

文章编号 1004-924X(2013)09-2266-06

电极表面粗糙度对检测电容的影响

张海峰^{1,2*}, 刘晓为^{1,2}, 李海², 陈楠²

(1. 哈尔滨工业大学 微系统与微结构制造教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工业大学 MEMS 中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 平行板电容是大多数 MEMS 传感器件的核心检测结构。考虑随着检测电极间距的减小, 电极表面粗糙度会对其空间电场分布产生影响, 本文研究了电极表面粗糙度对检测电容性能的影响。建立了单粗糙电极的平行板电容器模型, 并采用有限元法分析了表面粗糙度和边缘效应对静电场分布的影响; 针对粗糙表面增大了电极存储电荷的能力, 对粗糙表面的平行板电容器计算公式进行了修正。采用原子力显微镜对不同粗糙度的样本进行了表征, 实验和仿真结果表明: 减小两电极之间的距离, 增大检测电极的表面粗糙度, 可以显著增大检测电容。当检测电极的粗糙度从 0.063 nm 增加到 60 nm 时, 平行板电容器电容值增大了 9.0%。结论显示, 增大 MEMS 电容器两电极的表面粗糙度, 可以有效地增大 MEMS 器件的检测灵敏度。

关键词: 检测电容; 表面粗糙度; 电极; 微机电系统

中图分类号: TM934.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132109.2266

Effect of surface roughness of electrode on detecting capacitance

ZHANG Hai-feng^{1,2*}, LIU Xiao-wei^{1,2}, LI Hai², CHEN Nan²

(1. *Key Laboratory of Micro-systems and Micro-structures Manufacturing, Harbin Institute of Technology of the Ministry of Education, Harbin 150001, China;*

2. *MEMS Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)*

* *Corresponding author, E-mail: moonzhf@163.com*

Abstract: Parallel plate capacitor is a core mechanism in a Micro-mechanical-electrical (MEMS) sensing device. As the surface roughness of an electrode has obviously impact on the space electric field when the distance between the electrodes is shortened in the capacitance detection, this paper explores the effect of the surface roughness of electrode on the performance of the parallel plate capacitor. A parallel plate capacitor model with a single roughness electrode was established, and then the finite element method was used to study the effect of the surface roughness on the detecting capacitance. Based on increasing rough surface to enhance the memory electric charge capability, the formula for parallel plate capacitor with rough surface was corrected. Finally, the Atomic Force Microscopy (AFM) was used to describe the samples with different surface roughnesses. Experiments and simulation results indicate that the surface roughness has a obviously effect on the detecting capacitance. Increasing the surface roughness of an electrode and decreasing the distance between the electrodes can improve the detecting capacitance greatly. When the surface roughness of an electrode increases from 0.063 nm

收稿日期: 2013-03-15; **修订日期:** 2013-04-17.

基金项目: 国家重大科学研究计划资助项目 (No. 2012CB934104); 国家自然科学基金资助项目 (No. 61071037); 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (No. HIT. NSRIF. 2014040)

to 60 nm, the detecting capacitance value grows by 9.0 percent. The result shows that increasing the surface roughnesses of electrodes can improve the sensitivity of MEMS devices.

Key words: detecting capacitance; surface roughness; electrode; Micro-electro-mechanical System (MEMS)

1 引言

金属电极表面用肉眼观察是光滑的,但在显微镜下观测是非常粗糙的。以真空蒸发或溅射沉积的金属薄膜电极为例,电极表面一般呈现多晶状态,膜层本身由许多小晶粒构成,其表面粗糙度与晶粒尺寸相当。多数情况下晶粒尺寸为几十至几百纳米,这也就是金属电极表面粗糙度的峰-峰值。当金属电极极板的尺寸和间距较大时,电极表面粗糙度对器件性能的影响可以忽略。随着 MEMS 器件尺度的不断减小,表面粗糙度对器件的电容、电子传导率、表面能、等效面积、峰值电场、表面张力和薄膜电阻等参数具有重要的影响^[1-2]。

