

文章编号 1004-924X(2015)02-0444-08

MEMS 宽带电化学地震检波器

何文涛, 陈德勇*, 王军波, 张正宇

(中国科学院 电子学研究所 传感技术国家重点实验室, 北京 100190)

摘要: 针对深部油气勘探的需要, 研制了基于微机电系统(MEMS)的宽带电化学地震检波器。仿真分析了影响该检波器频带的结构参数, 并对其 MEMS 实现及封装方法进行了研究。利用有限元软件分析绝缘层厚度和阴极孔径对检波器幅频特性的影响, 得到了优化的几何参数。基于仿真结果, 利用 MENS 工艺加工硅基的 Pt 电极和 Su-8 的绝缘层, 然后用物理紧固的方法进行器件封装。最后, 分别在水平振动台和基岩上进行了检波器的性能测试和微震监测实验。实验结果表明: 无需进行频率补偿, 由 20 μm 孔径阴极和 200 μm 厚绝缘层封装的器件的频带可扩展到 3~90 Hz, 低频扩展到 60 S 的补偿额度小于 30 dB, 检波器的动态范围不小于 130 dB。实验显示: 这种改进的检波器可以作为宽带地震检波器用于深部或海底的油气勘探。

关键词: 微机电系统(MEMS); 电化学地震检波器; 宽频带; Su-8 绝缘层

中图分类号: P631.436; TP212.12 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152302.0444

MEMS based broadband electrochemical seismometer

HE Wen-tao, CHEN De-yong*, WANG Jun-bo, ZHANG Zheng-yu

(State Key Laboratory of Transducer Technology, Institute of Electronics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

* Corresponding author, E-mail: dychen@mail.ie.ac.cn

Abstract: On the basis of Micro-electro-mechanical System (MEMS), a broadband electrochemical seismometer was developed. The structure parameters related to the seismometer were analyzed and a developing scheme based on MEMS technology was presented to extend the frequency band of the seismometer to a wider range. The effects of the lengths of insulating spacers and the pore widths in cathodes on the seismometer property were discussed by numerical simulation and the optimized structure parameters were obtained. Then, according to simulation results, the Su-8 series photoresist and a silicon wafer were applied to fabrication of spacers and electrodes with optimized sizes. These devices were packaged via a physical fastening method to avoid the leakage of electrolyte. Finally, the device characteristics were measured through frequency response test on a horizontal vibration platform and a micro seismic monitoring experiment was performed on the bedrock. Test results without frequency compensation demonstrate that the frequency band of the device packaged with spacers with thickness of 200 μm and cathodes with wide pores of 20 μm has reached 3–90 Hz, the fade degree at 60 S is less than 30 dB, and the seismometer's dynamic range is no less than 130 dB. This improved

收稿日期: 2014-04-18; 修订日期: 2014-05-07.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61072022); 欧盟第七框架计划资助项目(No. 247641)

seismometer may function as a detecting device covering a wide frequency range in the marine oil exploration.

Key words: Micro-electro-mechanical System(MEMS); electrochemical seismometer; broadband; Su-8 insulating spacer

1 引 言

作为地质仪器的重要组成部分,地震检波器被广泛应用于油气勘探、地震监测以及一些自然灾害的早期预警等^[1-5]。按工作原理的不同,地震检波器可以分为压电式^[6]、压阻式^[7]、电磁式^[8-9](包括动圈和摆式地震检波器)、电容式^[10]、光纤式^[11-12]以及基于电化学原理的地震检波器^[4, 13-14]。与其他原理的检波器不同,电化学检波器以电解液作为惯性质量,无需位置和中心调整,并具有更大的工作倾角^[4, 15]。另外,使用电化学反应作为敏感机理,该检波器具有灵敏度高,动态范围大,自噪声较小等优点^[4, 13-15]。

美国和俄罗斯的一些研究团体利用传统铂网编织与陶瓷烧结工艺首先研制出基于电化学原理的地震检波器,并已应用于地质勘探和核爆监测^[4, 15-17]。但利用传统工艺制作的检波器存在一致性较低,频带窄,工艺复杂等缺点^[4, 15-17]。在文献^[18-20]中,本课题组首次提出基于微机电系统(MEMS)的电化学地震检波器制作方法,充分利用了 MEMS 工艺的优点,解决了器件的不一致问题,但是受限于原理复杂和绝缘层厚度单一等因素,频带较窄的问题依然未能解决。

