

一种基于厚膜陶瓷电容的微位移传感器

钱玉洁^{1,2}, 高理升¹, 王焕钦¹, 马以武¹,

孔德义¹, 熊剑平¹, 王英先¹, 张瑞¹

(1. 中国科学院 合肥智能机械研究所 传感技术联合国家重点实验室, 合肥 230031;

2. 中国科学技术大学 物理系, 合肥 230026)

摘要: 为深入研究微纳米环境中物体的受力与运动状态, 实现微纳米环境下的位置感知与位移操作, 建立纳米尺度下位移、力检测的理论方法, 研制了一种基于厚膜陶瓷电容的微位移传感器。通过采用厚膜混合集成工艺将信号处理电路与厚膜电容芯片一体化集成, 即用厚膜电路替代 PCB 电路板, 以达到降低由于温度效应和寄生电容等导致的非线性误差, 提高传感器的分辨率和稳定性的效果。传感器性能标定实验结果表明, 0~1 000 nm 量程范围内位移检测分辨率优于 2 nm, 传感器稳定性得到显著提高, 能够用于检测纳米级微小位移变化量。此外, 还从材料物理属性和电路优化设计等方面分析了一体化集成的厚膜电路相对于 PCB 电路板的优越性。

关键词: 微位移传感器; 厚膜电路; 陶瓷电容; 分辨率; 集成优化

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-4776 (2011) 03-0177-06

A Micro-Displacement Sensor Based on the Thick-Film Ceramic Capacitor

Qian Yujie^{1,2}, Gao Lisheng¹, Wang Huanqin¹, Ma Yiwu¹,

Kong Deyi¹, Xiong Jianping¹, Wang Yingxian¹, Zhang Rui¹

(1. State Key Laboratory of Transducer Technology, Hefei Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: A novel micro-displacement sensor based on the thick film ceramic capacitor was developed for further study of the dynamics and kinematics states of objects in micro/nano circumstance. It was used to realize micro/nano-scaled position sensing and operation, and establish the related theories and methods to detect the displacement and stress in nano-scale. As to the sensor, the signal processing circuit was integrated with the thick-film capacitor chip by thick-film hybrid integrated technology, in other words, the thick film circuit was used instead of the printed circuit board (PCB), which effectively decreased the nonlinearity errors due to the temperature effect and parasitic capacitance. Thus, the resolution and stability of the micro-displacement sensor were improved. The tests were carried out to investigate the performances of the asprepared sensor. The results show that its resolution is better than 2 nm in the range of 0-1 000 nm

收稿日期: 2010-11-02

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (60635040)

通信作者: 高理升, E-mail: gls2405@ustc.edu

and the stability of the sensor is significantly increased, which is sufficient for detecting the nano-scaled variation of displacement. Furthermore, the advantages of the integrated thick film circuit compared with the PCB were discussed in terms of material properties and optimal designs of electric circuits.

Key words: micro-displacement sensor; thick film circuit; ceramic capacitor; resolution; integrated optimization

DOI: 10.3969/j.issn.1674-4776.2011.03.009

EEACC: 7230M

0 引言

微纳米技术是 21 世纪最重要的科学技术之一, 不论是在航空、航天等高精尖的国防军工领域, 还是在机械、冶金等国民经济基础工业方面, 都无不遍及微纳米技术的应用。微纳米测量技术作为微纳米技术的关键技术之一, 其对于微纳米材料的发展、微纳米器件的加工及微纳系统的研究有着十分重要的意义。

检测微位移的方法有很多, 其原理也多种多样, 有电阻式、光电式和电感式等。常用的位移传感器有电阻式位移传感器^[1]、光电式位移传感器^[2]、电感式位移传感器^[3]、相位光栅干涉位移传感器^[4]、光纤位移传感器^[5]、霍尔式位移传感器^[6]和电容式位移传感器^[7-8], 各类位移传感器各有优缺点, 在此不一一赘述。

