

文章编号 1004-924X(2015)03-0769-07

平面电极型 MEMS 电化学地震传感器

王军波*, 龚黎明, 陈德勇, 何文涛, 王 鹏, 陈 健

(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:针对传统电化学地震传感器的加工工艺成本高、一致性差等问题,设计了一种新的平面电极型微机电系统(MEMS)电化学地震传感器结构。建立了平面电极型 MEMS 电化学地震传感器的计算模型,通过 Comsol 多场耦合数值模拟分析方法,对影响传感器的结构参数如:电极宽度、电极间距、流道高度等进行了计算和优化。采用 MEMS 表面工艺和准 LIGA 工艺,制备了平面电极型 MEMS 电化学地震传感器。最后,与采用传统方法精密加工的 MET2003 器件进行了频率响应和微震动的对比测试。实验结果表明:与 MET2003 器件相比,平面电极型 MEMS 电化学地震传感器的带宽从 1 Hz 扩展到了 30 Hz,两种器件的采集结果具有很好的相关性和一致性,相关系数为 0.887,在 1 Hz 处的噪声低于 120 dB。

关键词:微机电系统;电化学地震传感器;平面电极;低频震动检测

中图分类号:TP212.9;P315.62 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152303.0769

MEMS based electrochemical seismic sensors with planar electrodes

WANG Jun-bo*, GONG Li-ming, CHEN De-yong, HE Wen-tao, WANG Peng

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

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

Abstract: For higher fabrication costs and poor consistency of electrochemical seismic sensors, a new structure for an electrochemical seismic sensor with planar electrodes based on Micro-electric-mechanical System(MEMS) was presented. A 2D calculation model for the seismic sensor designed was built. The key structure parameters, such as the widths of electrodes, the space between electrodes and the height of the channel which might affect the performance of the seismic sensor, were calculated and optimized by the multi-field coupling numerical simulation method with Comsol software. Through the MEMS surface processes and quasi-LIGA (Lithographie Galvanoformung Abformung) process, the MEMS based electrochemical seismic sensor with planar electrodes was fabricated and packaged. Finally, the characteristic experiments of the frequency response and the tiny-vibration testing for the sensor designed and the traditional seismic sensor based on precise-machining (MET 2003) were carried out. The experiments show that the frequency bandwidth of the

收稿日期:2014-05-20;修订日期:2014-07-06.

基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项资助项目(No. 2013YQ12035703);国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2014AA091508)

sensor designed is expanded from 1 Hz to 30 Hz as compared with that of the MET 2003 and the consistency between the sensor designed and MET 2003 is achieved to 0.887. The noise level is less than 120 dB at 1 Hz.

Key words: Micro-electro-mechanical System(MEMS); electrochemical seismic sensor; planar electrode; low frequency vibration detection

1 引言

地震检波器被广泛应用于地球物理勘探、灾害预测、边防检测等领域。地震波低频信号(<1 Hz)经长距离传输后衰减较小,所以能检测低频振动的高灵敏度、宽频带的地震检波器在地球物理深层勘探、远距离震动探测等领域具有重要的意义。目前广泛应用的地震检波器为电磁式传感器,按结构分为摆式和动圈式两种。摆式传感器低频性能好,但制作成本较高,限制了其在探测中的应用;动圈式低频性能差,不能检测频率低于 2 Hz 的信号。

20 世纪 90 年代出现的基于电化学增益器的电化学地震检波器,因其低频性能好(~ 120 s)、动态范围宽(~ 120 dB)、灵敏度高($2\,000\text{ V}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$)、工作倾角大、功耗低(<50 mW)等优点,在低频地震信号检测上具有突出优势^[1-2]。现有的电化学地震检波器的核心单元电化学增益器用精密加工的铂网作电极,用高温陶瓷烧结工艺进行封装,存在工艺复杂、制作成本高、器件一致性差等问题,制约了其在低频震动探测领域的大范围应用^[3-5]。

微机电系统(MEMS)技术近年来的快速发展促进了电化学地震检波器的低成本和批量化加工工艺。2011 年,中科院电子所研制出两种 MEMS 电化学地震传感器,一种基于叠层电极结构^[6],一种基于单面平面电极结构^[1-2],并进行了基本性能测试。