随着石油勘探从地表逐渐转向地球深部,对频带为 60 S~50 Hz 的高性能宽带地震检波器的需求日益增大^[21]。为扩展电化学地震检波器的带宽,Agafolov 等人对结构参数对检波器带宽的影响进行了理论研究。认为通过减小电极间距可以加快电极间的离子传输从而改善检波器的高频性能,并将电极间距等价于阴阳极的间距即绝缘层的厚度 L_S ^[21]。在其指导下 Krishtop 和 Huang 分别利用平面电极和低压化学气相沉积法(LPCVD)沉积 Si_xN_y 作绝缘层的方案将绝缘层控制在几个微米之内,但器件的带宽仍然没有改善,而且降低了检波器的信噪比^[22, 23]。事实上 Agafolov 并没有完整地研究不同 L_S 下检波器幅频特性的变化,且忽略了阴极单元间的间距即阴

极孔径 L_{P1} 对检波器性能的影响。本文通过数值仿真详细地研究了 L_S 和 L_{P1} 对检波器带宽的影响,并给出了优化的几何参数。为了制作多种不同厚度的绝缘层,提出了基于负性光刻胶 Su-8 的绝缘层制作方法,该方法可方便的加工 10~300 μm 的绝缘层,适合全面研究 L_S 对检波器带宽的影响。最后,将改进结构参数的检波器与商业化的电化学检波器在振动台上进行了对比测试。实验数据证明通过优化 L_S 和 L_{P1} ,明显地改善了电化学地震检波器的带宽。

2 原理及仿真

检波器原理如图 1 所示,典型的电化学地震检波器以液态的电解液(通常是碘化钾和碘的水溶液)作为惯性质量,电解液被 2 片橡胶膜密封在有机玻璃管道中。由多孔电极和绝缘层叠加形成的敏感核心被固定在管道的中心位置,当电解液受外界震动,在电极附近形成对流将引起电极附近离子浓度的变化,进而形成电流输出。构成敏感核心的电极通常采用阳极-阴极-阴极-阳极的排布方式,电极之间用绝缘层隔开。电流从两片阴极差动输出,通过电路转换为电压信号。

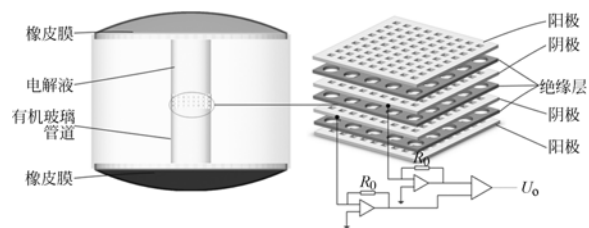


图 1 检波器的原理示意图

Fig. 1 Schematic view of electrochemical seismometer

电化学地震检波器由拾振模块和机电转换模块构成,机电转换模块也称为电化学模块。检波器的传递函数 $W(\omega)$ 可以表示为^[4, 17, 24]:

$$W(\omega) = W_1(\omega)W_2(\omega), \quad (1)$$

其中: $W_1(\omega)$ 和 $W_2(\omega)$ 分别为拾振模块和电化学模块的传递函数。电化学检波器的拾振模块可以等效为二阶弹簧阻尼系统:

$$|W_1(\omega)| = \left| \frac{v_{in}(\omega)}{v_{ex}(\omega)} \right| = \frac{\rho L_T \omega^2}{\sqrt{\rho^2 L_T^2 (\omega^2 - \omega_0^2)^2 + R_h^2 \omega^2 S_T^2}}, \quad (2)$$

其中: v_{in} 为管口出的流速, v_{ex} 为外界的激励速度, ρ 为电解液的密度, L_T 和 S_T 是管道的长度与面积。 $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ 为拾振环节的固有频率, k 为橡胶膜的弹性系数, m 为电解液的质量。 R_h 为流阻, 代表系统的阻尼, 可以表述为:

$$R_h = \frac{1}{N_C} \frac{16\mu L_C}{\pi r_C^4} + \frac{1}{N_A} \frac{16\mu L_A}{\pi r_A^4} + \frac{1}{N_S} \frac{24\mu L_S}{\pi r_S^4}, \quad (3)$$

其中: N_C , N_A 和 N_S 分别为单片阴极, 阳极和绝缘层上微孔的数目; L_C 和 L_A 为阴阳极的厚度; r_C , r_A 为电极微孔的内切圆半径, r_S 为绝缘层中微孔的半径。

利用输出电流与传递函数的关系 I_o 可以表示为:

$$I_o(\omega) = |V_{ex}(\omega)W(\omega)| = |V_{ex}(\omega)W_1(\omega)W_2(\omega)| = |V_{in}(\omega)W_2(\omega)|, \quad (4)$$

