

文章编号 1004-924X(2007)06-0866-07

# 基于 MEMS 工艺的高能量密度微电磁驱动器

张涛<sup>1,2</sup>, 吴一辉<sup>1</sup>, 黎海文<sup>1</sup>, 刘波<sup>1,2</sup>, 张平<sup>1</sup>, 王淑荣<sup>1</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室,  
吉林长春 130033; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:**提出了制作高能量密度电磁驱动器的工艺方法。利用微机械(MEMS)工艺在硅片上得到多匝平面线圈和磁芯的掩模图形,接着沉积种子层铜(Cu),然后对种子层进行整体Cu的电铸;当种子层生长到20 μm左右时,剥离硅片表面的镀层并用光刻胶保护磁芯位置的镀层;再用沿线电铸的方法对线圈进行电铸;最后保护制作好的线圈镀层,电铸NiFe合金材料。在10 mm×10 mm×0.38 mm的硅片上,制作出线圈匝数22×2(铜线截面积60 μm×60 μm、总长度达1 164 mm)、NiFe合金磁芯尺寸为3 mm×3 mm×0.2 mm的高能量密度微型电磁驱动器。把这种微型驱动器应用于无阀液泵做驱动实验:通入0.3 A的正弦电流时,微驱动器产生约50 mN的电磁力。实验结果表明:这种型微电磁驱动器在相同的输入功率下,比同类其他微电磁驱动器具有更高的能量密度,能产生更大的电磁驱动力。

**关键词:**MEMS;微型电磁驱动器;高能量密度;多匝双层平面微线圈;厚NiFe合金镀层

**中图分类号:**TM57;TP271.4 **文献标识码:**A

## Micro electromagnetic actuator with high energy density based on MEMS technology

ZHANG Tao<sup>1,2</sup>, WU Yi-hui<sup>1</sup>, LI Hai-wen<sup>1</sup>, LIU Bo<sup>1,2</sup>, ZHANG Ping<sup>1</sup>, WANG Shu-rong<sup>1</sup>

(1. *National Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*  
2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

**Abstract:** A fabricating technology for high energy density micro electromagnetic actuator based on Micro Electron Mechanics System(MEMS) is introduced. The main steps on MEMS technology are as follows: Firstly, etching plating trenches of multi-turn double planar microcoils and permalloy (NiFe) core into silicon wafers prior to electrode position, a seed layer of copper must be deposited on the wafer; secondly, when the thick of seed layer reaches to about 20 μm by electroplating, peeling the surface plating on the wafer and coating the core by photoresist, electroplating the coil in the groove; thirdly, when the coil groove is filled with copper, coating the coils and electroplating permally core. In the 10 mm×10 mm×0.38 mm square silicon wafer, a high energy density electromagnetic microactuator, composed of multi-turn double planar microcoils (22×2 turns, section of copper wire is 60 μm×60 μm, length is 1 164 mm) and permalloy core (3 mm×3 mm×0.2 mm), is fabricated. Finally, the estimated force produced by the integrated electromagnetic microactuator is around 50 mN at a sinusoidal

收稿日期:2006-12-10;修订日期:2007-01-22.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60574089)

current amplitude of 0.3 A, which is fabricated and tested on the valveless micropump. Experiment results show the microactuator is efficient in producing large magnetic force and flexible in application.

**Key words:** MEMS; micro electromagnetic actuator; high energy density; multi-turn double planar microcoils; thick permalloy plating

## 1 引言

微型电磁驱动器是一种重要的微执行器,相对于其他驱动方式的驱动器,具有低驱动电压、高频率、易远程控制、响应速度快等优点,已经越来越广泛地运用到各种微系统中,如微型阀<sup>[1]</sup>、微型泵<sup>[2]</sup>、微型继电器<sup>[3-4]</sup>、微型马达<sup>[5]</sup>、微混合器<sup>[6]</sup>、微电机<sup>[7-8]</sup>等。为了满足电磁驱动微泵对大驱动力的需求,需要制作高能量密度的电磁驱动器来提高电磁驱动力,而提高电磁驱动器能量密度的有效方法是增加线圈匝数和增加磁芯。

