

文章编号 1004-924X(2007)04-0543-07

一种单稳态微电磁继电器的研究

刘本东¹,李德胜¹,杨晓波²

(1.北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院,北京 100022;

2.北京农业职业技术学院,北京 102208)

摘要:优化设计出一种微电磁继电器,介绍了其驱动原理,通过对微电磁继电器的电磁驱动力及活动衔铁的位移进行分析计算,设计了微电磁继电器的三维结构,以增大磁路效率,减小漏磁通,从而增加电磁驱动力。采用 MEMS 加工工艺,试制了该新型微电磁继电器的样件,其尺寸为 5 mm×5 mm×1 mm,它由上磁路、下磁路、平面励磁线圈、固定触点和活动衔铁等部分组成。微电磁继电器的平面励磁线圈电阻约 20 Ω,外加 5 V 电压时,微电磁继电器可实现吸合动作。吸合后,微电磁继电器的导通电阻为 14.5 Ω,继电器的响应时间为 1 ms。

关键词:微电磁继电器;微驱动器;MEMS

中图分类号:TM581.3 **文献标识码:**A

Research of a monostability micro electromagnetic relay

LIU Ben-dong¹, LI De-sheng¹, YANG Xiao-bo²

(1. *College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology ,
Beijing University of Technology , Beijing 100022,China;*

2. *Beijing Vocational College of Agriculture , Beijing 102208,China*)

Abstract: A new optimized structure of micro electromagnetic relay was introduced, and its working principle was presented. By analysis of the driving force and the displacement of the armature, a three-dimensional structure was designed to increase the efficiency of magnetic circuit. A prototype micro electromagnetic relay with dimension of 5 mm×5 mm×1 mm was fabricated based on the MEMS fabrication process. The micro relay consist of a magnetic circuit, an excitation planar coil, a fixed contact pad and a permalloy cantilever (armature). Experimental result shows that when the micro electromagnetic relay in the resistance of the excitation coil of 20 Ω works at 5 V, its contact resistance is 14.5 Ω and respond time is about 1 ms under the electromagnetic actuation.

Key words: electromagnetic micro relay; micro actuator; MEMS

1 引言

机械继电器相对固态继电器有一些无可比拟的优点,如较低的导通电阻、较高的开路电阻以及工作时产生热量少等。因此,小型机械继电器广泛地应用于通讯设备、测量设备、自动化设备和工业控制等领域。目前最新研制的小型机械继电器体积为 0.3 cm^3 , 已经达到了传统继电器制作工艺的极限,如线圈的缠绕、金属片的冲压以及塑料的注模等传统制造工艺的限制^[1]。近些年发展起来的微机电系统^[2,4] (MEMS) 技术为机械继电器的微型化研制提供一种全新手段^[5]。采用 MEMS 技术研制的微机械继电器按照工作原理通常分为静电驱动^[6-11] 型微继电器、热驱动^[12-14] 型微继电器和电磁驱动^[15-19] 型微继电器等种类。其中,静电驱动微继电器制作工艺较简单,原理上可制作出尺寸微小且功耗甚低的器件,但它需要数十甚至百伏的驱动电压,这与一般电子线路的电源不兼容,因而其应用受到了限制。热驱动型微继电器由于它的功耗大,开关速度低,因而研究的较少^[15]。微电磁继电器相对于静电驱动微继电器具有较低的驱动电压和较大的驱动力,而相对热驱动微继电器具有较快的响应速度^[20],因此,微电磁继电器被认为是具有良好前景的微继电器。本文在前期对微机械电磁继电器的研究基础之上,优化继电器的结构,改进加工工艺,制作出一种新型的继电器样件,并对样件进行了初步测试。

2 结构及工作原理

微电磁继电器的结构如图 1 所示,主要由平面励磁线圈、上磁路、下磁路、活动衔铁(悬臂梁)和固定电极等组成。其工作原理为:当励磁线圈通过电流时将产生磁通,它们大部分集中在主要由坡莫合金组成导磁的闭合磁路区域。闭合磁路由以下几部分组成,分别是上磁路、下磁路、活动衔铁以及活动衔铁与下磁路之间的间隙^[14]。当励磁线圈通过足够大的电流时,悬臂梁支撑的活动衔铁受到电磁力将向下弯曲,直至与下面的固定电极接触,从而实现活动衔铁与固定电极的导通,这时,继电器处于导通状态。当励磁线圈的电