电容式位移传感器通过检测极板间电容值大小变化检测位移变化, 由于极板间的电场力极其微弱, 不易产生迟滞和变形, 从而降低了测量时表面应力带来的误差。因此, 它具有灵敏度高、分辨率高、动态响应速度快、稳定性高、功耗低、噪音小、漂移小以及结构简单等特点, 不仅适用于静态测量, 也适用于动态测量。近年来, 其被广泛应用于航空、航天及工业生产领域, 用于纳米级检测、测量微小振动和压力等场合。国外报道德国米纳 capaNC DT 系列精密电容位移计 DT6630, 其分辨率最高可达 0.1 nm, 用于微动机构的精确定位。该传感器采用单电极探头式结构, 通过测量探头与被测物体之间的电容变化量感知微位移的变化量。但该传感器的电容器通常以空气作为电容介质, 由于空气的介电常数受天气变化影响比较大, 例如晴天、阴天或雨天, 空气的介电常数就有明显区别,

所以此种传感器的性能受环境影响很大, 且这种影响难以通过信号处理电路进行校正。

本文研制了一种一体化集成的厚膜陶瓷电容式微位移传感器, 通过采用厚膜混合集成工艺实现信号处理电路与厚膜陶瓷电容芯片一体化集成, 用厚膜电路替代 PCB 电路板, 以降低由于温度效应和寄生电容等导致的非线性误差, 提高传感器的分辨率和稳定性, 使之满足纳米级微小位移变化量检测的要求。

1 传感器结构及工作原理

关于厚膜电容式微位移传感器结构及工作原理, 此前已有相关的研究报道^[9-12]。厚膜陶瓷电容式微位移传感器主要由厚膜陶瓷电容芯片、信号处理电路以及金属屏蔽外壳三部分构成。

厚膜陶瓷电容芯片采用变间隙平行板双电容结构, 陶瓷盖板和陶瓷弹性膜片上分别按照特定版图印烧导电浆料后构成电容器的两极。同时, 陶瓷盖板又用作厚膜电路的基体, 而弹性膜片作为敏感元件用于感知位移变化^[9-10]。

信号处理电路通常是以电容转电压信号集成处理芯片 (如德国 AMG 公司的 C/U 转换集成处理芯片 CAV414) 为核心, 辅以相应的运放和补偿电路构成的处理电路, 用于采集和处理传感器数据^[11]。

由于电容信号易受操作环境可能存在的电、磁信号等干扰, 甚至有时电容传感器测量中测量装置、测量人员的活动均会影响结果, 因此在传感器结构设计中采用金属屏蔽外壳对传感器进行整体封装, 以克服环境对传感器性能的影响^[11-12]。

厚膜电容式微位移传感器的工作原理较为简单, 即传感器通过陶瓷弹性膜片形变感知位移变

化, 其弹性膜片形变引发的电容变化信号经过信号处理电路转换、调制以及运放处理后输出直流电压信号。

2 工艺实验

2.1 厚膜陶瓷电容与信号处理电路的研制

厚膜陶瓷电容微位移传感器的制作过程如图 1 所示, 主要包括厚膜陶瓷芯片制作^[9-10]和信号处理电路设计^[11]两大部分, 厚膜陶瓷电容的陶瓷盖板与弹性膜片均采用 96% 的 Al_2O_3 陶瓷材质, 具体的工艺研究内容参见笔者之前的论文报道。

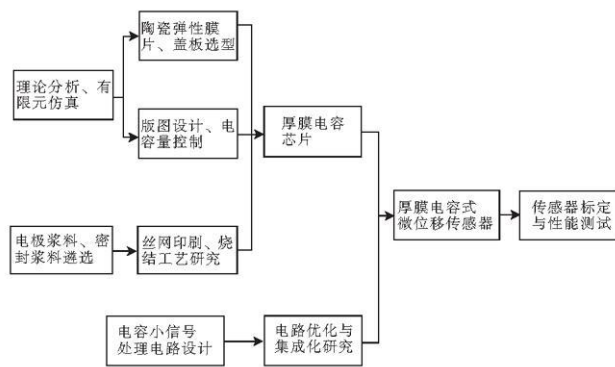
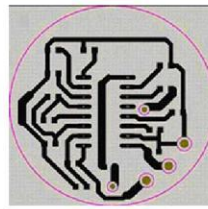


图 1 厚膜陶瓷电容微位移传感器的工艺流程图

Fig. 1 Technological flow chart of micro-displacement sensor based on the thick-film ceramic capacitor