与此同时,在电化学地震检波器的原理研究上一直难有突破,虽然 Kozlov 和 Agafonov 等人曾在忽略溶液中电场对离子的迁移作用并结合极限电流条件下,对电化学增益器的原理进行了推导,给出了其输出函数和频率特性,但是模型过于简单,只适于定性分析^[7-10]。直到 2010 年, Sun 等研究并建立了一种电化学增益器相关的仿真模型^[11-12],利用多场耦合数值模拟方法解释了电化

学增益器的工作机理,才推动了该领域建模和仿真技术的发展,但未能给出该结构器件的设计方案。

为进一步提高传感器性能,本文在单平面电极型 MEMS 电化学地震传感器的基础上^[1-2],提出了一种检测地表振动速度的双平面电极型 MEMS 电化学地震传感器新结构。同时结合 Sun 给出的方法,对传感器结构参数进行了仿真计算和优化设计,并与传统工艺制作而成的电化学地震传感器进行了对比测试,提升了传感器的性能。

2 电化学地震传感器基本原理

电化学地震传感器的核心单元是电化学增益器,主要由电化学微电极、电解液和微流道等组成如图 1 所示。电化学微电极采用阳极-阴极-阴极-阳极对称排列,分布在微流道的上下表面;KI 和 I_2 配比而成的电解液在微流道中自由运动。电化学增益器安装在与流道方向(图 1 中 X 方向)平行的圆柱腔体中,圆柱腔体两端由阻尼膜密封,与外接接口电路共同组成电化学地震传感器。

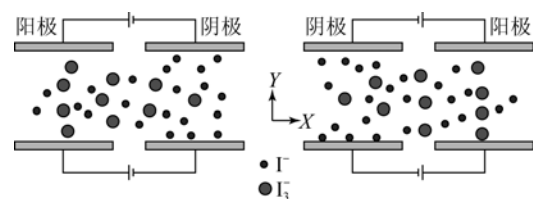
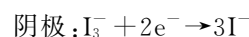
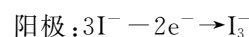


图 1 平面电极型电化学增益器结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of MEMS based electrochemical seismic sensors with planar electrodes

电解液离子在外接口电路作用下,在微电极的阳极和阴极上分别发生如下电化学反应:



根据电化学理论和流体力学理论,可以求解

由外界震动引起微电极输出电化学反应电流的变化。首先根据 Navier-Stokes 方程和边界条件求解由于外界震动造成的电解液中 I_3^- 离子的速度场分布;然后联合 Nernst-Planck 方程,求得 I_3^- 离子的浓度分布;最后联合 Butler-Volmer 条件求得电极电流,传感器的输出由两组阴极电流差分得到。将上述 3 个模型前后关联,构成如下的偏微分方程组^[6]:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (1)$$

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{g}, \quad (2)$$

$$\frac{DC_k}{Dt} + z_k m_k F \nabla \cdot (C_k \nabla \Phi) - D_k \nabla^2 C_k = 0, \quad (3)$$

$$\sum_k z_k C_k = 0, \quad (4)$$

$$2\mathbf{n} \cdot \mathbf{N}_{I_3^-} = -k_a 2C_{I_3^-} e^{(-\alpha nF/RT)(U-\Phi-E_0)} + k_c C_{I^-} e^{(1-\alpha)(nF/RT)(U-\Phi-E_0)}, \quad (5)$$

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{N}_{I_3^-} = -\frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{N}_{I^-}}{3}, \quad (6)$$

其中:式(1)和(2)是 Navier-Stokes 方程, \mathbf{u} 代表电解液的速度矢量, ρ 是电解液浓度, μ 是动态黏滞系数, P 是阻尼膜接受到代表外界震动的压强, g 代表重力加速度。