流被断开时,悬臂梁依靠机械弹力恢复原来的形状,活动衔铁与固定电极分离,这时,微电磁继电器处于开路状态。

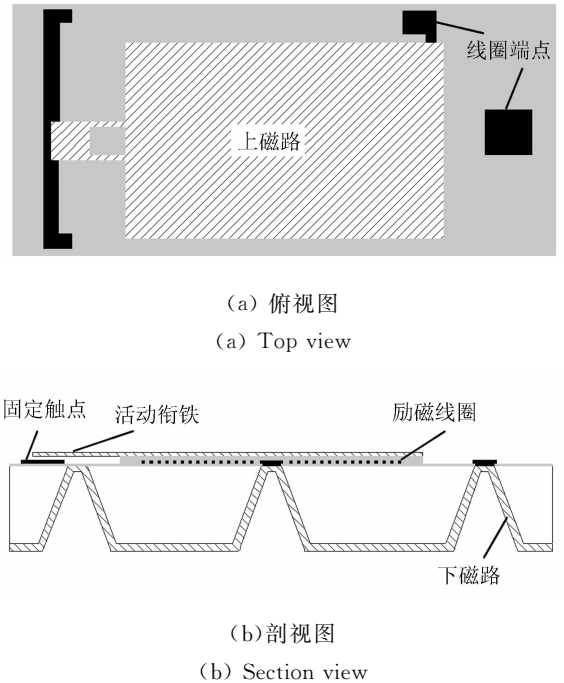


图 1 微电磁继电器结构示意图

Fig. 1 Schematic drawing of micro electromagnetic relay

2.1 电磁驱动力的理论计算

针对微电磁继电器的结构建立其等效磁路,如图 2 所示。

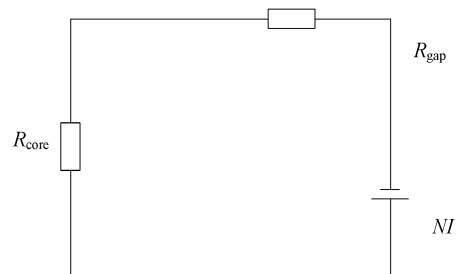


图 2 微电磁继电器等效磁路

Fig. 2 Schematic drawing of the equivalent circuit of micro electromagnetic relay

悬臂梁所受电磁的力大小由麦克斯韦方程式(1)得出,磁路的电阻可以由公式(2)计算,将式(2)代入式(1),可以计算出电磁继电器衔铁所受的电磁力^[12]。

$$|F_{\text{mag}}| = \frac{1}{2} \left(\frac{NI}{R} \right)^2 \frac{dR}{d}, \quad (1)$$

$$R = \frac{l_{\text{core}}}{\mu_{\text{core}} A_{\text{core}}} + \frac{l_{\text{gap}}}{\mu_{\text{gap}} A_{\text{gap}}}, \quad (2)$$

$$|F_{\text{mag}}| = \frac{1}{2\mu_0 A_{\text{gap}}} \left(\frac{NI}{R_{\text{core}} + R_{\text{gap}}} \right)^2, \quad (3)$$

这里, R 为磁阻, F_{mag} 为电磁力, l_{core} 为坡莫合金磁路长度, l_{gap} 为气隙长度, A_{core} 为坡莫合金磁路面积, A_{gap} 为气隙面积, N 为线圈匝数, I 为电流强度, μ 为磁导率, R_{core} 为坡莫合金磁路磁阻, R_{gap} 为气隙磁阻。