2.2 敏感元件与信号处理电路的一体化集成

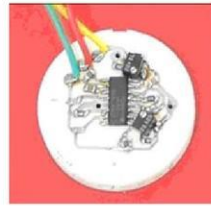
为改善传感器的温度特性, 减小寄生电容的影响, 提高传感器性能, 同时使电容传感器便于封装, 本文采用厚膜混合集成工艺, 将信号处理电路与敏感电容元件集成在一起, 其他电子元件以贴片的方式焊接在陶瓷基板上。具体工艺流程为: 首先将信号处理电路的平面图形(图 2(a))经过丝网印刷制成掩膜^[10]; 然后通过印刷、烧结, 将信号处理电路版图印烧在电容芯片的陶瓷盖板上即为厚膜电路(图 2(b))再焊接上电容、电阻和电位器等电子元器件; 为克服操作环境可能存在的电、磁信号等干扰, 采用金属屏蔽外壳完成整体封装, 就得到了一体化集成的厚膜电容微位移传感器(图 2(c)和(d))。



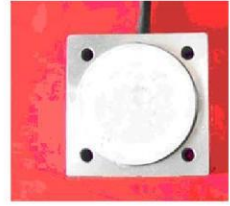
(a) 信号处理电路版图



(b) 厚膜电路



(c) 一体化集成的微位移传感器 (封装前)

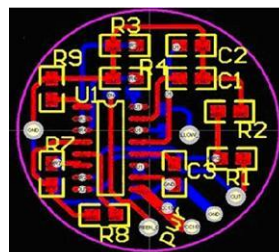


(d) 一体化集成的微位移传感器 (封装后)

图 2 信号处理电路与电容芯片的一体化集成

Fig. 2 Integration of the signal processing circuit and the thick-film capacitor chip

为验证一体化集成后的传感器性能有无明显改善, 作为对比同时制作了一批装配 PCB 电路板的微位移传感器, 其电容芯片与上述一体化集成的传感器所用电容芯片为同批次制作, PCB 电路板通过三脚插针与电容芯片连接, 并使其尽可能靠近厚膜电容传感器以减小寄生电容的影响。设计好后的电路 PCB 版图及实物图分别如图 3(a)和(b)所示。



(a) PCB 版图



(b) PCB 板信号处理电路实物图

图 3 PCB 版图和 PCB 板信号处理电路实物图

Fig. 3 PCB layout and image of the signal processing circuit on the PCB board

2.3 传感器性能标定

本传感器的性能标定工作是通过沈阳自动化所 PI 纳米操作台标定 (PI nanoposition/scanning stages, P-517.3CD) 完成的, 该平台通过 PZT 陶瓷受电激发产生纳米级微位移, 其分辨率为 0.1 nm, 精度为 1 nm。标定时, 传感器被固定在微纳操作平台上, 弹性膜片与 PZT 陶瓷刚性连接,

PZT 陶瓷受激后使弹性膜片产生形变，根据传感器信号处理电路反馈的电压信号即可测量 PZT 陶瓷受激产生的微小位移量变化。

3 结果与分析

3.1 测试结果

本文所研制一体化集成的厚膜电容式微位移传感器如图 2 (c) 和 (d) 传感器实物照片所示，根据厚膜电容初始容值以及选用的电子元器件规格，可通过理论计算得到所研制传感器的动态频响约为

80 Hz，理论功耗约为 20 mW。

通过沈阳自动化所 PI 纳米操作台标定所得的结果如图 4 和图 5 所示。两组图中，横轴变量均为位移量 (S)，不同标定条件对应的不同位移变化量，即单位位移变化量 (ΔS)；纵横变量均为弹性膜片感知位移变化后反馈的输出电压 (U) 信号。图 4 为一体化集成的微位移传感器检测不同微位移变化量的标定结果；图 5 则给出了相同工作条件下，装配 PCB 电路板的微位移传感器检测不同微位移变化量的标定结果。