采用微机械工艺(MEMS)制作电磁驱动器的平面微型线圈相对容易,但是要制作多匝线圈就很困难。随着线圈匝数的增多,长度的增长,线圈电铸成为难点。因为在线圈电铸时,线圈材料是沿电流前进的方向生长,若线圈太长,电阻过大,线圈中间部分还来不及生长就被电铸液浸泡脱落,导致生长失败。在国内外的研究中,制作的微型平面线圈匝数较少,如 Yao Fu<sup>[9]</sup>制作的单层线圈共 20 匝,长度 72.2 mm,厚 20  $\mu\text{m}$ ; C. H. Ko<sup>[10]</sup>制作的双层平面线圈,共 34 匝,每层线圈单独电铸,单层长度为 250 mm,厚 12  $\mu\text{m}$ ; J. Sutanto<sup>[11]</sup>研制金质线圈为 8 匝,长度仅为 5 mm,厚 12  $\mu\text{m}$ ; 苏宇锋等<sup>[12]</sup>研制的铜质线圈为 8 匝,长度为 19.1 mm,厚 15  $\mu\text{m}$ ; 郭占社等<sup>[13]</sup>制作的平面定子双层线圈,单元线圈  $6 \times 2$  匝,长度为 186.9 mm,厚 60  $\mu\text{m}$ 。文献[10]和文献[13]的作者虽然制作出了多匝数的平面双层线圈,但都没有认识到随着线圈匝数的进一步增多,线圈电铸就越困难这个问题。对于硅基磁芯的制作,国内外的研究都局限于较薄镀层的研究,如 Yao Fu、J. Sutanto、J. W. Judy<sup>[14]</sup>、H. J. Cho<sup>[15]</sup>、Y. h. Zhang<sup>[16]</sup>等都采用先在硅基底上溅射过渡种子层(Cr/Cu 或 Ti/Cu)再电铸合金材料的方法制作磁芯,但这种方法制作的镀层仅有几十微米,镀层再增厚时就容易脱落。因此,在需要厚合金镀层来建立磁路,以减少磁通泄漏的情况下,这种工艺方法不适用。

本文从改善电磁驱动器的制作工艺入手,提出

了制作多匝数微型平面线圈和厚磁芯镀层的工艺方法,并制作出了双层,共 44 匝,线圈总长度为 1 164 mm,磁芯厚度达 200  $\mu\text{m}$  的平面线圈电磁驱动器。该驱动器制作工艺简单,加工周期短,成本低。最后将微型电磁驱动器应用于无阀微泵进行了性能测试。

## 2 微电磁驱动器的组成及原理

微型电磁驱动器主要由两部分组成:双层铜质微型平面线圈和厚度较大的 NiFe 合金铁芯,图 1 为微型驱动器的三维模型。通过在硅片上刻蚀深槽来生长平面线圈,平面线圈制作在硅片的正反两面,上下两层用过线孔连接;在线圈中央刻蚀出深槽及过线孔,然后用微电铸工艺制作大厚度合金磁芯。驱动器的工作原理是:当平面线圈输入交变电流时,线圈产生交变磁场,磁场作用于磁性薄膜产生电磁力。图 2 是驱动器平面线圈实物图。