在不同的励磁电流下, 构成磁路的坡莫合金具有不同的磁导率, 而且与电流是非线性关系, 因此, 电磁驱动力与驱动电流也是非线性的关系。当微电磁继电器的励磁线圈为 20 匝, 励磁电流为 250 mA, 气隙面积为 0.25 mm², 气隙长度为 10 μm 时, 微电磁继电器的活动衔铁在不同磁导率 μ_r 条件下的电磁驱动力如图 3 所示。当磁导率为 5 000 时, 衔铁所受电磁力 > 1 mN。

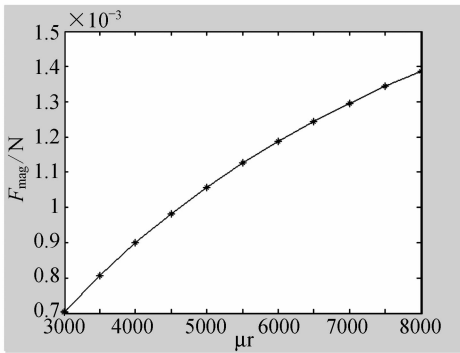


图 3 电磁驱动力与磁导率的关系

Fig. 3 Magnetic force vs permeability of micro relay

2.2 活动衔铁变形的简化分析

微机械电磁继电器的活动衔铁如图 4(a) 所示, 在活动衔铁的前端, 有很多小孔, 这些小孔用于在制作时释放悬臂梁。活动衔铁(悬臂梁)前段宽度较大, 是为了使微电磁继电器整个闭合磁路有较大的吸合力, 后段宽度较小是为了降低悬臂梁的弹性系数。计算悬臂梁受到电磁力作用而产生的位移, 将悬臂梁简化为图 4(b) 所示。先计算第一段 L_1 的变形挠度和最大扭转角, 然后计算 L_2 的变形挠度, 最后将三者引起的悬臂梁位移量叠加起来得到最大位移量公式(8)。

$$L_1 \text{ 的变形挠度: } x_1 = \frac{F_{\text{mag}} l_1^3}{3EI_1}, \quad (4)$$

$$L_1 \text{ 最大扭转角: } \theta = \frac{F_{\text{mag}} l_1^2}{2EI_1} + \frac{F_{\text{mag}} l_2 l_1}{2EI_1}, \quad (5)$$

由 L_1 的端面扭转角所引起的 L_2 段最大位移量为:

$$x_2 = \tan(\theta) l_2 = \tan\left(\frac{F_{\text{mag}} l_1^2}{2EI_1} + \frac{F_{\text{mag}} l_2 l_1}{2EI_1}\right) l_2, \quad (6)$$

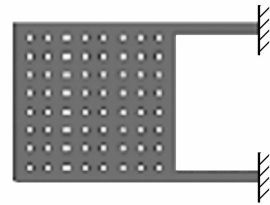
L_2 的变形挠度:

$$x_3 = \frac{F_{\text{mag}} l_2^3}{8EI_2}, \quad (7)$$

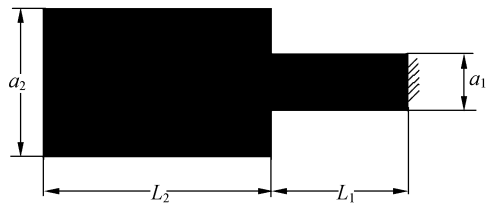
衔铁总位移量:

$$x = x_1 + x_2 + x_3 = \frac{F_{\text{mag}} l_1^3}{3EI_1} + \tan\left(\frac{F_{\text{mag}} l_1^2}{2EI_1} + \frac{F_{\text{mag}} l_2 l_1}{2EI_1}\right) l_2 + \frac{F_{\text{mag}} l_2^3}{8EI_2}, \quad (8)$$

这里, F_{mag} 为电磁力(均布于第二段悬臂梁), E 为悬臂梁的弹性模量, I_1 为第一段悬臂梁的惯性矩, I_2 为第二段悬臂梁的惯性矩, l_1 为第一段悬臂梁的长度, l_2 为第二段悬臂梁的长度。