因此 $W_2(\omega)$ 也可表示为:

$$|W_2(\omega)| = |I_o(\omega)/V_{in}(\omega)|, \quad (5)$$

式中: I_o 为两阴极的差动输出电流, 联立法拉第定律, 可得:

$$I_o = nF \int_{S_1} \mathbf{J} \cdot \mathbf{n}_1 ds - nF \int_{S_2} \mathbf{J} \cdot \mathbf{n}_2 ds, \quad (6)$$

其中: $n=1$ 为阴极反应中电子交换的个数, F 为法拉第常数, \mathbf{n} 为阴极表面的单位法相向量, \mathbf{J} 是反应物 I_3^- 或 I^- 的通量, S 为阴极的表面积。

\mathbf{J} 可以通过联立 Nernst-Plank 方程, 对流扩散方程以及不可压缩流体的 Navier-Stokes equations 方程得到^[25]:

$$\mathbf{J} = -D\nabla C + C\mathbf{v}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\nabla^2 C - \mathbf{v} \cdot \nabla C, \quad (8)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0, \quad (9)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} - \frac{\nabla p}{\rho} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{g}, \quad (10)$$

其中: C 为反应物的浓度, \mathbf{v} 为流体的速度, p 为压力, \mathbf{g} 为重力加速度。

在满足物理定律的同时, 在电极表面的边界条件还应该满足电化学定律, 即 Butler-Volmer

方程^[26]:

$$2n \cdot J_{I_3^-} = -3n \cdot J_{I^-} / 2 = -2k_a C_{I_3^-} \exp[-(anF/RT)(E - E^0)] + k_c C_{I^-} \exp[(1 - anF/RT)(E - E^0)], \quad (11)$$

其中: k_a 和 k_c 为阳极、阴极反应的速率常数, α 为阴极反应的转换系数, E 为电极上所加的电势, E^0 为电极反应的标准电势。

由于式(8), (10)都为多变量的二阶偏微分方程, 式(11)的边界条件复杂且非线性, 要得到 C 或 \mathbf{J} 的解析解比较困难。这里借助有限元软件 Comsol Multiphysics 来仿真分析 L_S 和 L_{P1} 对 $W(\omega)$ 和 $W_2(\omega)$ 的影响。由于绝缘层的孔径远大于电极孔径, 可以把一个绝缘层孔沿流道所在区域看作检波器的敏感单元, 考虑到检波器的对称性, 如图 2 所示的简化 2D 结构可作为仿真模型。

仿真中其他几何参数分别为: 流道高度 $H_0 = 4.50 \times 10^{-4}$ m, 流道长度 $L_0 = 5$ cm, 阴阳的厚度 $L_C = L_A = 1 \times 10^{-4}$ m, 阳极孔径 $L_{P2} = 8 \times 10^{-5}$ m。另外在仿真中还需用到的常数: 法拉第常数 $F = 96\,500$ C/mol, 扩散系数 $D_{I_3^-} = 1.5 \times 10^{-9}$ m²/s, $D_{I^-} = 2.8 \times 10^{-9}$ m²/s, 电解液密度 $\rho = 1.47 \times 10^3$ kg/m³, 动态黏滞系数 $\mu = 1.4 \times 10^{-3}$ Pa·s, 电极反应常数 $k_a = k_c = 4 \times 10^{-9}$ mol/m³·s, 转换系数 $\alpha = 0.5$, 标准电极电势 $E^0 = 0.54$ V, 阴阳极电压分别为 0 V 和 0.3 V, 拾振环节固有频率 $\omega_0 = 3$ Hz, 初始浓度 $C_{I_3^-}^0 = 4\,000$ mol/m³, $C_{I^-}^0 = 40$ mol/m³。

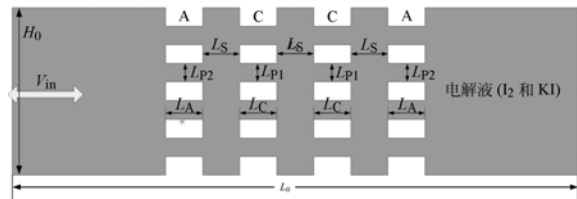
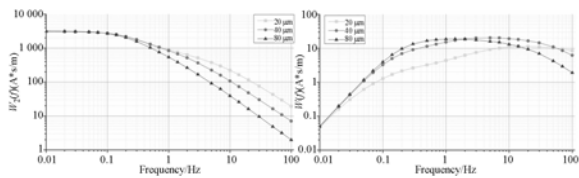