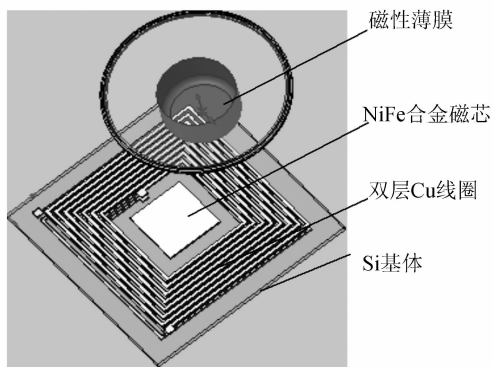


图 1 电磁驱动器原理图

Fig. 1 Schematic of electromagnetic microactuator

## 3 电磁驱动器的制作方法

### 3.1 多匝数微型平面线圈制作工艺

对于电磁驱动器微型平面线圈的制作,文献[10]的作者采用平面生长工艺,即在生长的线圈上再生长第二层线圈。但这种工艺方法复杂,且线圈

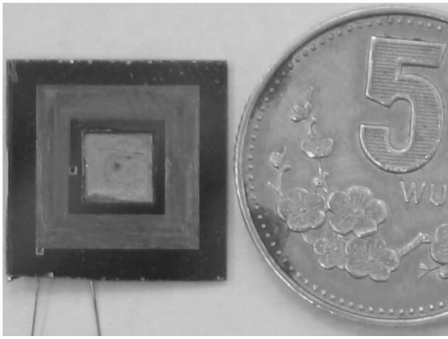


图 2 平面线圈实物图

Fig. 2 Photo of plane coil

深宽比小,又需要一种价格昂贵的苯并环丁烯聚合物作为绝缘材料,制作成本高。文献[13]的作者在硅片正反两面刻蚀深槽然后电铸来制作多匝数的平面双层线圈,显然这种工艺方法成本要低得多,但制作匝数更多的线圈时就遇到了困难。本文制作平面线圈的方法,借鉴了文献[13]在硅片正反两面制作双层线圈的工艺,但是把电铸线圈前二次光刻和腐蚀的工艺步骤改为:直接对种子层整体电铸,当槽内镀层与槽壁结合牢固时,用剥离的方法剥去槽外部分的镀层,然后再对留在槽内的线圈进行电铸,直至张满整个硅槽。制作工艺简单,加工周期短,成本低。主要的工艺步骤为:

(1)取双面氧化、厚  $380\ \mu\text{m}$  的硅片,利用 MEMS 工艺,经光刻、显影、腐蚀等工艺步骤,把线圈图形和磁芯的图形制作在硅片上,如图 3(a)所示;

(2)用离子刻蚀机刻蚀需要电镀的线圈和磁芯结构。线圈槽深  $60\ \mu\text{m}$ ,需要电铸磁芯的位置,槽深  $200\ \mu\text{m}$ 。如图 3(b)所示;

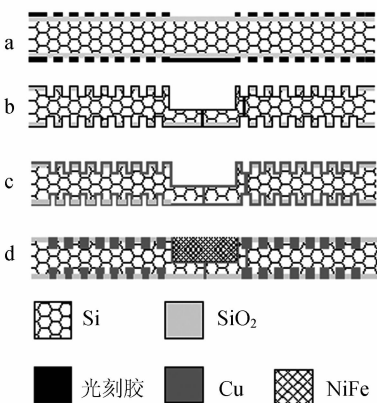


图 3 平面双层线圈的主要工艺步骤

Fig. 3 Fabrication processes of double plane microcoil

(3)在硅片的正反两面溅射种子层 Cu,然后,采用大面积整体电铸的方式,利用表 1 所示的铜电铸配方对整个种子层进行 Cu 的电铸。如图 3(c)所示;

表 1 Cu 电镀液主要成分

Tab. 1 Cu electroplating bath

组成成分	浓度/( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )	电镀条件
五水硫酸铜	200	pH 值 2.5~4
硫酸(98%)	50	电流密度动态控制
葡萄糖粉	35	搅拌
丁炔二醇	5	

(4)当槽内线圈镀层与基体结合牢固后,用剥离的方法剥去槽外部分的镀层,把面电铸方式改为沿线电铸的方式,直至张满整个硅槽。如图 3(d)所示。

### 3.1.1 电铸方式的选择

微型平面线圈电铸方式有两种:面电铸方式,此时槽内镀层的电流来自于表面;沿线方向电铸,此时槽内镀层的电流来自线圈远端入口。

本文制作的平面线圈,匝数多,长度过长,如果经二次光刻、腐蚀,对只留在槽内的种子层采用线电铸方式,因电阻过大,即使采用大电流电铸,线圈中间部分还是没来得及生长就被电铸液浸泡脱落。而采用面电铸的方式则不存在这种情况,但单独用面电铸方式时,如果电镀时间过长,由于边缘效应,线圈槽口会提前封闭使线圈产生空洞。因此须结合这两种电铸方式,既使种子层得到充分生长,又减少线圈镀层空洞的产生。

