

一种集成型双稳态微电磁继电器工艺 及动态性能的研究

孔令飞,戴旭涵,苗晓丹, 桂甫,赵小林

(上海交通大学微米/纳米加工技术国家重点实验室, 薄膜与微细技术教育部重点实验室, 上海 200240)

[摘要] 介绍了一种集成型双稳态微电磁继电器, 利用金属基表面微加工技术和体微加工技术成功完成了弹簧和起气隙作用的 SU-8 垫片的集成制造. 用 Ansys 和 Matlab 软件对其进行初步的研究设计仿真, 证明了设计的可行性. 并研究了该继电器的双稳态性能, 分析了该微电磁继电器的动态特性, 探讨了触点间产生碰撞的原因以及消除抖动的方法, 为实现下一代体积更小、损耗更低、响应时间更短的继电器打下了良好的基础.

[关键词] 微机电系统, 电磁继电器, 碰撞, 动态测试

[中图分类号] TP212 [文献标识码] A [文章编号] 1001-4616(2010)03-0040-05

Fabrication Technology and Dynamic Characteristic of a New Type MEMS Bistable Electromagnetic Relay

Kong Lingfei, Dai Xuhan, Miao Xiaodan, Ding Guifu, Zhao Xiaolin

(National Key Laboratory of Nano/Micro Fabrication Technology, Key Laboratory for Thin Film and Micro Fabrication of
Education Ministry, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract A new type MEMS bistable electromagnetic relay is presented. The bulk silicon micromachining and metal based surface micromachining technology is used to fabricate this actuator. The parameters of the device are optimized by Ansys and Matlab software. The feasibility of the bistable characteristic is also studied. According to the characteristics of the relay's mechanical system, the relay's collision time was analyzed, and theory and test results were discussed. It is the foundation of the next generation of micro relay which has the property of smaller size, lower depletion and shorter response time.

Key words MEMS, electromagnetic relay, collision, dynamic test

基于微机械系统 (MEMS) 技术研制的微电磁继电器具有尺寸小、质量小、功耗低的特点, 同时它不仅克服了固态继电器转换深度低, 载流能力差的特点, 而且保留了传统电磁继电器绝缘阻抗大、触点接触电阻小、价格低等优点. 它广泛应用于通信、仪器仪表、自动控制、航空航天等多种领域, 具有非常广阔的前景.

MEMS 微型继电器采用微机械加工工艺, 从工作原理分主要有静电型、电磁型、热驱动型等, 其中静电型是最早出现、最成熟和市场化最早的. 它的制备工艺简单, 功耗小, 开关速度快, 缺点是驱动电压高 (达 30~100 V), 这严重限制它的广泛应用. 电磁型产生的电磁力大、驱动电压小, 因此应用范围广, 目前最大的困境在于结构复杂, 工艺实现困难和材料选择范围小. 而热驱动型工作频率低、功耗大, 因此应用场合也受限制.

典型电磁驱动继电器的例子如 E. Fullin 等人于 1998 年研制的双层驱动线圈继电器^[1]; 又如 2001 年 MeirhunRuan 等人研制的双稳态微电磁继电器^[2]. 国内学者李德胜等人也作了这方面的研究^[3].

本文结合微机械加工工艺与电镀工艺, 研制出了一种基于 MEMS 技术的集成型双稳态微电磁继电器.

收稿日期: 2009-11-06

基金项目: 国家自然科学基金 (50405013)、国家“863”计划资助项目 (2006AA04Z360).

通讯联系人: 孔令飞, 硕士研究生, 研究方向: MEMS 电磁器件的设计与制造. E-mail: skyboykl@126.com

器, 并对其动态响应特性进行了研究.

1 基本结构及工作原理

1.1 基本结构

如图 1 所示为该集成型微电磁继电器的内部基本结构, 该图为半剖视图.