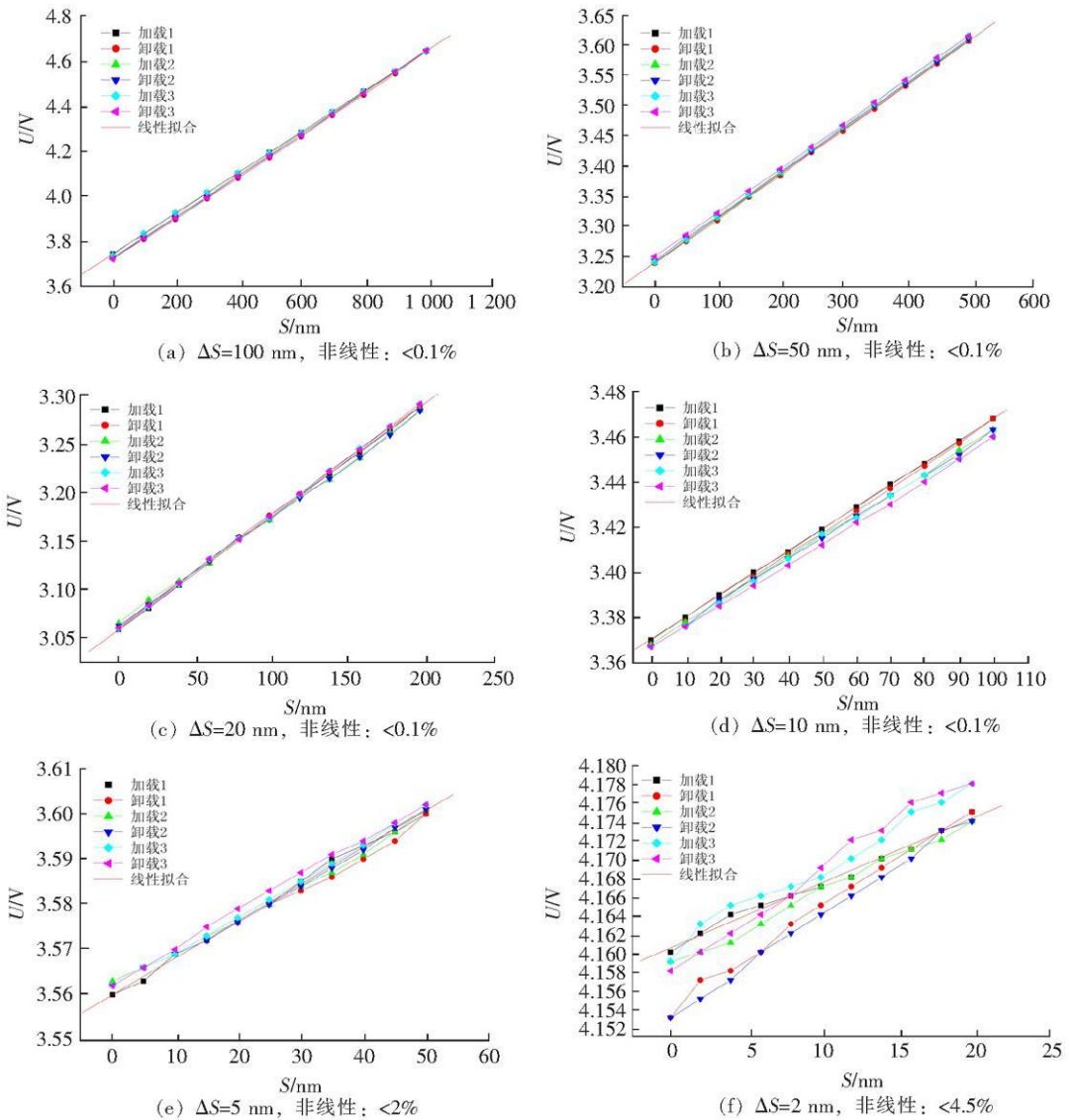


图 4 一体化集成的微位移传感器的标定结果

Fig 4 Test results of the integrated micro-displacement sensor

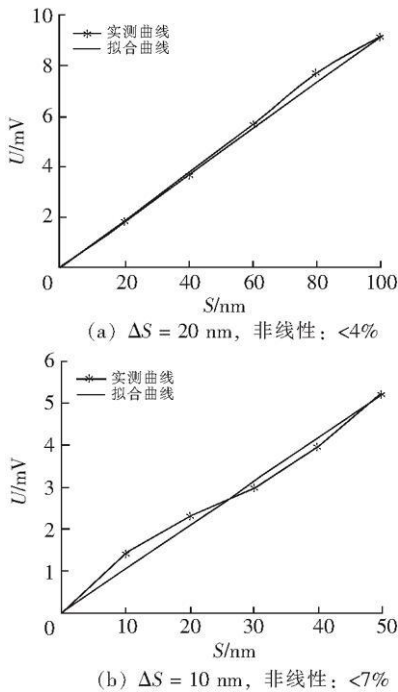


图5 装配 PCB 电路板的微位移传感器的标定结果

Fig 5 Test results of the micro-displacement sensor assembled with the PCB board

由图 4 (a) ~ (e) 可知, 一体化集成的厚膜电容式微位移传感器在分别检测 100, 50, 20, 10 和 5 nm 单位变化的纳米级微位移时呈现出良好的线性和稳定性, 且在多次连续的加载- 卸载循环性能测试中表现出较低的迟滞现象和较好的重复性。图 4 (f) 则展示了该型传感器在检测 2 nm 单位的微位移变化量时所得的一组曲线, 此时检测结果的线性和稳定性较图 4 (a) ~ (e) 所示结果均有所降低, 且多次连续的加载- 卸载循环性能测试所得结果呈现出较大的分散性。在实际标定实验中, 在标定平台可保证的精度范围 (1 nm) 内, 作者还尝试了更小单位变化量的位移检测标定, 可以观察到传感器的输出电压信号随着位移增加或减小而相应发生变化的现象, 但是已经很难得到准确可靠的成组数据。据此, 可以认为该型微位移传感器在 0~ 1 000 nm 的检测范围内分辨率优于 2 nm。

作为对比, 在相同实验条件下开展了装配 PCB 电路板的微位移传感器的性能检测标定, 仅能得到最小位移变化量为 10 nm 时的电压- 位移曲线, 且数据重复性较差, 具体标定结果如

图 5 (a) 和 (b) 所示, 其中纵坐标显示的输出电压信号经过归一化处理。分别对比图 4 (c) 与图 5 (a), 以及图 4 (d) 与图 5 (b), 不难看出, 通过将信号处理电路与厚膜电容芯片一体化集成处理后, 相同条件下, 传感器的分辨率、线性以及重复性等性能均得到显著提升。

3.2 结果分析