电容检测由于具有灵敏度高、温度特性好、易于实现系统集成等,已经成为 MEMS 器件微弱信号检测的常用技术^[3]。在当前设计中,普遍采用平行板电容器模型进行电容计算,当 MEMS 器件尺度进一步减小时,电极表面的粗糙度对器件的性能具有重要的影响^[4-6]。检测电极间的距离减小,电极表面的粗糙度增大时,检测电极周围的空间电场分布将未知,采用经典的平行板电容器分析电容的大小,其误差也将进一步增大。现有的研究表明,电极表面粗糙度引起两极板之间静电势和静电场的空间波动,增大了两极板间的平均电势和平均电场,产生附加电容、附加静电能和附加力,静电力也有可能产生附加漏电流^[7]。因此,有必要考虑电容检测 MEMS 器件电极表面粗糙度对电容器的影响。近年来,国内外研究学者开始重视研究表面粗糙度对检测电容的影响。当前,表面粗糙度通常采用幂级数和快速傅里叶变换的方法模拟^[8-9]。自相似分形的概念已被用于模拟粗糙表面,Previous 等使用单参数分形的方法定性描述了表面粗糙度,采用 M-W(Mandelbrot-Weierstrass) 函数模拟了电极表面粗糙度^[10]。然而上述方法难以定量地计算平行板电容器的值。本文采用原子力显微镜分析电极表面

粗糙度,通过建立单粗糙度平行板电容器模型,利用有限元和数值分析的方法计算了表面粗糙度对检测电容的影响,修正了具有粗糙表面的平行板电容器的计算公式。

2 单粗糙平行板电容器模型

2.1 单粗糙表面的电容器模型

传统的平行板电容器,两平行板间的电场被认为是匀强电场,电容值可以按经典公式计算:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d}, \quad (1)$$

式中: ϵ_0 代表真空介电常数(8.85×10^{-12}), ϵ_r 代表相对介电常数。当电极表面粗糙度变化时,电极的等效面积和电极周围的空间电场将发生变化。因此,需要研究表面粗糙度对检测电容的影响。

为了研究电极表面粗糙度对检测电容的影响,建立了单粗糙度的平行板电容器模型,假设整个电极表面粗糙度是均匀和各态历经的,电极表面的平均粗糙度为:

$$R_a = \frac{\int_0^L |h(x) - \bar{h}| dx}{L}, \quad (2)$$

其中: $h(x)$ 表示粗糙表面的起伏, L 表示电极的长度。 \bar{h} 表示电极表面起伏的平均高度。模型中

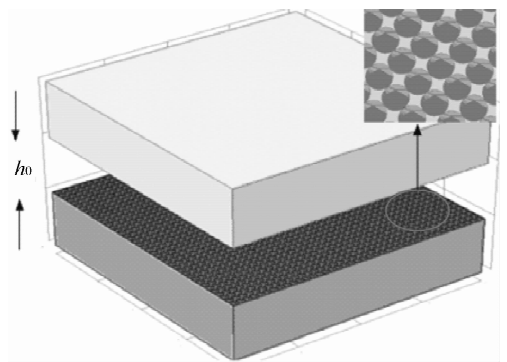


图1 单粗糙电极的平行板电容器模型

Fig. 1 Model of parallel plate capacitor with single rough electrode

假设平行板电容器的上电极假设是绝对光滑的,下平行板是具有一定几何拓扑的粗糙表面,单粗糙度的平行板电容器的模型如图 1 所示。

图中,电极的宽度为 w ,两电极之间的间距为 h_0 ,为研究电极表面的粗糙度对检测电容的影响,模型中电极形状为正方形,电极的长度和宽度为 $50 \mu\text{m}$,两电极之间的间距为 $1 \mu\text{m}$,圆锥的直径为 100 nm ,圆锥的高度为 20 nm ,通过调整圆锥的高度可以调整表面粗糙度。在上检测电极加 $+1 \text{ V}$ 的电压,下电极加载 0 V 的电压,采用有限元软件建立了两平行板电容器的电场模型,两平行板间的电场分布如图 2 所示:

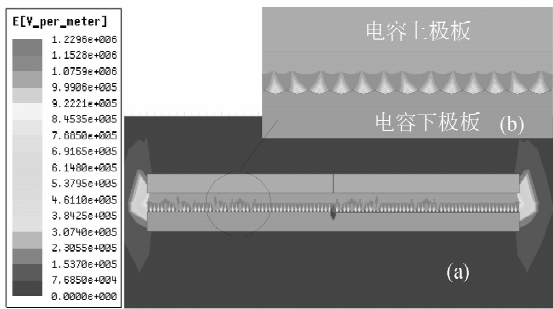


图 2 单粗糙电极的平行板间的电场分布(a)电容器空间电场分布,(b)粗糙表面电场的局部放大图

Fig. 2 Electric field distribution between two parallel plates

由图 2 的电场分布仿真可知,在检测电极的边缘处,平行板电容器的空间电场分布不均匀,在粗糙的电极表面,空间电场分布也不是匀强的,粗糙电极表面的电场强度明显高于光滑表面的电场强度。仿真结果表明,电极表面粗糙度效应能够引起平行板电容器中电势和电场分布的变化。电场分布的不均匀性直接导致两电极之间的电力线不再呈直线分布,粗糙的电极使得平行板电容器极板的等效面积增大,在施加相同的电压条件下,电容的有效面积的增大导致有效电荷存储容量的增加。两电极之间的电势也不在呈均匀分布,因此,需要求解带边界条件的拉普拉斯方程:

$$\nabla^2 \Phi(r, z) = 0, \tag{3}$$

$$\Phi(r, z) = 0, \tag{4}$$

$$\Phi(r, z = h(r)) = v, \tag{5}$$

其中: Φ 代表电极表面静电势, r 是 x - y 平面的二维波矢, $z=h(r)$ 表示电极表面粗糙起伏。

2.2 粗糙表面的电容器的电容计算

为了构造不同表面粗糙度对检测检测电容的

影响,文献[10]采用 Fourier 变换的方法描述表面粗糙度起伏。

$$\tilde{h}(r) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int d\boldsymbol{\rho} \cdot h(\boldsymbol{\rho}) \exp(i\boldsymbol{r} \cdot \boldsymbol{\rho}). \tag{6}$$

单粗糙电极平行板电容器的电容可以通过下式表示^[11]:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{h_0} \left\{ 1 + \frac{2}{A} \int_{0 < |k| < k_c} r^2 < | \tilde{h}(r) |^2 > dr + \frac{2\pi}{Sh_0} \int_{0 < |r| < r_c} \frac{\cos h(rh_0)}{\sin h(rh_0)} r < | \tilde{h}(r) |^2 > dr \right\}. \tag{7}$$

可以将上述电容 C 简化为两部分。

$$C = (1 + C') C_0. \tag{8}$$

因此,平行板电容器的计算公式可修正为:

$$C = (1 + \lambda(h)) \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d}, \tag{9}$$

其中: $\lambda(h)$ 为粗糙度修正因子,通过确定 $\lambda(h)$ 的值,就可以实现对不同粗糙度的平行板电容器的电容量的计算。

通过建立的平行板单粗糙度模型,利用有限元的方法计算具有不同表面平均粗糙度电极的电容值,在仿真中,可以通过改变模型中图形的高度改变电极表面的平均粗糙度。

从图 3 可知,当平均粗糙度从 10 nm 增加到 60 nm 时,平行板电容器的电容值增大了约 5.5% ,当两电极之间的间距进一步减小时,电容值改变的更为明显。由图 2(b)可知,电极表面存在粗糙度变化时,电极表面的粗糙起伏引起其空间电场发生变化,由于尖端效应,粗糙表面电极板的电荷主要分布在尖端部位,使得空间电场的最大分布点位于粗糙定点的上方,使得平行板电容器两极板之间的等效距离减小,因此,增大了平行板电容器的电容值。

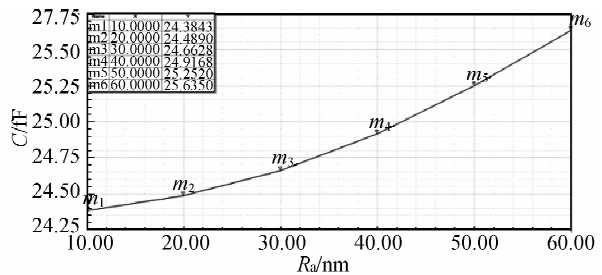


图 3 不同平均粗糙度的电极对电容的影响

Fig. 3 Capacitance as a function of electrode surface roughness

为了研究不同表面形貌对检测电极电容的影响,在保证平均粗糙度相同的条件下,构建了粗糙底面为三角形、梯形和矩形 3 种表面结构。仿真中梯形高度 $h=6.8R_a$, 三角形的高度 $h=4R_a$, 长方形的高度 $h=2R_a$ 。不同形貌的表面检测电容的影响如图 4 所示。从图中可以看出,表面形貌的高度相对于平均粗糙度越高,其对检测电容的影响就越大,梯形结构相对于平均粗糙度高度最高,其电容值也最大。分析原因主要是由于粗糙极板的空间电荷主要分布在表面结构的最顶点,使得梯形结构的平行板电容器两极板间的等效距离最短,电容值最大,采用梯形结构时,当平均粗糙度从 10 nm 增加到 60 nm 时,平行板电容器的电容值增大了约 9.0%。