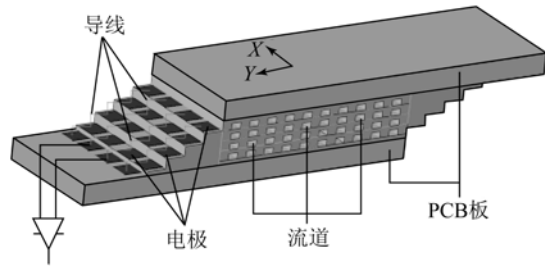
式(3)为 Nernst-Planck 方程,式(4)为电中性假设。 C 代表浓度,下标 k 用来区分 K^+ 、 I^- 和 I_3^- , z_k 为电荷数, $m_k = \frac{D_k}{RT}$, 气体常数 R 为 $8.314 \text{ J}/(\text{kg mol})$, Φ 为电极电势, D_k 为扩散系数,法拉第常数 F 为 $9.648\ 534 \times 10^4 \text{ C/mol}$ 。

式(5)和(6)为 Butler-Volmer 条件。 \mathbf{n} 为电极的外法线矢量, \mathbf{N} 为离子通量,其下标注明离子种类, k_a 和 k_c 分别表示阳极和阴极的反应速率常数, n 是反应时交换的电子数,为 1。 α 是传递系数,设置为 0.5, E_0 为标准电极电势, U 为加载在阴阳极上的电压。

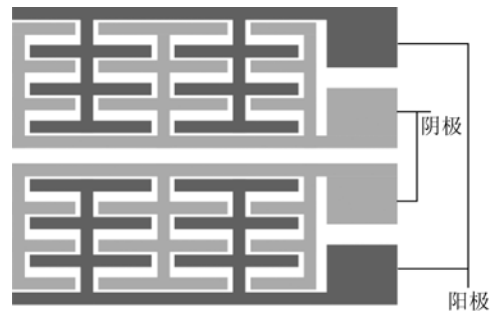
3 平面电极型 MEMS 电化学地震传感器结构设计

平面电极型 MEMS 电化学地震传感器的核心结构是平面型电极层叠芯片组,如图 2(a)所示。芯片组由多层芯片层叠而成,每层芯片正反两面制备叉指微电极结构,叉指微电极的结构如图 2(b)所示,按照阳极-阴极-阴极-阳极结构排

列。电极上制备有绝缘的微流道,呈“一”字方槽阵列结构,沿图 2(a) X 方向贯穿整个芯片。当传感器受到外界振动时,电解液离子沿 X 方向在流道中流动,并在上下表面的叉指微电极发生电化学反应,经外接口电路转化为传感器的输出。芯片组由带焊盘的 PCB 电路板上下包夹,每层芯片通过金丝将对应的电极焊接,通过 PCB 电路板与外接口电路相连。



(a) 层叠芯片组结构示意图
(a) Schematic diagram of chipset



(b) 叉指电极结构示意图
(b) Schematic diagram of interdigital electrodes

图 2 敏感单元基本结构示意图

Fig. 2 Basic structure of sensitive units

4 结构参数仿真与优化

电化学地震传感器的结构参数(如微电极几何参数、微流道结构参数等)影响传感器离子的速度场分布、电流密度等,最终影响传感器的输出。因此为获得高性能的电化学地震传感器,对其结构参数进行了仿真计算和优化。

平面电极型电化学地震传感器的核心由层叠芯片组构成,传感器输出为每层芯片输出的总和。为简化计算,建立了如图 3 所示的单层芯片仿真模型。其中, L 是叉指微电极宽度, D 是叉指电极

对的阴极和阳极之间的间距, H 是流道高度, W 是两对阴极之间的间距。

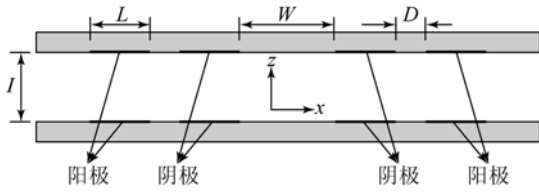


图 3 仿真模型

Fig. 3 Simulation model

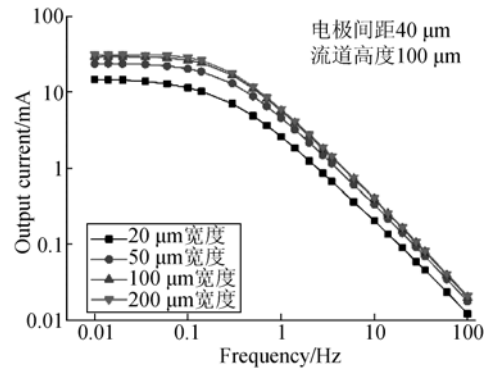
为仿真层叠芯片组的幅频特性曲线, 采用的仿真输入为恒定幅值 (10^{-5} m/s)、不同频率的正弦速度矢量, 输出为两对阴极电流差分后的峰值。图 4 所示为不同结构参数(电极宽度 L 、阴阳电极间距 D 和流道高度 H)条件下层叠芯片组的输出频率特性。