上述标定结果表明采用厚膜技术将信号处理电路与厚膜电容芯片一体化集成后的微位移传感器相对于采用 PCB 电路板的传感器其性能明显改善, 从数据对比可以看出一体化集成后, 传感器的非线性误差和迟滞性明显降低, 分辨率和重复性也显著提高。分析其原因, 主要可归结于以下两个方面。

3.2.1 一体化集成改善传感器的温度性能

如前文所述, 一体化集成的微位移传感器与装配 PCB 电路板的微位移传感器的最直观区别在于由 96% Al_2O_3 陶瓷盖板替代了环氧树脂材质的 PCB 电路板作为信号处理电路的基体。众所周知, 96% Al_2O_3 陶瓷与环氧树脂材料在比热容及热传导效率等热性能方面有很大差异, 据文献报道, 96% Al_2O_3 陶瓷材料的导热系数一般为 $1.015 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, 环氧树脂材料的导热系数一般为 $0.208 \text{ W/m} \cdot \text{K}^{[13]}$ 。很显然, Al_2O_3 陶瓷材料相对于环氧树脂材质的 PCB 电路板具有更好的导热散热性能, 所以当采用厚膜工艺将信号处理电路印刷在陶瓷片上时, 电路的温度性能明显改善, 温度引起的非线性误差大大降低; 同时, 在传感器工作状态下, 由于电路通电导致的温度效应对信号处理电路中各电子元器件的影响也得益于陶瓷材料良好的导热散热性能而被有效削弱。因此, 采用厚膜工艺将信号处理电路与厚膜电容芯片一体化集成能有效改善传感器的温度性能。

3.2.2 一体化集成抑制了寄生电容的产生和影响

由于传感器所采用厚膜电容芯片的初始容量约为 20 pF, 其满量程容值变化也仅为 3~ 5 pF, 因此传感器对寄生电容的干扰非常敏感。在装配 PCB 电路板的微位移传感器中, 信号处理电路必须通过三脚插针与厚膜电容芯片连接, 分布在插针和导线之间以及某些元件之间的分布电容等寄生电容的数值虽小, 但是会对传感器性能产生重要干扰。而采用厚膜一体化集成技术, 不用 PCB 电路板, 信号处理电路直接印刷、烧结在陶瓷盖板上, 电容

数字转换芯片及其他电子元器件以贴片方式焊接在陶瓷盖板上，不需要引入插针连接，最大限度地缩短连接导线，有效抑制了寄生电容的产生，减少了由此引发的非线性误差^[12]，信号处理电路的抗干扰能力获得显著提高，传感器的性能更加稳定。