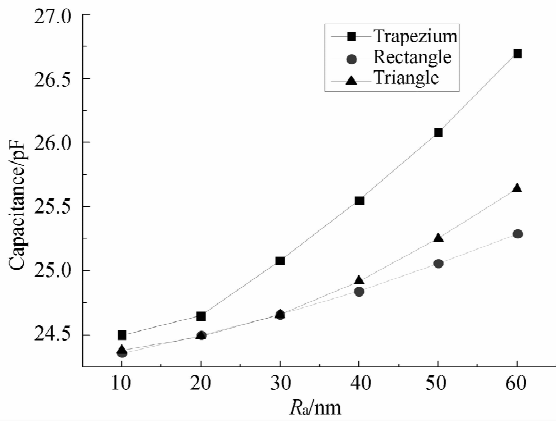


图 4 不同表面形貌对检测电容的影响

Fig. 4 Effect of surface structure on the capacitance

从上述仿真可以得出,当 MEMS 尺寸进一步减小时,需要考虑粗糙度对检测电容的影响。修正后的平行板电容器计算公式中的比例因子,可以通过对不同平均粗糙度的电极仿真计算得到。采用该方法相对于传统的计算方法可以有效的减小计算量。对于电容检测的 MEMS 传感器,增大检测电极表面粗糙度,可以有效的增大检测电容。

3 测量与分析

随着测量技术的发展,产生出了光切式、干涉和散射法等光学方法来测量表面形貌^[12-13]。20 世纪 80 年代出现的原子力显微镜 (AFM)、扫描隧道显微镜 (STM)、扫面近场光学显微镜 (SN-OM)、光子扫描隧道显微镜 (PSTM) 等已经成为

微纳米表面形貌测量的主要工具。原子力显微镜可以在大气和液体环境下对各种材料和样品进行纳米区域的物理性质包括形貌进行精确探测,因此,本文选用原子力显微镜测量电极表面形貌。图 5 是经过扫描后检测电极的表面形貌图。

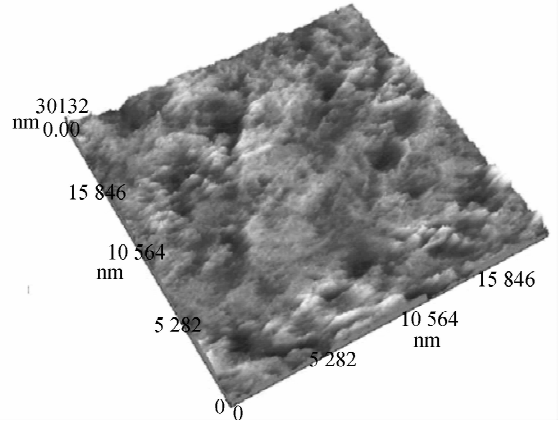


图 5 电极表面的 AFM 扫描形貌图

Fig. 5 Structure of electrode surface

扫描区域的面积为 $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$,由图可知,经过溅射和腐蚀后的电极表面形貌存在起伏,通过 CSPM Imager 软件对其表面粗糙度进行分析,其表面形貌的平均粗糙度约为 46.9 nm。扫描后的样本高度比例和直方图如图 6 所示。