由图 4(a)可以看出, 电极宽度 $L < 100 \mu\text{m}$ 时, 电极宽度增加会带来器件灵敏度明显增加, 且在 1 Hz 以下增加明显, 1 Hz 以上增加量相对较小; 当电极宽度 $L \geq 100 \mu\text{m}$ 时, 频率响应曲线重合。这是因为外界震动速度 v 幅值恒定时, I_3^- 的扩散距离与震动频率成反比。随着频率由低变高, I_3^- 的扩散距离由长变短, 难以运动到相邻阴极, 对灵敏度的增加效果也随之降低。

由图 4(b)可以看出, 阴阳极间距 D 越宽, 频率特性输出曲线转折频率越低, 而且 0.1 Hz 以下 3 条曲线重合。这是因为频率较高时, 电极间距变宽使得 I_3^- 难以从阳极运动到相邻阴极, 就会在更低频点衰减。而在频率较低时, I_3^- 的扩散距离相比于阴阳极间距 D 足够长, 容易运动到阴极, 所以 3 条曲线是重合的。

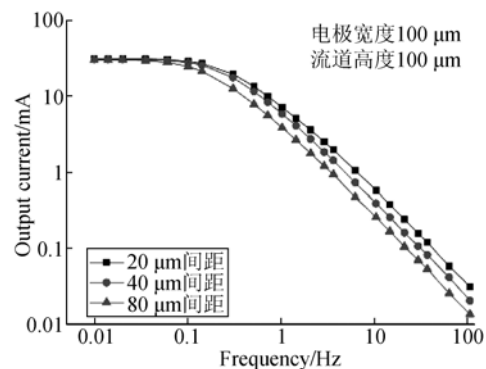
由图 4(c)可以看出, 流道高度 H 既影响灵敏度, 又影响频率转折点。这是因为流道的上下底面都有电极, 流道高度 H 降低, I_3^- 从流道中心扩散到阴极会更容易, 所以高频响应增大; 同时流道高度降低, 流道本身容纳的电解液减少, 参加反应的 I_3^- 总量也减少, 灵敏度会降低。

根据仿真可知, 电极宽度 L 不需要大于 $100 \mu\text{m}$, 而小于 $100 \mu\text{m}$ 则达不到最高灵敏度。电极间距 D 适当减小可以提高高频性能, 同时也不降低低频性能。流道高度 H 要均衡灵敏度和频带带宽来选择, 不宜过大或过小。



