行校准后，该器件无论液体种类和黏度如何，均可测量此范围内的密度。在 1.013 g/cm^3 至 1.056 g/cm^3，的液体密度范围内，六种不同密度的丙二醇溶液的输出电压与由该密度范围内甘油溶液建立的校准曲线高度一致；将输出电压值代入拟合方程计算密度时，计算密度与实际密度之间的误差率小于 0.125%。所提出的方法在高黏度环境（80%-100% 甘油溶液）中的最大误差率低于 2.5%，仅为其他基于谐振频率的密度测量方法的 20%。该 PMUT流体密度传感器在纯水中的品质因数为 76.8，输出信号的信噪比最高可达 126 dB。检测分辨率为 2.6×10^{-4}g/cm^3。所提出的 PMUT 流体密度传感器在成本、可测密度范围和可靠性方面具有优势，有望应用于生理指标检测、化学工业中的浓度或均匀性测量以及自动控制领域。

作者贡献

H.R. 构思并设计了该研究。X.F. 完成了实验并分析了数据。H.R.、X.F. 和 L.L. 参与了实验结果的讨论。论文由 X.F. 和 H.R. 撰写，L.L. 提供了意见并作出贡献。H.R. 和 L.L. 对论文进行了审阅和编辑。该项目由 H.R. 负责监督。

参考资料

[1] K. Roy、H. Gupta、V. Shastri、A. Dangi、A. Jeyaseelan、S. Dutta 和 R. Pratap，“使用压电微机械超声换能器进行流体密度传感”，*IEEE* 传感器期刊，第20卷第13期，第6802–6809页，2020年7月1日，doi：10.1109/JSEN.2019.2936469。[2] J. Toledo、V. Ruiz-Díez、J. Velasco、J. Hernando-García 和 J. L. Sánchez-Rojas，“采用压电驱动、用于在线密度—黏度测量的3D打印液体池谐振器”，*Sensors*，第21卷第22期，第7654页，2021年11月，doi：10.3390/s21227654。[3] P. Hauptmann、R. Lucklum、A. Páttmer 和 B. Henning，“用于过程监测和化学分析的超声传感器：现状与趋势”，*Sens. Actuators A, Phys.*，第67卷第1–3期，第32–48页，1998年10月。[4] K. Honick，“液体密度或比重的电磁测量方法”，科学仪器杂志，第31卷第1期，1954年1月。