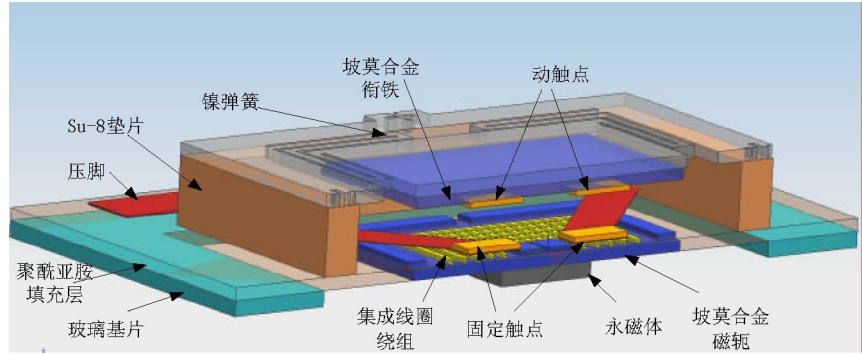


图 1 微电磁继电器结构图

Fig.1 Structural diagram of micro-electromagnetic actuator

该结构分为上下两部分:

1) 上层: 上层由镍弹簧、衔铁、动触点、SU8垫片构成. 镍弹簧下面镀了一层坡莫合金衔铁, 衔铁下面镀了动触点, 在镍弹簧四周固定一层 SU8胶作为支撑来实现弹簧和气隙的集成. 用 SU8垫片的厚度来控制气隙的大小.

2) 下层: 下层由平面线圈、定触点、铁芯、坡莫合金衬底、玻璃基片、聚酰亚胺填充层和永磁体构成.

1.2 工作原理

当平面线圈通电后, 平面线圈在电流的作用下产生磁场^[4], 该磁场在衔铁、坡莫合金衬底、气隙、中央铁芯、边缘铁芯之间形成磁路. 磁路对上层衔铁产生磁力驱动衔铁下降, 而衔铁镀在弹簧上的, 故弹簧也随之运动, 因此衔铁在下降过程中受弹簧弹力和平面线圈产生的磁力的共同作用. 当衔铁下降到底部位置时, 动触点和静触点接触并吸合在一起, 电路实现导通.

平面线圈输入电流方向的改变会导致衔铁极化方向改变, 使继电器的磁力方向发生变化, 从而引起继电器工作状态的改变. 该继电器闭合或打开可以通过控制电流方向来实现, 因此该继电器“开关”功能得以实现.

由于在该电磁继电器平面线圈底部固定一个永磁体, 当气隙较小时, 永磁体的磁力大于吸合状态下悬臂梁内部的弹性回复力, 因此, 无需在微驱动线圈中通电流, 仅靠永磁体的磁力就可以使驱动器保持在吸合状态. 通过永磁体的磁力来保证触点处于闭合状态是实现该电磁继电器“双稳态特性”的关键.

用 Ansys 仿真模拟磁场强度和磁通量分布, 蓝色体为空气腔, 由图 2 和图 3 可以看出通电平面线圈产生的磁场强度分布为中间较大, 两边较小, 磁通量分布也是如此.

2 工艺流程

在制备本文所述的集成型微电磁继电器过程中, 采用了基本的微加工工艺, 如溅射、光刻、电镀、研磨、刻蚀等.

我们在制作该弹簧的过程中采用了 lift-off 工艺方法以实现气隙和弹簧的集成, 其中气隙由 SU-8胶制成, 起固定支撑作用的 SU-8垫片, 用于产生工作气隙, 即气隙的厚度由 SU-8胶的胶厚决定. 这个继电器的构造可分为 2 个部分: 即上层的弹簧和气隙, 下层的线圈. 由于 SU-8胶与金属的结合力比较差, 因此用 SU-8作为垫片产生工作气隙就必须解决两者的结合问题.

在这里我们通过在金属表面先镀一层镍桩的方法来处理, 效果很好, 镀完一层镍桩后再在金属表面用 SU-8胶的话 SU-8就能很好的固定在金属上, 不容易脱落. SU-8胶和金属的结合能力得到巩固和加强.