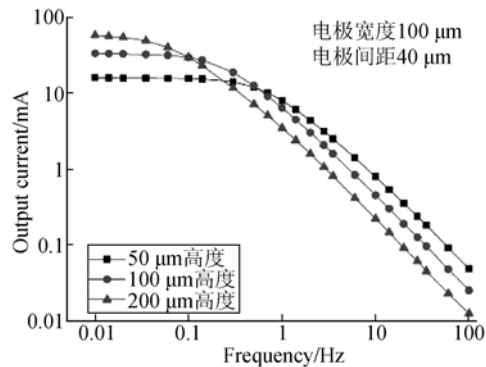
(a) 电极宽度 L

(a) Electrode width L



(b) 电极间距 D

(b) Electrode spacing D



(c) 流道高度 H

(c) Channel height H

图 4 各参数对频率特性影响的仿真

Fig. 4 Simulation of impact of various parameters on frequency characteristics

5 平面电极型 MEMS 电化学地震传感器芯片组制作工艺

为解决电化学地震传感器传统精密加工工艺成本高和一致性差等问题, 平面电极型 MEMS 电化学地震传感器核心层叠芯片组采用 MEMS 表面工艺

和准 LIGA 工艺制备,其工艺流程如图 5 所示。

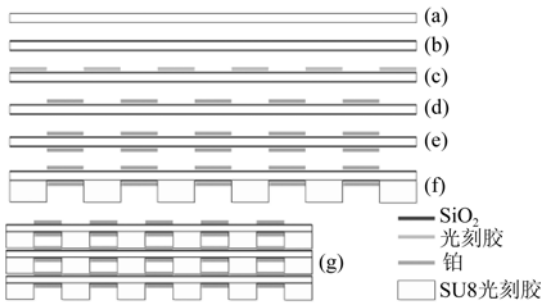
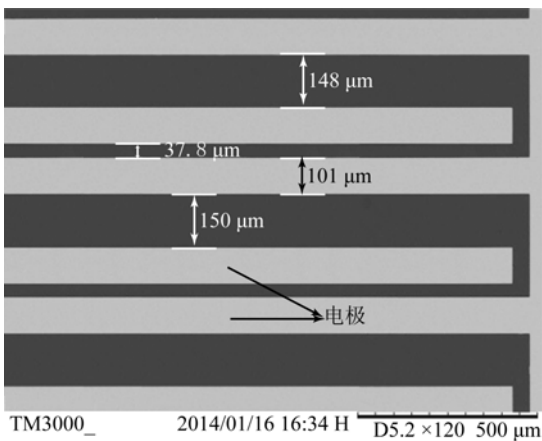


图 5 MEMS 工艺步骤示意图

Fig. 5 Schematic diagram of MEMS process steps

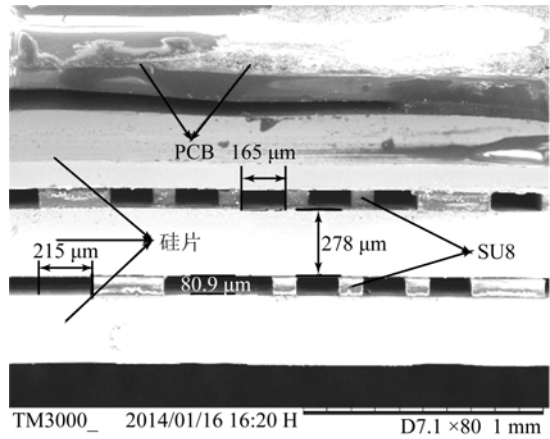
硅片清洗(图 5a)后氧化形成绝缘层(图 5b),在其一面采用光刻进行图形转移(图 5c),通过溅射和 lift-off 工艺获得叉指电极(图 5d)。然后在其另一面重复进行对准光刻、溅射和 lift-off 工艺,得到双面具有叉指电极的芯片(图 5e)。利用准 LIGA 工艺在带有双面电极的芯片上制作 SU8 微流道,获得芯片基片(图 5f)。基片上制有专用的对准孔,将多片基片对准对准孔后进行层叠组装即可得到传感器的层叠芯片组(图 5g)。

按照结构参数仿真的结果,选择电极宽度 $L=100 \mu\text{m}$,电极间距 $D=40 \mu\text{m}$,流道高度 $H=80 \mu\text{m}$,制作出来的 MEMS 地震传感器层叠芯片组如图 6 所示,图 6(a)为一个芯片基片的局部电极表面,图 6(b)为多层基片层叠之后的截面 SEM 照片。



(a)电极表面结构图

(a) Structure of electrode surface



(b)芯片层叠结构图

(b) Structure of chipset

图 6 传感器层叠芯片组 SEM 图片

Fig. 6 Picture of chipset scanned by TM3000

6 性能测试

6.1 频率响应曲线测试

在实验室环境下,利用自制的电化学地震传感器测试装置(由信号发生器、电感线圈、磁铁、地震传感器、采集电路等组成)^[13],对平面电极型电化学传感器进行了频率响应曲线测试,并与采用传统精密加工的电化学地震传感器 MET2003 进行对比,频率响应测试结果如图 7 所示。