图 2 敏感单元的 2D 仿真模型

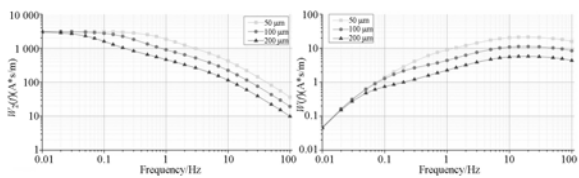
Fig. 2 2D simulation model of sensing cell

将 L_s 固定为 $100 \mu\text{m}$, L_{P1} 对 $W_2(\omega)$ 和 $W(\omega)$ 的影响如图 3(a) 和 (b) 所示。图 3(a) 中的 3 条曲线在低频重合, 且从 0.2 Hz 起以不同的速率衰减, 因此减小 L_{P1} 能减缓 $W_2(\omega)$ 的衰减速率而不影响 $W_2(\omega)$ 的低频性能或衰减的起始点。以最高点计算, 图 3(b) 中的 3 条曲线的 3 dB 带宽分别为: $3 \sim 100$ Hz ($20 \mu\text{m}$), $1 \sim 30$ Hz ($40 \mu\text{m}$), 0.3

~7(80 μm),到 60 S 的衰减分别为: -36.5 dB(20 μm), -40.5 dB(40 μm), -41 dB(80 μm)。因此,减小 L_{P1} 可以改善检波器的高频特性,检波器的带宽有所增加,并且 60 S 的衰减也随之减小。



(a) 改变 L_{P1} 对 $W_2(\omega)$ 幅频特性的影响
 (b) 改变 L_{P1} 对 $W(\omega)$ 幅频特性的影响
 (a) Impact of L_{P1} on $W_2(\omega)$'s property
 (b) Impact of L_{P1} on $W(\omega)$'s property



(c) 改变 L_S 对 $W_2(\omega)$ 幅频特性的影响
 (d) 改变 L_S 对 $W(\omega)$ 幅频特性的影响
 (c) Impact of L_S on $W_2(\omega)$'s property
 (d) Impact of L_S on $W(\omega)$'s property

图 3 仿真结果

Fig. 3 Simulation results

L_{P1} 为 20 μm 时, L_S 对 $W_2(\omega)$ 与 $W(\omega)$ 的影响如图 3(c)、(d) 所示。3(c) 中的 3 条曲线在低频处重合, 在高频段平行, 衰减的起始点随 L_S 的增大向左平移, 因此 L_S 决定了 $W_2(\omega)$ 衰减的起始点, 但不影响其衰减速度。由于绝缘层厚度对流阻的影响较小, 改变 L_S 对 $W_1(\omega)$ 的影响较小, 3(d) 中曲线的变化趋势与 3(c) 中曲线的变化趋势类似。3(d) 中的 3 条曲线在中高频段平行, 其 3 dB 带宽均为 3~100 Hz, 因此减小 L_S 只能增加检波器在中高频的灵敏度, 而对带宽的影响较小。3 条曲线在 60 S 处的衰减分别为: -42 dB(50 μm), -36.5 dB(100 μm), -29.6 dB(200 μm), 因此增加绝缘层能改善器件的低频特性。这种改善并没有增加低频的输出, 而是向低频平移 $W_2(\omega)$ 的衰减起始点后, 高频输出减小造成的。通过增加绝缘层的厚度对低频的改善有限, 继续增加 L_S 将使 $W_2(\omega)$ 的衰减起始点继续向低频移动, 使得器

件在整个 100 S~100 Hz 上的输出都减小。

通过仿真发现, 减小阴极孔径能扩展检波器的频带, 对器件高频性能改善明显, 而适当的增加绝缘层的厚度能减小低频的衰减额度。当阴极孔径减小到 20 μm, 绝缘层厚度增加到 200 μm 时, 检波器有较宽的频带, 且低频衰减较小。200 μm 优化厚度也意味着 LPCVD 工艺并不适合制作绝缘层, 需要提出一种新的, 厚度可变的绝缘层制作方法。

3 器件制作与封装

3.1 电极和绝缘层的制作

电极的制作采用与文献[18-19]中类似的多孔硅溅射铂金方案。使用硅片的厚度约为 100 μm, 加工过程中极易损坏, 为了提高电极的成品率, 采用 Su-8 2025 取代 AZ1500 光刻胶用于图形转移。曝光交联后的 Su-8 具有良好的韧性, 加之厚度较大, 对硅片起到较好的保护作用。另外, 聚合物形态的 Su-8 化学性质稳定, 可以充当深刻蚀的掩模, 无需蒸发铝作为掩模。