(a) 活动衔铁版图
(a) Mask of armature



(b) 活动衔铁简化图
(b) Simplified model of armature

图 4 活动衔铁及其简化图

Fig. 4 Simplified model of the armature

对于 L_1 为 250 μm , L_2 为 500 μm , a_1 为 40 μm , a_2 为 250 μm , 厚度为 10 μm 的悬臂梁, 其位移与电磁驱动力的关系如图 5 所示。当衔铁受电磁力 0.2 mN 时, 其位移大于 20 μm 。

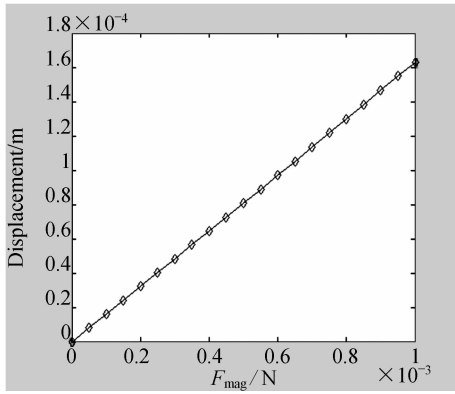


图 5 悬臂梁位移与电磁驱动力的关系

Fig. 5 Permalloy cantilever displacement vs magnetic force

3 制作工艺

微电磁继电器的制作过程中,除了采用基本的半导体表面微细加工工艺,如氧化、光刻、溅射以及等离子刻蚀工艺外,还采用了以铬作掩模的硅深刻蚀技术、光刻胶作模的电镀坡莫合金和电镀铜技术。微电磁继电器制作分成两部分,一部分是以单晶硅为基底的下磁路、励磁线圈和固定电极,另一部分是以玻璃为基底的上磁路和活动衔铁。

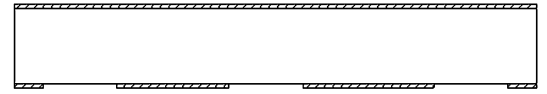
3.1 下磁路、励磁线圈和固定电极部分的制作

下磁路、励磁线圈和固定电极部分的制作流程如图 6 所示,采用表面晶向为(100)的单晶硅片作基底,(a)首先在氧化后的硅片表面双面沉积一层铬。(b)采用光刻和腐蚀的方法在铬和二氧化硅层面上刻出要腐蚀硅通孔的掩模图形。(c)利用硅的各向异性腐蚀特性,用质量比为 33% KOH 溶液腐蚀硅片上的通孔。(d)用盐酸腐蚀多余的铬保护层,在硅片的正面贴上薄玻璃,然后在背面溅射大约 30 nm 厚的铬、铜层,利用曝光和显影得到背面下磁路的电镀图形,接着电镀下磁路。电镀磁路的成分为坡莫合金,电镀坡莫合金材料的厚度大约为 $30 \mu\text{m} \sim 50 \mu\text{m}$;(e)去除薄玻璃,在没有电镀坡莫合金的正面旋涂聚酰亚胺,并亚胺化。然后溅射铝做掩模,把聚酰亚胺薄膜刻出线圈的中心孔,之后再腐蚀掉铝。(f)溅射大约 30 nm 厚的铬、铜层,然后用光刻胶 BN303 做电镀的模子,电镀铜线圈和固定电极,之后用 RIE 去除光刻胶,腐蚀掉铬、铜种子层。