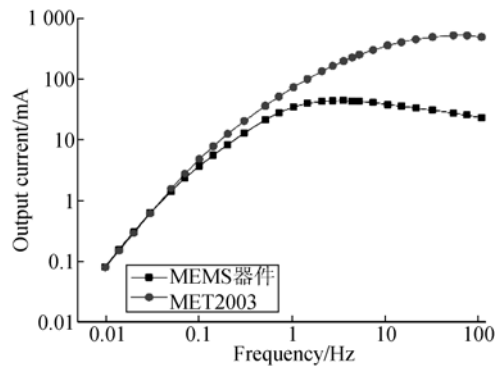


图 7 MEMS 器件与 MET2003 频率特性的比较

Fig. 7 Frequency characteristics of MEMS device compared with MET2003

实验结果表明:平面电极型 MEMS 电化学地震传感器转折频率在 1 Hz 附近,3 dB 带宽为 30 Hz,而 MET2003 器件的转折频率在 50 Hz;在 0.1~1 Hz 频段,频率衰减小于 20 dB/dec,略低于 MET2003 器件;在 < 0.1 Hz 频段,与

MET2003 器件频率特性一致。由此可见,基于 MEMS 工艺的平面电极型电化学地震传感器的响应频带较传统精密加工的 MET2003 电化学地震传感器更宽。

6.2 微震动测试

在测试平台未施加激励的情况下,将传感器置于安静的地下室进行了长时间天然微震动测试。图 8 所示为夜间测试的平面电极型 MEMS 电化学地震传感器与 MET2003 传感器对地表振动速度的采集结果,采样率为 100 Hz,采样时长 0.5 h。可以看出,平面电极型 MEMS 电化学地震传感器与 MET2003 器件在时域上匹配很好,波形一致,但是相位上略有偏差,相关系数为 0.887。

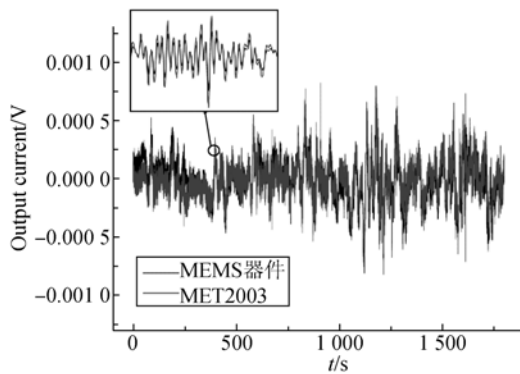


图 8 MEMS 器件与 MET2003 时域采集的比较

Fig. 8 Acquisition records in time domain of MEMS device compared with the MET2003

将所记录的时域数据进行功率谱分析,如图 9 所示,可以看出,在微弱震动情况下平面电极型电化学地震传感器和 MET2003 器件的功率谱基本一致。

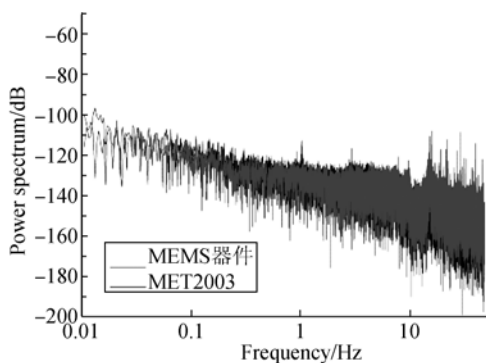


图 9 MEMS 器件与 MET2003 功率谱的比较

Fig. 9 Power spectrum in frequency domain of MEMS device compared with MET2003

6.3 噪声测试

图 10 所示为在中国地震局白家疃台站的基岩台上进行的噪声水平测试结果。可以看到平面电极型 MEMS 电化学地震传感器的噪声总体上略微高于 MET2003 大约 5~10 dB,在 10 Hz 以上噪声达到将近 140 dB,1 Hz 处噪声小于 120 dB,整体噪声小于 100 dB。