[5] D. R. Jayakantha、K. A. Gamage、N. Bandara、M. Karunarathne、M. Seneviratne、E. Comini、D. Zappa 和 N. Gunawardhana，“采用经校准的压力传感器制造自动液压式压力密度计”，Sci.，第6卷第3期，2024年7月，doi：10.3390/sci6030041。[6] A. Rechberger、S. Rossegger、R. Breidler 和 G. Steiner，“基于脉冲激励测量的高精度振动式密度计”，Sensors，第19卷第7期，第1627页，2019年4月，doi：10.3390/s19071627。[7] C. Riesch、E. K. Reichel、F. Keplinger、B. Jakoby，“用于液体黏度和密度传感的振动悬臂梁表征”，J. Sens，第2008卷第1期，第697062页，2008年10月，doi：10.1155/2008/697062[8] M. Thranhardt、P. C. Eccardt、H. Mooshofer 和 P. Hauptmann，“基于谐振CMUT的流体传感器：建模与仿真”，Sens. Actuators A Phys.，第156卷第1期，第191–195页，2009年4月，doi：10.1016/j.sna.2009.04.007。[9] F. Auberach，“不可压缩流体中音叉的音高”，London. Edinburgh Dublin Phil. Mag. J. Sci，第5卷第32期，第395–397页，1878年，doi：10.1080/14786447808639445。[10] I. Puchades 和 L. F. Fuller，“一种用于测量黏度的热驱动微机电系统（MEMS）器件”，J. Micro Syst.，第20卷第3期，2011年6月，第601–608页，doi：10.1109/JMEMS.2011.2127447。[11] M. K. Ghatkesar、T. Braun、V. Barwich、J. P. Ramseyer、C. Gerber、M. Hegner 和 H. P. Lang，“液体中振动微悬臂梁的谐振模态”，Appl. Phys. Lett.，第92卷第4期，2008年1月。[12] H. Yang、Y. Rao、L. Li、H. Liang、T. Luo 和 G. Xin，“基于黏度补偿的音叉密度传感器尺寸优化与密度计算模型研究”，Math. Probl. Eng.，2020年，2020年7月。[13] M. Zhang、D. Chen、X. He、X. Wang，“使用石英音叉测量流体密度和黏度的流体动力学模型”，Sensors，第20卷，第198号。[14] F. Herrmann、D. Hahn、S. Büttgenbach，“利用矢状波纹Love模传感器分别测定液体密度和黏度”，Sens. Actuators A, Phys.，第78卷第2–3期，第99–107页，1999年。[15] M. Youssry、N. Belmiloud、B. Caillard、C. Ayela、C. Pellet 和 I. Dufour，“使用微悬臂梁直接测定流体黏度和密度：从实验数据到解析表达式”，Sens. Actuators A, Phys.，第172卷第1期，第40–46页，2011年。[16] S. Boskovic、J. W. M. Chon、P. Mulvaney 和 J. E. Sader，“使用微悬臂梁进行流变学测量”，J. Rheol.，第46卷第4期，第891页，2002年7月。[17] P. Muralt、J. Baborowski，“基于压电薄膜的微机械超声换能器和声学传感器”，J. ELECTROCERAM.，第12卷，第101–108页，2004年1月。[18] G. Perçin、B. T. Khuri-Yakub，“压电驱动柔性伸展式微机械超声换能器”，IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control，第49卷第5期，第585–595页，2002年5月。[19] B. E. Eovino、S. Akhbari 和 L. Lin，“基于声致谐振的宽带环形压电微机械超声换能器”，2017年IEEE第30届微机电系统国际会议（MEMS），美国内华达州拉斯维加斯，2017年，第1184–1187页。[20] S. J. Martin、G. C. Frye 和 K. O. Wessendorf，“使用厚度剪切模谐振器传感液体性质”，Sens. Actuators A, Phys.，第44卷第3期，第209–218页，1994年。[21] F. Josse、Z. A. Shana、D. E. Radtke 和 D. T. Haworth，“压电体声波谐振器作为黏性导电液体中检测器的分析”，IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Freq. Control，第37卷第5期，第359–368页，1990年9月。[22] F. Herrmann、D. Hahn 和 S. Büttgenbach，“利用矢状波纹Love模传感器分别测定液体密度和黏度”，Sens. Actuators A, Phys.，第78卷第2–3期，第99–107页，1999年12月。[23] A. C. Turton、D. Bhattacharyya 和 D. Wood，“高灵敏度Love模液体密度传感器”，Sens. Actuators A, Phys.，第123–124卷，第267–273页，2005年9月。[24] L. Matsiev、J. Bennett 和 O. Kolosov，“用于液体性质测量的高精度音叉传感器”，载于Proc. IEEE Ultrason. Symp.，第1492–1495页，2005年9月。[25] J. Zhang、C. Dai、X. Su 和 S. J. O’Shea，“基于石英音叉的低频机械传感器测定液体密度”，Sens. Actuators B, Chem.，第84卷第2–3期，第123–128页，2002年5月。[26] J. Toledo、T. Manzaneque、J. Hernando-García、J. Vázquez、A. Ababneh、H. Seidel、M. Lapuerta 和 J. L. Sánchez-Rojas，“石英音叉和伸展式微谐振器在黏度