Su-8 系列(Su-8 3050, 2100, 2150) 被用于制作不同厚度的绝缘层。曝光后的 Su-8 与硅片的黏附力较强, 直接将 Su-8 膜从硅片上分离易造成膜的破损, 因此需在 Su-8 和硅片间引进一层 PDMS 作为中间层。Su-8 绝缘层的工艺流程如图 4 所示, 具体步骤如下:

- (1) 清洗硅片, 保证其足够干净, 防止出现 Su-8 收缩现象。
- (2) 将 PDMS 预聚物 A 和交联剂 B 两种按 8 : 1 的比例混合, 搅拌均匀后, 均匀旋涂在硅片表面, 并以 1 000 rpm 的速度旋转 30 s。然后将硅片在 100 °C 热板上烘 10 min。重复 2~3 次以保障硅片表面的 PDMS 足够厚且平整。
- (3) 在聚二甲基硅氧烷(PDMS) 表面旋涂 Su-8 并以 2 000 r/min 的速度甩胶持续 30 s, 然后在 65 °C 1 min, 95 °C 30 min 前烘。
- (4) 利用软接触光刻工艺曝光 Su-8 60 s, 95 °C 后烘, 后烘的时间约 15 min, 避免 Su-8 膜过软。
- (5) 显影约 15 min, 100 °C 硬烘 5 min 后将 Su-8 膜从 PDMS 表面揭下。

制作的 2 种不同厚度的 Su-8 绝缘层如图 5 (a)、(b) 所示。相比陶瓷烧结工艺, 这种绝缘层制作工艺不仅在绝缘层尺寸和厚度上灵活多变, 且大幅降低了工艺难度和制作成本。

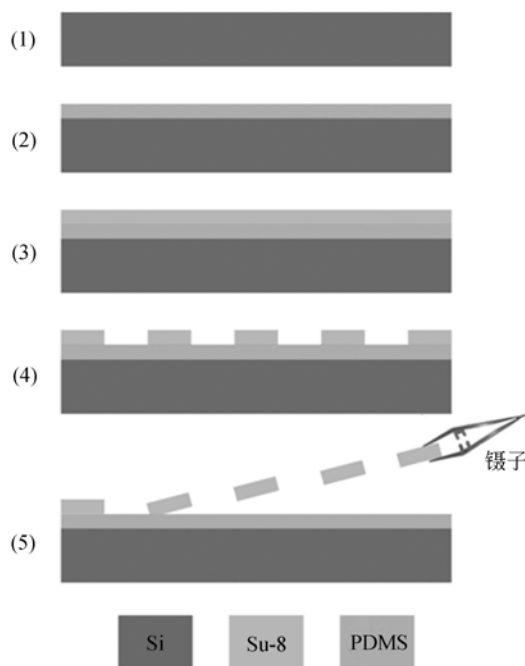


图 4 Su-8 绝缘层的制作流程

Fig. 4 Process flow chart of Su-8 insulating spacer fabrication

3.2 检波器的封装

单片电极与绝缘层制作完成后,利用 MEMS 键合工艺,将 4 片电极和 3 片绝缘层堆叠形成检波器的敏感核心,如图 5(c)所示。

由于电解液容易发生渗漏,且 I_2 具有强氧化性,敏感核心与有机玻璃外壳的密封性决定了检波器的长期稳定性。文献[17-19]中,环氧胶被用于器件密封,工艺简单,但环氧胶易与 I_2 发生反应,器件的长期稳定性较差。

提出了一种基于物理紧固的封装方法,封装流程如图 5(d)所示。该方法中敏感核心不与有机玻璃外壳直接接触,而先用螺钉、橡胶垫圈将其紧固在两片带通孔的有机玻璃小块中间。小块和敏感核心间的橡胶垫圈在压紧后,与在小块及敏感核心的表面紧密贴合,保证了密封性。然后利用同样的方法将小块固定在有机玻璃外壳中。该方法工艺简单,不使用任何封装胶,且与电解液接触的部分只有电极、绝缘层、橡胶垫圈、有机玻璃腔体等,均都不与 I_2 发生反应,保证了检波器的长期稳定性。为了进一步改善器件的低频性能,在优化几何参数的同时,将电解液的体积增大到

25 ml,橡皮膜的直径增加到 5 cm,图 5(e)为完整封装后的宽带检波器与普通检波器的对比。

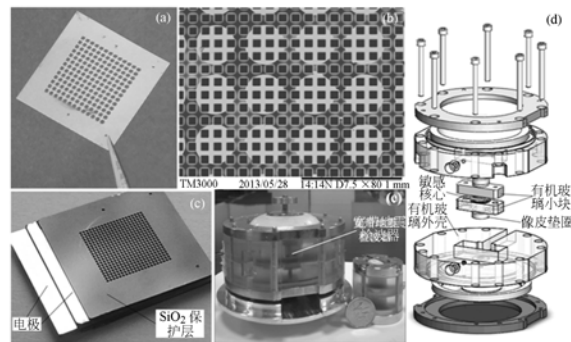


图 5 器件制作与封装:(a) 200 μm Su-8 绝缘层;(b) 10 μm 绝缘层附着在电极上;(c) 敏感核心;(d) 器件封装过程;(e) 宽带检波器与普通检波器