### 3.1.2 电流密度的动态控制

在电铸工艺中,由于镀层位置和形状的不同,导致电流密度分布不均匀。电阻值大的部位电流较弱,镀层不容易生长。而如果种子层长期得不到生长,在电铸液内浸泡时间越长,越容易脱落,因此种子层必须在脱落之前得到快速生长。而电铸时金属离子的沉积速度随电流密度的增加而增加(如图 4 所示),因此在开始电铸时就要用大电流对种子层进行电铸。但电流密度不能太大,不能超过允许的上限(不同的电铸液在不同的工艺条件下有不同的电流密度上限值),超过上限值以后,由于阴极附近严重缺乏金属离子,在阴极的尖端或凹凸的地方会产生形状如树枝的金属镀层,或在整个阴极表面产生形状如海绵的疏松镀层。随着硅槽内镀层的生长,线圈电阻将逐步降低,同时槽内镀层与基体的结合

力得到增强<sup>[17]</sup>。当种子层生长到一定厚度时,就可以采用沿线电铸的方式了。在线电铸方式下为了得到均匀镀层,应采用低电流密度电镀<sup>[18]</sup>。

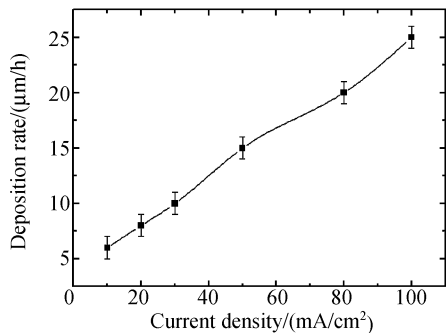


图4 沉积速度与电流密度关系

Fig. 4 Relationship between deposition rate and current density

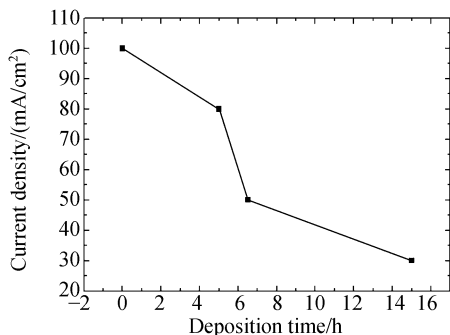


图5 电流的动态控制图

Fig. 5 Current density dynamic control

鉴于上述原因,在多匝平面微型线圈的电铸工艺过程中应对电铸的电流密度进行动态控制。图5为本文实验中的电流密度控制曲线:面电铸方式时,采用80~100 mA/cm<sup>2</sup>的电流密度。当电流密度超过100 mA/cm<sup>2</sup>时,在镀件的尖角和边缘处发现“烧焦”现象,再继续电镀就会形成树枝状结晶或海绵状的镀层。面电铸约5~6 h(约20 μm厚)后,用剥离的方法剥去槽外的镀层,采用30~50 mA/cm<sup>2</sup>的电流对留在槽内的线圈进行线电铸,直至张满整个硅槽,最后得到镀层厚度均匀的多匝线圈。

用上面的工艺方法有效地解决了多匝数、大长度平面微型线圈电铸的工艺难点,而且相对于文献[13]的工艺,还减少了两次二次光刻和两次腐蚀工艺,节约了成本。本文采用这种工艺方法在10 mm×10 mm的硅片上制作出了匝数为22×2(铜线截面60 μm×60 μm,线间距为60 μm,总长为1

164 mm)的双层平面线圈。该平面双层线圈电阻测量值约为4.9 Ω,而通过公式:

$$R = \rho_r \frac{L}{A}, \quad (1)$$

其中 $\rho_r$ 表示电阻率, $A$ 表示铜线截面积, $L$ 表示线圈总长度。电阻的理论计算值为5.4 Ω,测量值接近理论值,说明这种工艺方法制作的双层多匝平面线圈是成功的。