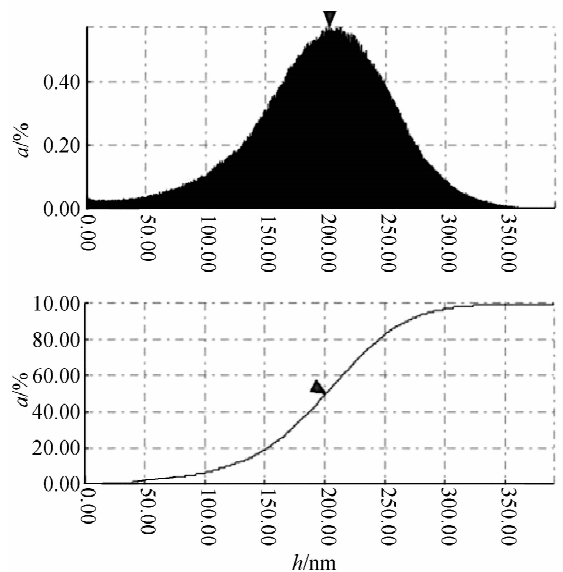


图 6 电极表面形貌高度比例图和高度直方图

Fig. 6 Images of height histogram and height percentage on electrode sample

由扫描形貌分析的高度直方图可以看出,经腐蚀后的表面高度最高可达 391 nm,整体高度在

0~391 nm 呈正态分布,主要集中在 150~250 nm,在 200 nm 左右概率较高。而高度比例图也可更直观地反应出表面高度的分布情况,通过图像可看出高度在 150~250 nm 占整个表面的 60% 之多。采用单粗糙平行板电容器模型计算粗糙度对检测电容的影响时,需要对电极进行网格划分,网格划分越粗,仿真就越快,系统的结果误差相对较大;网格划分越细,计算量也就越大,仿真结果也越精确。对于检测电极尺寸较大的 MEMS 结构,网格划分过细时,仿真过程的计算量较大,结果难以收敛。因此,在分析过程中,将检测电极进行分块化处理,将其均匀划分成若干块,假设电极表面结构均匀,整个电极的长度为 a ,宽度为 b ,划分后的每块电极的长度为 a' ,宽度为 b' ,具有粗糙结构的平行板电容器 C 的值可以按照如下的公式近似计算:

$$C = (1 + \lambda(h)) \sum_{i=1}^n \Delta C = (1 + \lambda(h)) \sum_{i=1}^n \frac{\epsilon_0 \epsilon_a' \cdot b'}{h_0} = n(1 + \lambda(h)) C_0, \quad (10)$$

其中: $n = \frac{a \cdot b}{a' \cdot b'}$, C_0 为单块小平行板的电容, $\lambda(h)$ 为修正因子对于平均粗糙度 R_a 的电极,其值可以通过有限元仿真的方法确定。

试验中,采用磁控溅射的方法制备了长度和宽度为 5 mm,厚度为 2 μm 的金属铝电极,采用电化学腐蚀的方法,通过调整腐蚀时间制备了不同粗糙度的电极。利用原子力显微镜对电极表面进行粗糙度测量,每个样本取 5 个测量点做算数平均,样本的平均粗糙度如表 1 所示。

表 1 不同平均粗糙度表面的检测电容值

Tab.1 Capacitance value at various surface roughnesses

样本 序号	粗糙度 /nm	电容 /pF	电容增量 /pF
1	0.063	264.00	42.75
2	1.79	269.75	43.50
3	8.88	277.01	55.75
4	25.8	277.75	56.50
5	46.9	282.75	61.50
6	57.7	285.75	64.50
7	64.4	288.01	66.75

两检测电极之间的距离为 1 μm ,通过阻抗测试仪,测量了具有不同平均粗糙度的样本电容值,拟合后的曲线如图 7 所示。测量结果可以看出,检测电容值随着表面粗糙度的逐渐增加而增大,当粗糙度从 0.063 nm 增加到 60 nm 时,检测电容值增大了约 9.0%。实验测试结果与建立的模型计算结果基本一致,测量结果比理论计算的值稍大,分析原因,主要是采用电化学腐蚀时,腐蚀造成的表面结构的不均匀和测量过程中所产生的寄生电容造成的。当两检测电极极板的面积远大于两检测电极之间的间距时,仿真结果与实验测试结果较为吻合。分析原因,主要是随着两检测电极极板的长度和宽度远大于两检测电极之间的距离时,边缘效应对平行板电容器的影响减小。

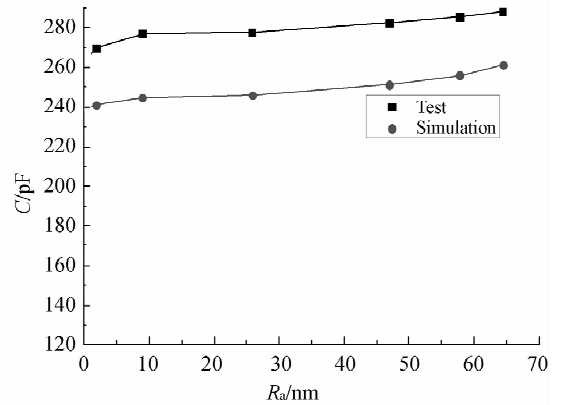


图 7 不同表面平均粗糙度对检测电容的影响

Fig.7 Effect of surface roughness on the capacitance

4 结 论

本文通过建立的单粗糙度平行板电容器模型,分析了表面粗糙度和边缘效应对静电场分布的影响。理论和实验研究结果表明,当两检测电极间距在微米量级,检测电极的表面粗糙度从 10 nm 增加到 60 nm 时,相同面积的平行板电容器的检测电容增加了 9.0%。结果显示,增大检测电极的粗糙度,能够有效的增大平行板电容器的电容值。研究结果对设计、制造高性能的 MEMS 传感器具有重要的指导意义。