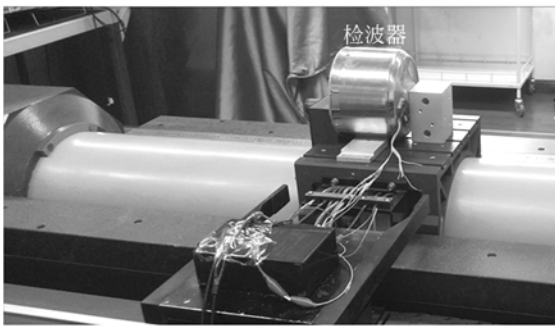
Fig. 5 Fabrication and package of devices: (a) 200 μm thick Su-8 insulating spacer; (b) SEM with 10 μm thick spacer adhering on the electrode; (c) Sensing unit covered by protective layers of SiO_2 ; (d) Process of packaging; (e) Broadband device and common device

4 测量实验与结果分析

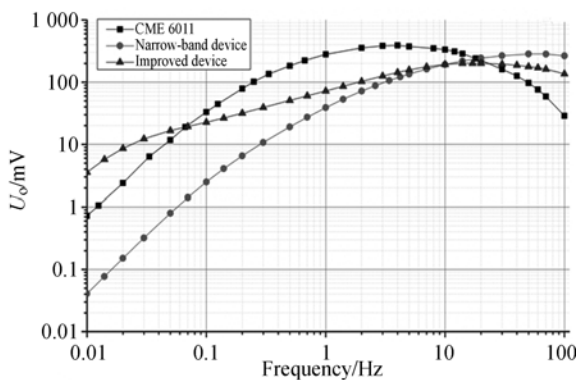
为了验证仿真可靠性及改进方案的可行性,进行了 2 个方面的性能测试,包括振动台上进行的幅频特性测试以及在低背景噪声环境下的微震测试实验。所有的器件测试都与商业化的产品, MET 公司的宽带电化学地震检波器 CME 6011OBS(带宽 60 S~50 Hz,依靠电路补偿)进行对比实验。

4.1 器件的幅频特性测试

测试平台选用中国计量科学院的超低频水平振动台(如图 6(a)所示),该振动台可提供周期低至 200 S 的速度输出。3 支检波器的输出信号只进行电流转电压处理,转换电阻为 1 k Ω 。实验测试了检波器在 100 S~100 Hz,激励速度为 $0.002\sin(2\pi f)$ m/s 下的响应输出,测试结果如图 6(b)及表 1 所示。数据分析可知,以 20 μm 孔径的阴极和 200 μm 绝缘层封装的检波器的频带较 CME 6011OBS 和短周期检波器有明显的扩展,60 S 的衰减小于 -30 dB,且高频无需补偿,与仿真结果基本一致。



(a) 器件测试平台
(a) Test platform



(b) 幅频响应曲线

(b) Amplitude-frequency response curves of two devices

图 6 幅频响应测试

Fig. 6 Frequency response tests

表 1 检波器性能的测试结果分析

Tab. 1 Result analysis of frequency response test

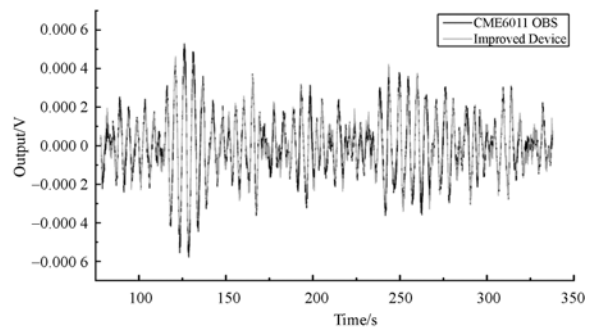
检波器类型	3 dB 带宽/Hz	60 S 衰减/dB
CME 6011OBS	1~11	-46.2
普通窄带检波器	10~100	-70.3
改进后的检波器	90~4	-28.3