### 3.2 硅基厚合金(NiFe)磁芯的制作工艺

NiFe合金材料是微机电系统中常用的磁性材料,相对其他软磁材料,如CoFeCu,有相对高的饱和磁化强度和低的矫顽力,且沉积方法简单、廉价、易控制。

为了建立磁路以减少磁通泄漏,需要制作厚的磁性合金镀层。但是在硅片上制作厚合金镀层是困难的。因为硅片表面光滑,镀层容易脱落。C. H. Ko等人采用先在基底上溅射过渡种子层(Cr/Cu或Ti/Cu),再电铸合金材料的方法制作磁芯,但是制作的镀层仅有十几微米厚,不能满足驱动器对建立磁路的需求。为了制作成分均匀、厚度较大的磁性材料,本文采用了下面的工艺方法。

#### 3.2.1 电铸液的选择

采用氨基磺酸盐作为电镀的主盐,可以降低合金镀层的残余应力,使合金镀层不易变形<sup>[19]</sup>。

#### 3.2.2 合金镀层Fe含量的确定

电镀NiFe合金时,只有Ni和Fe的成分比接近坡莫合金比例时才会具有良好的软磁性能。当镀层中Fe的含量在19%~24%之间时,镀层的软磁性能较好<sup>[20]</sup>,所以通常把镀层中Fe的成分定义在(20±1)%。而影响NiFe合金中Fe成分的主要因素是电铸液中Fe<sup>2+</sup>的含量和电流密度的大小。

由于NiFe合金电镀是一种异常共沉积过程,溶液中的Fe<sup>2+</sup>具有强烈的优先沉积倾向,因此电镀液中Ni<sup>2+</sup>/Fe<sup>2+</sup>的浓度比与镀层中Ni/Fe比例并不一致。实验得出:当电镀液中的Ni<sup>2+</sup>/Fe<sup>2+</sup>浓度比高于70:1时,才能得到Ni/Fe比为80:20的合金镀层。这样的电铸液中Fe<sup>2+</sup>的实际浓度很小,即使是微小的变化也会使镀层成分发生明显的变化,因此就要合适地选择电铸液成分的配比来减小这种影响。图6为合金镀层中含铁量与电镀液中硫酸亚铁含量的关系。实验测得,当电铸液中FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O的含量为4 g/L时,合金镀层中Fe的含量可以达到20%左右。

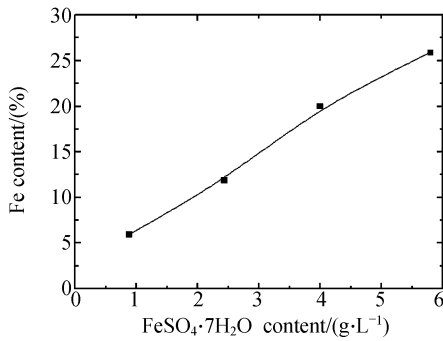


图 6 镀层含铁量与镀液中硫酸亚铁含量关系

Fig. 6 Relationship between Fe content in alloy and FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O content in bath

在通常的电铸过程中,只要增加电流密度就可以得到高的电铸速度,且不会对镀层成分产生大的影响。但是对选择性的微型结构合金材料电铸时,由于电铸位置的不同,不可避免地存在电流密度的差异。如果电流密度值对镀层成分影响过大,将导致镀层成分的不一致,影响镀层性能,因此应选择电流密度值对镀层成分影响不大的区域进行电铸。本文经实验得出镀层含 Fe 量与电流密度的关系曲线,如图 7 所示。

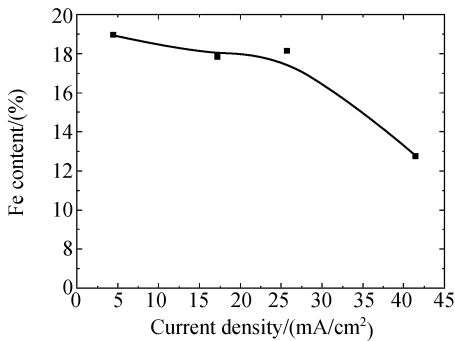


图 7 镀层含铁量与电流密度关系

Fig. 7 Relationship between Fe content in alloy and current density

由图 7 的对应关系可以看到,电流密度在 30 mA/cm<sup>2</sup> 以下时,电流密度的变化对镀层 Fe 含量几乎不产生影响。选择这个电流密度值进行电铸时,即使不同位置存在电流密度的差异也不会对镀层成分产生太大的影响,保证了镀层磁性的一致性。