参考文献:

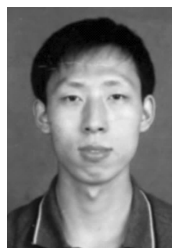
- [1] PATRIKAR R M, DONG CH Y, ZHUANG W J. Modelling interconnects with surface roughness [J]. *Microelectronics Journal*, 2002, 33: 929-934.
- [2] ALBINA A, TABERNA P L, CAMBRONNE J P, *et al.*. Impact of the surface roughness on the electrical capacitance [J]. *Microelectronics Journal*, 2006, 37: 752-758.
- [3] TSAI N C, LIOU J S, LIN C C, *et al.*. Design of micro-electromagnetic drive on reciprocally rotating disc used for micro-gyroscopes [J]. *Sensors and Actuators A*, 2010, 157: 68-76.
- [4] 代刚,李枚,苏伟,等.微惯性测量单元的误差整机标定和补偿[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(7): 1620-1626.
- DAI G, LI M, SU W, *et al.*. Error calibration and compensation of entire micro inertial measurement unit [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7): 1620-1626. (in Chinese)
- [5] LUO J K, LIN M, FU Y Q, *et al.*. MEMS based digital variable capacitors with a high-k dielectric insulator [J]. *Sensors and Actuators A*, 2006, 132: 139-146.
- [6] YU W, ZHANG Q, YE Z, *et al.*. Efficient statistical capacitance extraction of nanometer interconnects considering the on-chip line edge roughness [J]. *Microelectronics Reliability*, 2012, 52: 704-710.
- [7] 郭等柱. 电极表面粗糙度对 MEMS 平行板电容器的影响[C]. 中国惯性技术第五届学术年会, 2003:

172-180.

GUO D Z. The effect of electrode surface roughness on the MEMS parallel plate capacitor [C]. CSIT, 2003, 172-180. (in Chinese)

- [8] GILL V, GUDURU P R, SHELDON B W. Electric field induced surface diffusion and micro/nano-scale island growth [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2008, 45: 943-958.
- [9] ALBINA A, TABERNA P L, CAMBRONNE J P, *et al.*. Influence of carbonaceous electrodes on capacitance and breakdown voltage for hybrid capacitor [J]. *Microelectronics Journal*, 2007, 38: 642-648.
- [10] PATRIKAR R M. Modeling and simulation of surface roughness [J]. *Applied Surface Science*, 2004, 228: 213-220.
- [11] ZHAO Y P, WANG G C, LU T M. Surface roughness effect on capacitance and leakage current of an insulating film [J]. *Phys. Rev. B*, 1999, 60: 9157-9164.
- [12] DURAKBASA M N, OSANNA P H, DEMIR-CIOGLU P. The factors affecting surface roughness measurement of the machined flat and spherical surface structures-The geometry and the precision of the surface [J]. *Measurement*, 2011, 44: 1986-1999.
- [13] 尼启良,陈波. 散射法表面粗糙度测量[J]. *光学精密工程*, 2001, 4: 151-154.
- NI Q L, CHEN B. Measurement of surface roughness by scattering method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 4: 151-154. (in Chinese)

作者简介:



张海峰(1978—),男,新疆沙湾人,博士后,讲师,2005年于空军工程大学获得硕士学位,2009年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事微纳惯性器件、无线传感器网络和微流控芯片研究。E-mail: moonzhf@163.com



刘晓为(1955—)男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,1982年、1988年、2003年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事 ASIC 接口电路、MEMS 传感器、微能源、生物芯片和无线传感器网络技术研究。E-mail: lxw@hit.edu.cn



李海(1988—),男,内蒙古兴安盟人,博士研究生,2011年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事微纳惯性器件和无线传感器网络研究。E-mail: lihai7772006@163.com



陈楠(1990—),女,内蒙古呼伦贝尔人,硕士,2012年于哈尔滨工业大学获得学士学位,主要从事微纳惯性器件方面的研究。E-mail: chennan1990@126.com