镍弹簧的加工是在玻璃片完成的, 采用电镀等工艺完成弹性平台的制作, 并通过湿法刻蚀技术来释放

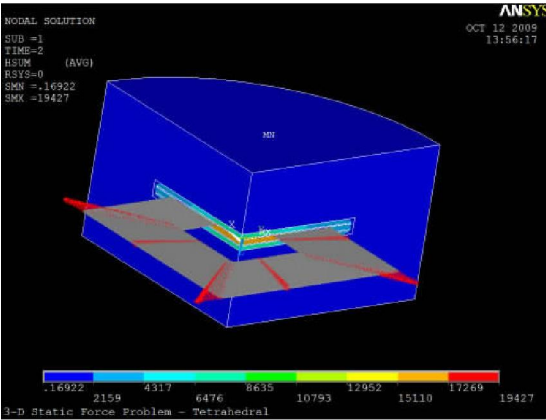


图 2 磁场强度分布

Fig.2 Magnetic field intensity distribution

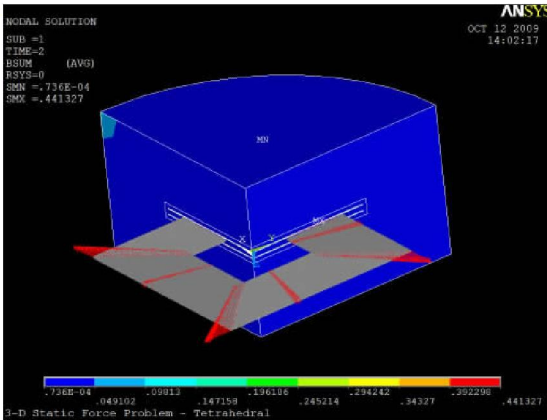


图 3 磁通量分布

Fig.3 Magnetic flux distribution

悬臂梁.

Lift-off集成加工工艺流程如下:

- 1) 对 1 mm 厚玻璃片待溅射面进行清洗并烘干.
- 2) 在玻璃片溅射面溅射 Cr/Cu 种子层并用正胶 20 μm.
- 3) 光刻图形化开出镍弹簧窗口、电镀镍弹簧.
- 4) 甩正胶并光刻图形化开出铁镍片窗口、电镀铁镍片.
- 5) 甩正胶并光刻图形化开出触点窗口、电镀铜触点, 再电镀一层镍和金防止其被氧化.
- 6) 甩正胶并光刻图形化开出镍桩窗口、电镀镍桩, 以防 SU-8 胶与金属表面脱落.
- 7) 用丙酮去胶再用湿法去 Cu/Cr 种子层.
- 8) 180℃烘 4 h 后用 SU 8 胶 150 μm.
- 9) 光刻图形化开出 SU-8 垫片图形窗口作为支撑以实现气隙和弹簧的集成.
- 10) 后处理, 包括磨片、切片、腐蚀、清洗以实现集成在一起的弹簧和 SU-8 垫片 (即气隙) 的释放.

其中在镀触点的过程中我们刻意把触点做大并分布在铁镍片的两边, 这样做可以提高动静触点吸合时的稳定性, 触点闭合性能好可以保证电路优良的通断切换性能.

工艺实现后可以做出需要的弹簧和气隙的集成器件. 其中弹簧的尺寸为 3* 3 mm, 厚度为 35 μm. 气隙的厚度为 150 μm.

器件做好后我们用 Matlab 来仿真平面线圈产生的磁力与驱动电流以及气隙之间的关系, 发现试验数据和仿真结果接近, 该继电器静态性能得到很好地验证. 用 Matlab 仿真平面线圈产生的磁力与电流以及气隙的关系见图 4 图 5