4.2 微震监测实验

深部油气勘探一般利用地球微震作为震源,对微震测量的准确度也是衡量检波器性能的重要参数。天然微震实验要求环境噪声较低,实验选在中国地震局北京市白家疃观测站的基岩台上进行,数据采集使用 NI 公司的 24 位数据采集卡 PCI-4472。图 7(a)为凌晨 2:00~4:00 检波器输出的时域波形中随机选取一段;图 7(b)为检波器 2 h 输出信号的功率谱。

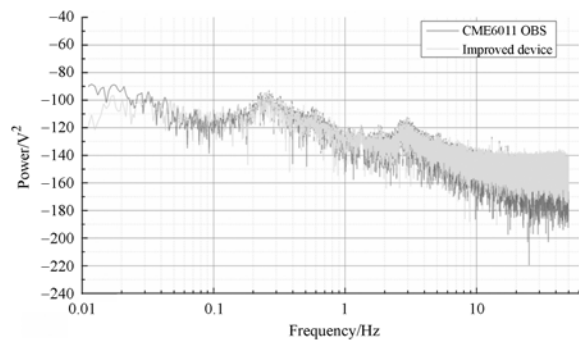
时域波形以及频域的包络线都表明 2 支检波

器有很好的 consistency,归一化后计算得出二者的相关系数达到 0.95 以上。通常,1/f 噪声是电化学地震检波器的低频段的主要噪声来源,该噪声是电化学地震检波器动态范围的主要限制因素。如图 7(b)所示,约从 0.1 Hz 开始,检波器的噪声随频率减小而增大。相对于 CME 6011,改进后的检波器在 0.01~0.04 Hz 间有更低的噪声水平,而 CME6011 的动态范围为 130 dB,因此可认为改进后的检波器其动态范围不小于 130 dB。



(a) 微震监测时域波形

(a) Seismic wave in time domain recorded by two seismometers



(b) 检波器输出信号的功率谱

(b) Power spectra of two seismometers

图 7 微震监测实验结果

Fig. 7 Microseismic monitoring test results

5 结 论

利用有限元软件建立了电化学地震检波器的数值仿真模型,研究了 2 个关键几何参数,绝缘层厚度与阴极孔径,并对电化学地震检波器幅频特性的影响进行了详细研究。仿真结果证明通过减小阴极孔径,适当地增加绝缘层的厚度可以改善

检波器的频带。依据仿真结果,提出了一种新的基于 Su-8 的绝缘层制作方法,以及物理紧固的封装方法。

幅频响应与微震监测实验的结果表明:由 20 μm 孔径阴极和 200 μm 厚绝缘层封装得到的器件,无需电路的频率补偿,检波器的频带扩展到 3~90 Hz,低频到 60 S 的补偿额度小于 30 dB,检波器的动态范围不小于 130 dB,较商业化的电化学宽带地震检波器有更宽的原始频带和更小的低

频噪声。检波器性能的改进也表明:基于 Su-8 绝缘层的制作方案以及物理紧固封装方法是有效可行的,加之工艺简单,适合批量制作,这种宽带电化学的成本将远低于现有的商业化电化学地震检波器。减小阴极孔径,增加绝缘层的厚度虽然扩展了检波器的带宽,却增加了的检波器的流阻,使得检波器的温漂略大于 CME6011,需要在电路中进行一定的温度补偿。本文方法可应用于深部或海底的油气勘探。

参考文献:

- [1] HAVSKOV J, ALGUACIL G. *Instrumentation in Earthquake Seismology* [M]. Dordrecht: Springer, 2010.
- [2] NIU F, SILVER P G, DALEY T M, *et al.*. Pre-seismic velocity changes observed from active source monitoring at the Parkfield SAFOD drill site [J]. *Nature*, 2008, 454: 204-208.
- [3] VAN HERWIJNEN A, SCHWEIZER J. Monitoring avalanche activity using a seismic sensor [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2011, 69: 165-176.
- [4] HUANG H, CARANDE B, TANG R, *et al.*. A micro seismometer based on molecular electronic transducer technology for planetary exploration [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102: 193512.
- [5] LIANG T C, LIN Y L. A fiber-optic sensor for the ground vibration detection [J]. *Optics Communications*, 2013, 306: 190-197.
- [6] LEVINZON F A. Ultra-low-noise seismic piezoelectric accelerometer with integral FET amplifier [J]. *IEEE Sensors J.*, 2012, 12: 2262-2268.
- [7] KUHNE S, KIKO T, CAVALLONI C. High-G and high bandwidth characterization of piezoresistive MEMS accelerometers for crash test applications [C]. *Proceedings of Sensors 2013, Berlin, Germany*, AMA, 2013: 41-45.
- [8] ZHANG G H, HU S Y. Dynamic characteristics of moving-coil geophone with large damping [J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2010, 33: 565-571.
- [9] BAKHOUM E G, CHENG M H. Frequency-selective seismic sensor [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2012, 61: 823-829.
- [10] HONS M, STEWART R, LAWTON D, *et al.*. Field data comparisons of MEMS accelerometers and analog geophones [J]. *The Leading Edge*, 2008, 27: 896-903.
- [11] PENG F, YANG J, LI X L, *et al.*. In-fiber integrated accelerometer [J]. *Optics Letters*, 2011, 36: 2056-2058.
- [12] 唐东林,郭峰,代志勇,等. 基于光弹效应的三分量光弹波导加速度传感器 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(5): 985-989.
- [13] TANG D L, GUO F, DAI ZH Y, *et al.*. Three-component photoelastic waveguide accelerometer based on photoelastic effect [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5): 985-989.
- [14] LEVCHENKO D G, KUZIN I P, SAFONOV M V, *et al.*. Experience in seismic signal recording using broadband electrochemical seismic sensors [J]. *Seismic Instruments*, 2010, 46: 250-264.
- [15] KOZLOV V A, AGAFONOV V M, BINDLER J. Small, low-power, low-cost sensors for personal navigation and stabilization systems [C]. *Proceeding of the 2006 National Technical Meeting of The Institute of Navigation, Monterey*, 2006: 650-655.
- [16] 王喜珍,滕云田. 地震传感器的新技术与发展 [J]. *地球物理学进展*, 2010, 25(2): 478-485.
- [17] WANG X ZH, TENG Y T. New technology of seismic sensors and development [J]. *Progress in Geophysics*, 2010, 25: 478-485.
- [18] IGOR A. ABRAMOVICH, TAO ZH. Next generation robust low noise seismometer for nuclear monitoring [C]. *Proceeding of the 30th Monitoring Research Review: Ground-Based Nuclear Explosion Monitoring Technologies, Portsmouth, USA*, 2008: 329-337.
- [19] KOZLOV V A, SAFONOV M V. Dynamic characteristic of an electrochemical cell with gauze elec-

- trodes in convective diffusion conditions [J]. *Russian Journal of Electrochemistry*, 2004, 40: 460.
- [18] HE W T, CHEN D Y, LI G B. Low frequency electrochemical accelerometer with low noise based on MEMS [J]. *Key Engineering Materials*, 2012, 503: 75-80.
- [19] CHEN D Y, LI G B, WANG J B, *et al.*. A micro electrochemical seismic sensor based on MEMS technologies [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, 202: 85-89.
- [20] DENG T, CHEN D Y, WANG J B, *et al.*. A MEMS based electrochemical vibration sensor for seismic motion monitoring [J]. *IEEE J. MEMS*, 2014, 23: 92-99.
- [21] AGAFONOV V M, KRISHTOP V G. Diffusion sensor of mechanical signals; Frequency response at high frequencies [J]. *Russian Journal of Electrochemistry*, 2004, 40: 537.
- [22] HUANG H, AGAFONOV V, YU H Y. Molecular electric transducers as motion sensors; A review [J]. *Sensors*, 2013, 13: 4581-4597.
- [23] KRISHTOP V G, AGAFONOV V M, BUGAEV A S. Technological principles of motion parameter transducers based on mass and charge transport in electrochemical microsystems [J]. *Russian Journal of Electrochemistry*, 2012, 48: 746.
- [24] KOZLOV V A, TERENT'EV D A. Frequency characteristics of a spatially-confined electrochemical cell under conditions of convective diffusion [J]. *Russian Journal of Electrochemistry*, 2002, 38: 992-999.
- [25] BARD A J, FAULKNER L R. *Electrochemical Methods Fundamentals and Applications* [M]. New York: John Wiley & Sons Inc.
- [26] SUN Z, AGAFONOV V M. Numerical modeling of a four-electrode electrochemical accelerometer based on natural convection; The boussinesq flow model vs The compressible flow model [J]. *Russian Journal of Electrochemistry*, 2012, 48: 835-842.

作者简介:



何文涛(1984—)男,湖北红安县人,博士研究生,2008年于中南大学获得学士学位,主要从事 MEMS 电化学地震传感器、微流体、肿瘤细胞分选等方面的研究。Email:xxhhzhw@163.com



陈德勇(1967—)男,研究员,四川广安人,1989年于清华大学获得学士学位,2002年于中科院电子学研究所获得博士学位,主要从事 MEMS 加工技术,基于 MEMS 技术的微结构物理量传感器的设计、制作、封装及测试和微执行器及智能微系统等方面的研究。E-mail: dychen@mail.ie.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)