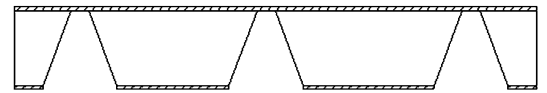
(a) 硅片氧化、双面沉积铬

(a) Sputter chrome on both sides of oxide wafer



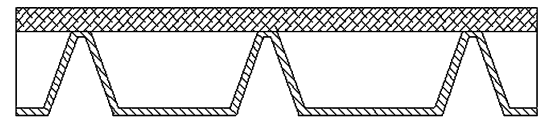
(b) 在铬和二氧化硅上刻出通孔图形

(b) Etch graphics in the chrome and silicon dioxide layer



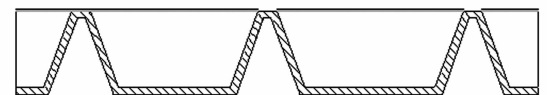
(c) 湿法腐蚀硅通孔

(c) Etch via through wafer



(d) 正面粘贴薄玻璃后,在背面溅射铬、铜并电镀坡莫合金

(d) Stick glass, sputter seed layer and plate permalloy



(e) 旋涂聚酰亚胺,并刻蚀出线圈引线点

(e) Spin polyimide and etch the hole



(f) 电镀铜线圈和固定电极

(f) Electroplate coil and fixed contact

图 6 线圈和下磁路制作流程示意图

Fig. 6 Fabrication process of coil and lower magnetic circuit

3.2 上磁路和活动衔铁的制作

上磁路和活动衔铁的制作过程如图 7 所示:采用薄玻璃作为基底,(a)在薄玻璃上旋涂聚酰亚胺并亚胺化。(b)在聚酰亚胺上溅射一层铝,利

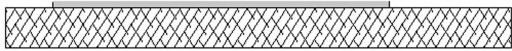
用光刻把铝刻成上磁路固着点的图形,用RIE刻蚀掉上磁路固着点之外的聚酰亚胺,之后腐蚀掉铝掩模。(c)旋涂光刻胶Bp212并光刻成活动衔铁下的牺牲层图形。(d)溅射大约30 nm厚的铬、铜层,旋涂光刻胶Bp212光刻成上磁路和活动衔铁的电镀模子,电镀坡莫合金。(e)用RIE刻蚀掉光刻胶做的电镀模子,腐蚀铬、铜种子层,用丙酮溶解牺牲层,释放活动衔铁。这里聚酰亚胺薄膜的作用是使上磁路和活动衔铁在同一平面上,因此,旋涂聚酰亚胺的厚度尽量与之后所旋涂牺牲层的厚度一致。