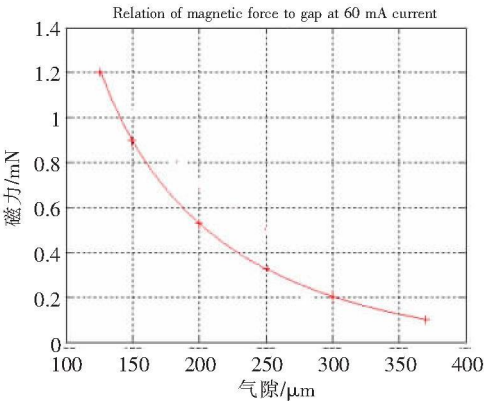


图 4 磁力与气隙的关系曲线

Fig.4 The relationship curve of magnetic force and air gap

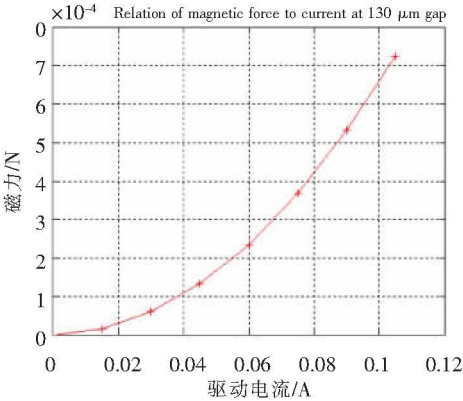


图 5 磁力与驱动电流的关系曲线

Fig.5 The relationship curve of magnetic force and drive current

3 动态性能测试

本文介绍的微电磁继电器属于脉冲触发型, 我们搭建的测量该微电磁驱动器的动态响应特性的简易平台框见图 6

动态特性测试原理是信号发生器发出电压驱动脉冲经过换向开关到达微电磁驱动器的激励线圈, 该驱动电压使平面线圈产生磁场驱动衔铁运动. 通过换向开关来不断产生正、负脉冲激励信号来实现磁力方向的改变以保证该微电磁继电器通断性能的顺利切换. 微电磁驱动器输出端接直流电源用来作为参考信号, 通过观察示波器即可观察该驱动器的动态响应特性.

器件工作原理是给一个正向脉冲即正向通电后, 器件在平面线圈产生的磁力作用下闭合, 脉冲结束后由于永磁体磁力的作用使微继电器保持闭合状态. 再给一个反向脉冲即反向通电后, 器件所受磁力方向相反从而克服弹力作用又使其处于断开状态, 脉冲结束后器件处于初始平衡状态, 这样就实现了该继电器的双稳态特性.

器件的动态响应过程如图 7 图 8 所示, 我们用的驱动电压为 $\pm 5\text{ V}$, 由图可以看出当继电器处于闭合状态时, 由于触点导通, 示波器上反映为高电平, 当继电器处于释放状态时, 触点断开, 示波器上反映为低电平.