以及油/燃料混合物中的密度测量，” *Microsyst. Technol.*，第 20 卷，第 4–5 期，第 945–953 页，2014 年 4 月。[27] D. Zheng、J. Shi 和 S. Fan，“用于液体密度测量的谐振传感器设计与理论分析”，*Sensors 2012*，第 12 卷，第 7905-7916 页。[28] T. Manzaneque、V. Ruiz-Díez、J. Hernando-García、E. Wistrela、M. Kucera、U. Schmid 和 J. L. Sánchez-Rojas，“用于密度和黏度传感的压电MEMS谐振器式振荡器”，*Sens. Actuators A, Phys.*，第 220 卷，第 305–315 页，2014 年。[29] S. Cerimovic、R. Beigelbeck、H. Antlinger、J. Schalko、B. Jakoby 和 F. Keplinger，“利用悬浮板式MEMS谐振器传感甘油–水混合物的黏度和密度”，*Microsyst. Technol.*，第 18 卷，第 7–8 期，第 1045–1056 页，2012 年 8 月。[30] T. Manzaneque、V. Ruiz、J. Hernando-García、A. Ababneh、H. Seidel 和 J. L. Sánchez-Rojas，“液体介质中矩形微板第一阶伸展模态的表征与仿真”，*Appl. Phys. Lett.*，第 101 卷，第 15 期，2012 年 10 月。[31] E. Ledesma、I. Zamora、J. Yanez、A. Uranga 和 N. Barniol，“采用单片集成CMOS上的PMUT监测流体水动力学特性的单细胞系统”，*MINE.*，第

8， 1， 76, 2022 卷，第 期，

[32]

第 页。K. Roy、K. Kalyan、A. Ashok、V. Shastri、A. A. Jeyaseelan、A. Mandal 和 R.Pratap，“用于流体密度传感的PMUT集成微流控系统”，微机电系统期刊，第 30 卷，第 4 期，第 642-649 页，2021 年 8 月，doi：10.1109/JMEMS.2021.3091651。[33] A. Fischer 等，“集成MEMS与集成电路”，*Microsyst. Nanoengineering*，第 1 卷，文章编号 15005，2015 年 1 月。[34] P. Tsao 等，“机器学习辅助的PMUT流体黏度和密度同步检测”，*2024*年希尔顿黑德研讨会论文集：固态传感器、执行器与微系统研讨会，2024 年 6 月，doi：10.31438/TRF.HH2024.105。[35] M. Passoni、F. Carminati、B. Rossi、D. Carrera 和 P. Fragneto，“非线性状态下空气耦合PMUT的建模、识别与运行”，*2022 IEEE*国际超声研讨会（*IUS*），意大利威尼斯，2022 年，第 1-4 页。[36] H. Lyu、X. Xiu、S. Zhang、H. Yang 和 A. Safari，“受迫振动下的压电微机械超声换能器：扩大声学范围并缩小盲区”，*IEEE Sensors J.*，第 24 卷，第 22 期，第 36451-36458 页，2024 年 11 月。[37] M. Olfatnia、Z. Shen、J. M. Miao、L. S. Ong、T. Xu 和 M. Ebrahimi，“介质阻尼对压电圆形微隔膜传感器谐振频率和品质因数的影响”，*J. Micromech.Microeng 21*，045002，2011 年 2 月。[38] X. Liu、Y. Yu、J. Wang、S. H. Pun、M. I. Vai、P. U. Mak，“空气耦合非密封亥姆霍兹结构CMUT带宽增强的解析模型”，*J.SENSORS*，第 2019 卷，2019 年 4 月。[39] C. L. A. Berli、A. Cardona，“关于空气中微梁谐振器黏性阻尼的计算，” *JSV*，第 327 卷，第 249-253 页，2009 年 6 月。[40] J. E. Sader，“浸没于黏性流体中的悬臂梁频率响应及其在原子力显微镜中的应用”，*J. Appl. Phys.*，第 84 卷，第 1 期，第 64-76 页，1998 年 7 月。[41] Y. Li、L. Wang、Z. Shen 和 Y. Tamura，“静止空气中振动平膜的附加质量估算”，风工程与工业空气动力学期刊 *99.8*，第 815-824 页，2011 年 5 月。[42] Y. Kozlovsky，“与黏性流体接触的板的振动：Lamb模型的扩展”，*J. Sound Vib.*，第 326 卷，第 1-2 期，第 332-339 页，2009 年 4 月。[43] W. T.Thomson，“振动理论及其应用。”（1983）。[44] L. E. Kinsler、A. R. Frey、A. B. Coppens、J. V. Sanders，“声学基础。”*John wiley & sons*，2000 年，第 187-188 页。