将制作完成的上磁路和活动衔铁与已做了下磁路、励磁线圈、固定电极(如图8所示)的另一半进行粘合,粘合后的微电磁继电器如图9所示。



(a) 在玻璃基底上旋涂聚酰亚胺并亚胺化

(a) Spin polyimide and solidify



(b) 把聚酰亚胺薄膜光刻成上磁路固着点的图形

(b) Pattern the polyimide layer



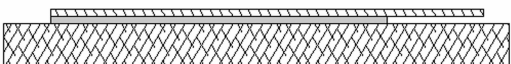
(c) 旋涂 Bp212 并光刻成牺牲层图案

(c) Spin photoresist and pattern as sacrificial layer



(d) 溅射铬、铜并电镀上磁路和活动衔铁

(d) Sputter seed layer and electroplate the armature



(e) 溶解牺牲层、释放活动衔铁

(e) Dissolve the sacrificial layer

图7 活动衔铁制作流程示意图

Fig.7 Fabrication process of the armature

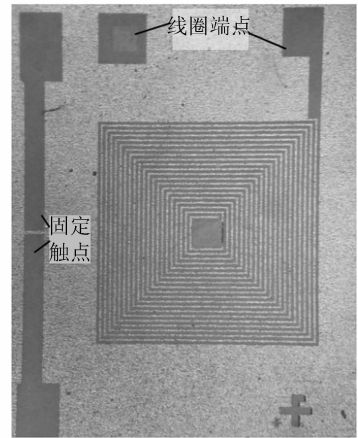


图8 微电磁继电器励磁线圈放大照片

Fig. 8 Photomicrograph of excitation coil of micro electromagnetic relay

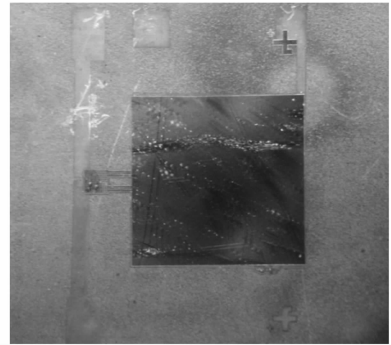


图9 微电磁继电器放大图

Fig. 9 Photomicrograph of micro electromagnetic relay

4 初步测试结果

微电磁继电器的励磁线圈(平面方形螺旋线圈)匝数为20匝,线宽 $40\ \mu\text{m}$,间距 $40\ \mu\text{m}$,厚度约为 $10\ \mu\text{m}$ 。采用YY2811B LCR自动测量仪对线圈在室温下进行测量,线圈电阻 $20\ \Omega$,线圈的电感为 $4.5\ \mu\text{H}$ 。微电磁继电器的活动衔铁 L_1 为 $250\ \mu\text{m}$, L_2 为 $500\ \mu\text{m}$, a_1 为 $40\ \mu\text{m}$, a_2 为 $250\ \mu\text{m}$,厚度约为 $10\ \mu\text{m}$ 。粘合后的微电磁继电器的样品能在5 V驱动电压下工作,继电器的导通电阻为 $14.5\ \Omega$,该值偏大,触点材料有待进一步改进。另外,实验中采用Tektronix TD3032B示波器进行测量,微电磁继电器的响应延迟时间为1 ms。图10为示波器采集的微电磁继电器响应延迟时间图。

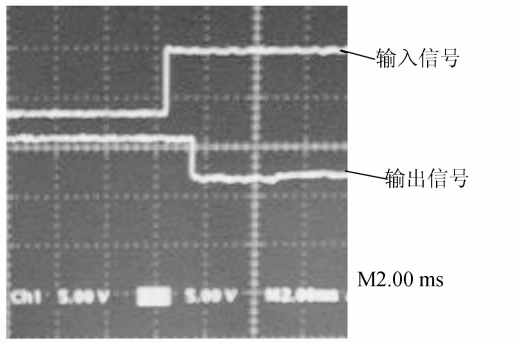


图 10 微电磁继电器的响应时间

Fig. 10 Respond time of micro electromagnetic relay

这种方案的微电磁继电器具有三维结构,制作工艺的难度较大。该继电器有如下特点:(1)采用了单晶硅的深刻蚀工艺;(2)下磁路除了当作磁路的一部分,另外还与励磁线圈的中心点连在一起,充当了励磁线圈的一个引线端点,这种设计方

案在不影响继电器功能的情况下,减少了部件,减小了微电磁继电器的体积;(3)采用平面螺线式励磁线圈,便于在制作过程中使用半导体表面加工技术。

5 结 论

本文在提出了一种微电磁继电器优化的三维结构设计方案,经过对该方案制作工艺多次试验,制作出了样件。研制的微电磁继电器样件能在 5 V 驱动电压下工作,继电器的导通电阻为 14.5 Ω ,响应延迟时间为 1 ms。该继电器具有较快的响应速度和较低的驱动电压,但是该继电器的触点部分由坡莫合金和铜组成,所以导通电阻较高。此外,初步研制的继电器性能还不稳定。今后的研究要对微电磁继电器的制作工艺和触点材料等进一步优化。

参考文献:

- [1] SCHLAAK H F, Potentials and limits of micro-electromechanical systems for relays and switches [C]. *21st International Conference on Electrical Contacts*, 2002;19-30.
- [2] 周兆英,叶雄英,崔天宏,等.微米纳米技术及微型机电系统[J]. *光学精密工程*, 1998,6(1):2-7.
ZHOU ZH Y, YE X Y, CUI T H, *et al.*. Microtechnology/nanotechnology and MEMS[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1998,6(1):2-7. (in Chinese)
- [3] 尤政,张高飞,林杨,等. MEMS 固体化学推进器设计与建模研究[J]. *光学精密工程*, 2006,13(2):117-119.
YOU ZH, ZHANG G F, LIN Y, *et al.*. Design and modeling of MEMS-based solid propellant propulsion[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,13(2):117-119. (in Chinese)
- [4] 刘泽文,韦嘉,王昱,等. 两侧下拉电极 MEMS 压控电容的分析和优化[J]. *光学精密工程*, 2005,13(2):134-136.
LIU Z W, WEI J, WANG Y, *et al.*. Analysis and optimization of a side pull-down electrodes controlled MEMS varactor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(2):134-136. (in Chinese)
- [5] 张宇峰,张鹏飞,李德胜,等.基于 MEMS 技术的微型电磁继电器的研究[J]. *仪器仪表学报*, 2001,6:333-334.
ZHANG Y F, ZHANG P F, LI D SH, *et al.*. A novel micro electromagnetic relay based on MEMS technology [J]. *Chin. J. Sci. Instrum.*, 2001,6:333-334. (in Chinese)
- [6] YAMAGU CH, KAWAMURA M, MINAMI S, *et al.*. Distributed electrostatic micro actuator [C]. *Proceedings of Investigation on Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Systems*, 1993:18 - 23.
- [7] GRITILLAT M A. Electrostatic polysilicon microrelays integrated with MOSFETS[C]. *Proc. IEEE MEMS Workshop 94*, Japan, 1994:97-101.
- [8] ZAVRACKY P M, MCGRUER N E, MORRISON R H, *et al.*. Microswitches and microrelays with a view toward microwave applications[J]. *RF Appl. MEMS Technol.*, 1998,(9): 338-347.
- [9] MILANOVIC V, MAHARBIZ M, PISTER K S J. Batch transfer integration of RF microrelays[J]. *IEEE Microwave. Guided Wave Lett.*, 2000,10(8):313-316.
- [10] LEE H SH, LEUNG C H, SHI J, *et al.*. Integrated microrelays: concept and initial results[J]. *J. Microelectromech. Sys.*, 2002:147-154.
- [11] THIELICKE E, OBERMEIER E. A fast switching surface micromachined electrostatic relay [C]. *12th Interna-*

- tional Conference on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems, Boston, 2003:899-903.*
- [12] SUN X Q, FARMER K R, CARR W N. A bistable micro relay based on two-segment multimorph cantilever actuators [C]. *The Eleventh Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, 1998:871-876.
- [13] WANG Y, LIZ ZH H, MCCORMICK D T, *et al.*. Low-voltage lateral-contact microrelays for RF applications [C]. *The Fifteenth IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, 2002:645-648.
- [14] QIU J, LANG J H, SLOCUM A H, *et al.*. A bulk-micromachined bistable relay with u-shaped thermal actuators [J]. *J. Microelectromech. Syst.*, 2005:1099-1111.
- [15] WRIGHT J A, TAI Y C, CHANG S C. A large-force, fully-integrated MEMS magnetic actuator[C]. *1997 International Conference on Solid-state Sensors and Actuators*, 1997: 793-796.
- [16] ROGGE B, SCHULZ J, MOHR J, *et al.*. Fully batch fabricated magnetic microactuators using a two layer LIGA process[C]. *The 8th International Conference on Solid-state Sensors and Actuators, Sweden*, 1995:320-324.
- [17] TAYLOR W P, MARK G A. Integrated magnetic microrelays; normally open, normally closed, and multi-pole devices[C]. *1997 International Conference on Solid-state Sensors and Actuators, Chicago*, 1997:1149-1152.
- [18] TILMANS H A C, FULLIN E, ZIAD H, *et al.*. A fully-packaged electromagnetic microrelay[C]. *MEMS99*, 1999:25-30.
- [19] RUAN M CH, SHEN J, WHEELER C B. Latching micromagnetic relays [J]. *J. Microelectromech. Syst.*, 2001:511-518.
- [20] 格雷戈里 T. A. 科瓦奇. 微传感器与执行器全书[M]. 北京:科学出版社, 2003.
KOVACS G T. *Micromachined Transducers Sourcebook*[M]. Beijing: Science Publication, 2003. (in Chinese)

作者简介:刘本东(1976—),男,山东菏泽人,博士研究生,研究方向为 MEMS 器件的设计和制作工艺的研究。E-mail: heshan@emails.bjut.edu.cn

李德胜(1962—),男,陕西大荔人,北京工业大学教授,博士生导师,主要从事 MEMS、自动化测控以及机器人方面的理论和应用技术研究。E-mail: dsl@bjut.edu.cn