4 结 论

本文采用厚膜混合集成工艺将信号处理电路和厚膜陶瓷电容芯片一体化集成，替代 PCB 电路板，有效抑制寄生电容的产生，提高了传感器的线性和稳定性。所研制的厚膜电容式微位移传感器在纳米级微位移 (ΔS 分别为 100, 50, 20, 10, 5 和 2 nm 等) 标定实验中呈现出良好的线性和稳定性，且在多次连续的加载-卸载循环性能测试中表现出较低的迟滞现象和较好的重复性。微位移标定实验所得数据表明，一体化集成后的微位移传感器温度性能明显改善，寄生电容引起的非线性误差也显著减小，传感器的线性度和迟滞性都有所改善，分辨率也大大提高，0~1 000 nm 检测范围内位移分辨率优于 2 nm。

本文的传感器性能标定工作得到沈阳自动化所董再励研究员课题组的大力帮助，在此致以衷心的感谢！

参考文献：

[1] 王广怀, 张康行, 刘庆和. 应用于电液伺服油缸的磁敏电阻式位移传感器研究 [J]. 机床与液压, 2009, 37 (6): 89-91.

[2] YU X Y, ZHAO R L, LI X. Photoelectric angular displacement sensor and its calibration [C] // Proceedings of the 2nd international symposium on instrumentation science and technology. Jinan, China, 2002: 370-373.

[3] DURIC S, NAD L, BIBERDZIC B, et al. Planar inductive sensor for small displacement [C] // Proceedings of the 26th International conference on microelectronic. N \mathbb{S} , Serbia, 2008: 345-348.

[4] 王淑珍, 王生怀, 谢铁邦. 一种基于相位光栅干涉微位移传感器的研制 [J]. 仪表技术与传感器, 2009 (10): 7-9.

[5] HU X. N, WANG Q L, CUI C Y. A fiber optic sensor measurement system for a levitated sphere-shaped superconducting rotor [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2010, 20 (3): 892-895.

[6] YANG S M, HUANG C L. A hall sensor-based three dimensional displacement measurement system for miniature magnetically levitated rotor [J]. IEEE Sensors Journal, 2009, 9 (12): 1872-1828.

[7] KIM M, MOON W, YOON E, et al. A new capacitive displacement sensor with high accuracy and long-range [J]. Sensors and Actuators: A, 2006, 130/131: 135-141.

[8] 孙立宁, 晏祖根. 电容式微位移传感器设计及其应用研究 [J]. 传感器技术, 2005, 24 (10): 13-15.

[9] 唐力强, 李民强, 陈建群, 等. 基于厚膜技术的双电容陶瓷压力传感器 [J]. 仪表技术与传感器, 2006 (7): 3-5.

[10] 马以武, 虞学犬. 电容式压力传感器的厚膜集成化研究 [J]. 传感器技术, 2001 (11): 1-4.

[11] 熊剑平. 厚膜电容式微位移传感器及其信号处理方法研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2010.

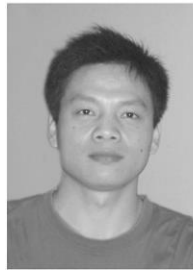
[12] 张早春, 马以武, 高理升. 厚膜电容微位移传感器的非线性误差分析 [J]. 仪表技术与传感器, 2009 (6): 8-9.

[13] 赵斌, 饶宝林. Al₂O₃/环氧树脂复合材料热导性能的研究 [J]. 塑料, 2009 (1): 62-64.



作者简介：

钱玉洁 (1987—)，女，安徽长丰人，硕士研究生，主要研究方向为微电子学与固体电子学；



高理升 (1978—)，男，安徽肥东人，博士，副研究员，硕士生导师，现主要从事敏感材料与厚膜传感技术研究。

下期部分目次预告

高压 GaAs 微太阳能电池制备工艺研究
 悬臂梁接触式 RF MEMS 串联开关工艺设计
 基于 GaAs PHEMT 的 Ku 波段宽带单片中功率放大器
 基于静电排斥力的大冲程 MEMS 变形镜
 淀积参数对 PECVD 氮化硅薄膜力学特性的影响

蝶形天线增强的 HEMT 室温太赫兹探测器
 ZnO 纳米棒与 Si(111) 和 Si(100) 衬底的外延关系
 分子印迹膜 SPR 传感器检测氯磺隆的方法研究
 基于 1×2 阵列压电悬臂梁的 AFM 并行扫描研究
 铁镍合金与纳米碳管复合物的制备及吸液性能