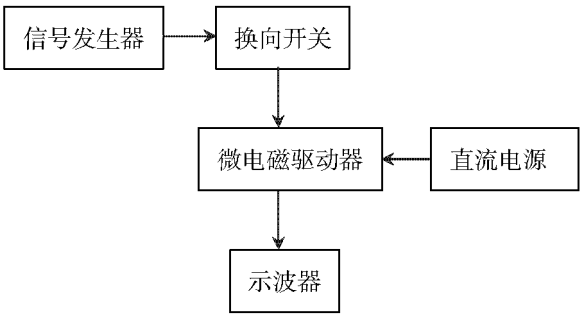


图 6 动态性能测试平台示意图
Fig.6 Schematic diagram of the dynamic performance test

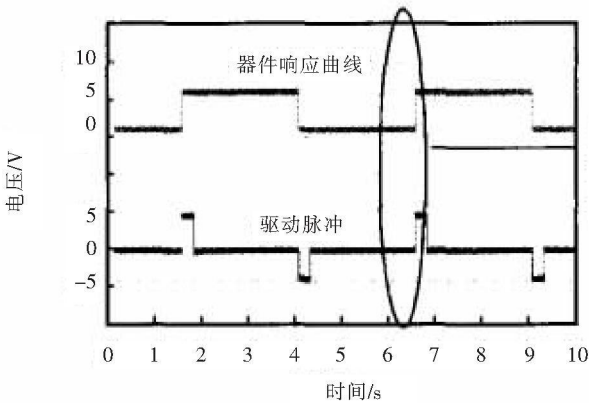


图 7 器件响应过程
Fig.7 Device response process

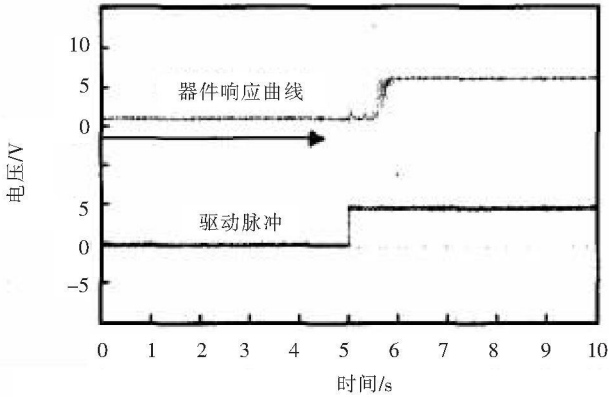


图 8 器件响应过程放大
Fig.8 Enlargement of the response process

上图画得更清晰些如图 9 所示. 由图我们可以发现当继电器衔铁下降后并不是马上保持导通状态, 而是发生了二、三次碰撞, 这种现象产生的原因是因为弹簧下降到最低点时速度不是零, 因此弹簧就有一定的动能, 在发生碰撞^[5]后能量损失了一部分, 但是还有动能因此弹簧会再次弹起, 这样连续碰撞几次后当弹簧能量损失为 0 时动静触点才吸合保持导通状态, 示波器显示为高电平. 因此如何减少碰撞次数为该电磁驱动器实现其快速响应性能的关键.

图 10 为该微电磁继电器的双稳态曲线. 由图可知红色直线为弹簧的弹力和气隙的关系曲线, 黑色曲线为磁力和气隙的关系曲线. 磁力为平

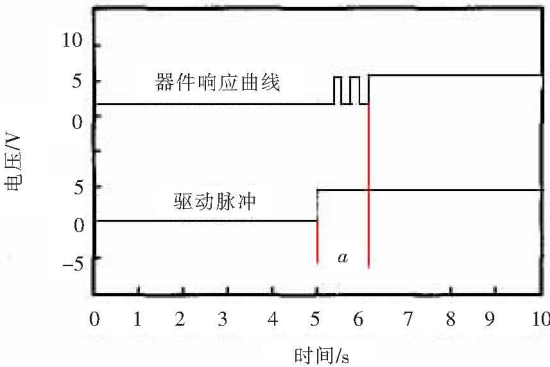


图 9 动态响应图
Fig.9 Dynamic response figure

面线圈产生的磁力和永磁体产生的磁力的总和. 2 条线的交点即为稳定点, 因为在交点时满足弹力 = 磁力, 即合力为零. 我们首先确定双稳态的 2 个位置, 第一个位置很明显为初始平衡态, 第二个位置则是动触点下降的最低位置, 此时动静触点刚好吸合导通.

只要在这两个稳态点保证速度也为零则弹簧处于平衡状态. 很明显第一个交点时弹簧处于静止状态速度为零, 受力也为零, 触点处于断开, 示波器显示低电平. 那第二个交点即弹簧落在最低点的位置时如果能保证速度为零即可实现消除抖动, 此时动静触点刚好吸合导通不会再弹起发生振动, 动态响应特性得到提高.

避免动触点再次弹起的方法: 在这里我们用做功的角度去考虑, 只要保证在动触点在最低点时弹力做功和磁力做功的总和为 Q 则此时动触点的速度为 Q 又由于弹力做功只和气隙参数有关不能改变, 能改变的只有平面线圈通电产生的磁力做功. 该磁力和驱动电压脉冲的大小以及脉宽有关系. 因此我们可以通过控制驱动电压脉冲的频率和占空比来保证在最低点时刚好弹簧和平面线圈对衔铁做功为零. (或者通过运放来调整脉冲的幅值)

调整后的动态相应如下:

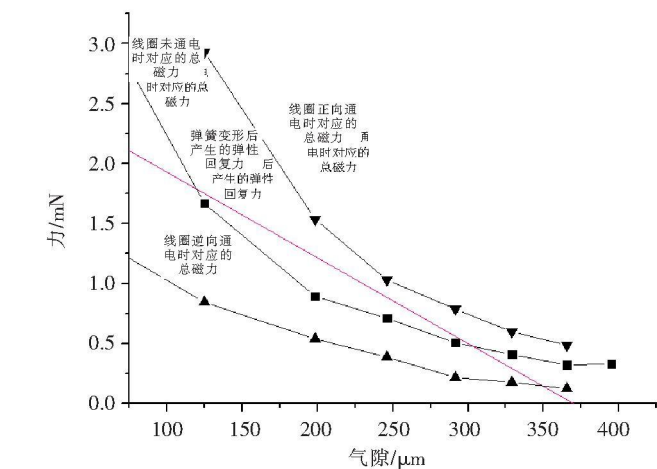


图 10 双稳态曲线
Fig.10 Bistable curve

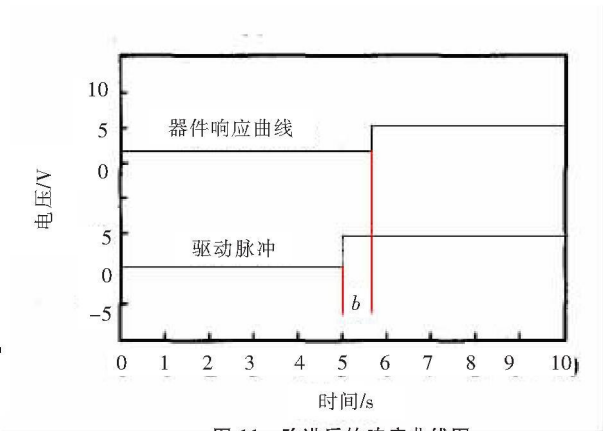


图 11 改进后的响应曲线图
Fig.11 Improved response curve

由图可以看出器件响应曲线的变化, 图 11 和图 9 对比可知 $b < a$, 即动态响应时间变小, 动态性能得到提高. 我们经过试验验证本来的动态相应时间为 10 ms 左右, 现在可以使响应时间进一步缩短, 为 6 ms 左右, 短的响应时间决定了该微电磁继电器优良的动态性能.

4 结论

本文介绍了一种集成型双稳态微电磁继电器, 利用金属基表面微加工技术和体微加工技术成功完成了弹簧和起气隙作用的 SU-8 垫片的集成制造. 用 Ansys 和 Matlab 软件对其进行初步的研究设计仿真, 证明了设计的可行性. 并研究了该继电器的双稳态性能, 分析了该微电磁继电器的动态特性, 探讨了触点间产生碰撞的原因以及如何消除的方法, 为下一阶段如何完全实现消除抖动提出了合理的建议和思路, 实用性较强. 为实现下一代体积更小, 损耗更低, 响应时间更短的继电器打下了良好的基础.

[参考文献]

[1] Tihans H A C, Fullin E, Ziad H, et al A fully-packaged electromagneticro relay[C] / Micro ElectroMechanical Systems IEEE Twelfth IEEE International Conference, 1999: 25-30

[2] Ruan M, Shen J Wheeler C B Latching micro electromagnetic relays[J]. Sensors and Actuators A, 2001(91): 346-350

[3] Li Deshen, Zhang Yufeng Wang Donghong Fabrication and simulation of a micro electromagnetic relay[J]. Microfabrication Technology, 2002(3): 60-64

[4] 杨昊宇, 赵小林, 戴旭涵, 等. 平面线圈型 MEMS 微电磁驱动器的理论分析与实验研究 [J]. 传感技术学报, 2006(5): 1 920-1 923

[5] 金栋平, 胡海岩. 碰撞振动与控制[M]. 北京: 科学出版社, 2005

[责任编辑: 顾晓天]