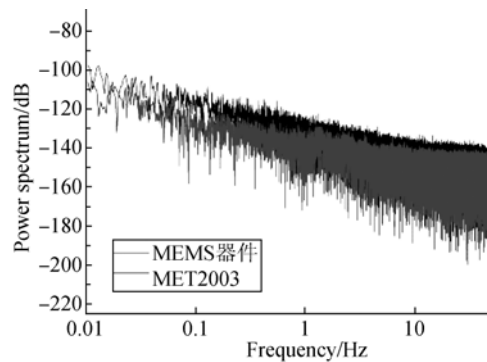


图 10 噪声水平测试

Fig. 10 Noise level between MEMS device and MET2003

7 结 论

本文提出了一种基于 MEMS 工艺的平面电极型电化学地震传感器新结构,采用可批量化生产的 MEMS 工艺,降低了传感器的工艺实现难度和制作成本。建立了平面电极型 MEMS 电化学地震传感器核心单元的仿真模型,并对其结构参数进行了多场耦合仿真,得到了各个参数对于器件频率特性的影响,确定了器件的结构参数。平面电极型 MEMS 电化学地震传感器和传统工艺电化学地震传感器 MET2003 器件对比测试结果表明,两种器件具有很好的相关性和一致性,相关系数为 0.887,且平面电极型 MEMS 电化学地震传感器较 MET2003 带宽更宽,达到 30 Hz。噪声水平上,平面电极型 MEMS 电化学地震传感器在 1 Hz 处噪声小于 120 dB,整体噪声小于 100 dB。本文方法为电化学地震传感器的设计提供了参考。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] LI G B, CHEN D Y, WANG J B, *et al.*. A MEMS based seismic sensor using the electrochemical approach [J]. *Procedia Engineering*, 2012, 47: 362-365.
- [3] KOZLOV V A, AGAFONOV V M. Convective accelerometer; USA, Patent 20050257616A1 [P]. 2005.
- [4] KOZLOV V A, AGAFONOV V M. Convective accelerometer with positive or negative inertial mass; USA, Patent 20080216571A1 [P]. 2008.
- [5] 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(3): 250-264.
- [6] HE W T, CHEN D Y, LI G B, *et al.*. Low frequency electrochemical accelerometer with low noise based on MEMS [J]. *Key Engineering Materials*, 2012, 503: 75-80.
- [7] KOZLOV V A, THERENT'EV D A. Transfer function of a diffusion transducer at frequencies exceeding the thermodynamic frequency [J]. *Russian Journal of Electrochemistry*, 2003, 39 (4): 401-406.
- [8] AGAFONOV V M, NESTEROV A S. Convective current in a four-electrode electrochemical cell at various boundary conditions at anodes [J]. *Russian Journal of Electrochemistry*, 2005, 41 (8): 880-884.
- [9] AGAFONOV V M, KRISHTOP V G. Diffusion sensor of mechanical signals: Frequency response at high frequencies [J]. *Russian Journal of Electrochemistry*, 2004, 40(5): 537-541.
- [10] KOZLOV V A, SAFONOV M V. Dynamic characteristic of an electrochemical cell with gauze electrodes in convective diffusion conditions [J]. *Russian Journal of Electrochemistry*, 2004, 40(4): 460-462.
- [11] SUN Z Y, AGAFONOV V M. 3D numerical simulation of the pressure-driven flow in a four-electrode rectangular micro-electrochemical accelerometer [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2010, 146(1): 231-238.
- [12] SUN Z Y, AGAFONOV V M. Computational study of the pressure-driven flow in a four-electrode rectangular micro-electrochemical accelerometer with an infinite aspect ratio [J]. *Electrochemical Acta*, 2010, 55 (6): 2036-2043.
- [13] DENG T, CHEN D Y, WANG J B, *et al.*. A MEMS based electrochemical vibration sensor for seismic motion monitoring [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2014, 23(1): 92-99.

作者简介:



龚黎明 (1989-), 男, 湖北随州人, 硕士, 2011 年于华中科技大学获得学士学位, 主要从事 MEMS 电化学地震传感器的研究。E-mail: stephenkung@126.com

导师简介:



王军波 (1973-), 男, 河北石家庄人, 研究员, 1995 年、1998 年于吉林工业大学分别获得学士、硕士学位, 2002 年于清华大学获得博士学位, 主要从事 MEMS 物理量传感器、生化传感器的设计、加工、封装及微弱信号检测等方面的研究。E-mail: jbwang@mail. ie. ac. cn

(版权所有 未经许可 不得转载)