### 3.2.3 厚合金镀层的生长工艺

为了在硅基体上得到较厚的合金磁性镀层。本文提出了一种新的生长工艺:首先要在要电铸合金镀层位置的硅片上刻蚀深槽,增加种子层(Cu)与基底

的结合力;再对种子层 Cu 进行铜的电铸;当 Cu 镀层厚度达到 20 μm 左右时,再进行坡莫合金材料的电铸(原理见文献[17],即本人的另一篇论文)。这样就可以在硅片上得到厚度超过 200 μm 的合金磁芯。由磁性镀层的 B-H 曲线可知,增加的种子层厚度并没有影响合金镀层的性能。图 8 为实验测得 NiFe 合金镀层的 B-H 曲线,曲线与 x 轴的交点值表示矫顽力的大小,曲线的最大纵坐标值表示磁饱和强度的大小。

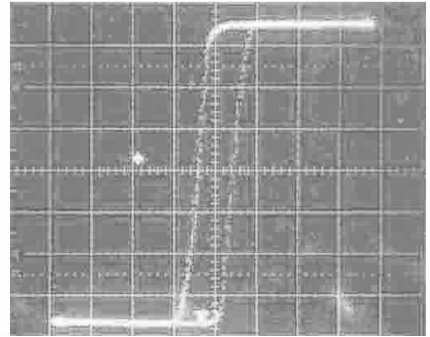


图 8 NiFe 镀层的 B-H 曲线

Fig. 8 BH-loop of electroplated sample

从 B-H 曲线可以看出合金镀层的矫顽力约 60 A/m,这个值已经比较接近软磁磁性材料矫顽力的理想值(0)。

## 4 实验与分析

将制作好的微型电磁驱动器应用于无阀微泵做实验分析。驱动器输入电流密度为  $3.3 \times 10^7$  A/m<sup>2</sup> (相当于 0.3 A),微泵振动膜上永磁体大小为  $\phi 3$  mm  $\times 3$  mm。

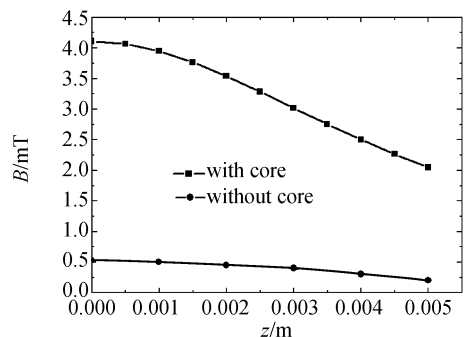


图 9 平面线圈磁感应强度在 z 方向上的变化情况

Fig. 9 Magnetic induction along symmetry line(z axis)

图9中的两条曲线分别表示线圈有磁芯和无磁芯情况下,平面线圈磁感应强度在 $z$ 轴方向上的分布情况。可以看到,由于磁芯的加入,在相同位置微驱动器平面线圈产生的磁感应强度是无磁芯情况的6~8倍。

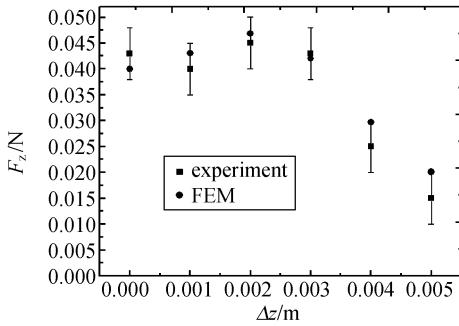


图10 薄膜所受电磁力

Fig. 10 Magnetic force on the film

在图10中,圆点表示的是微电磁驱动器产生电磁力的理论计算值,方块表示的是实验测得值。图中横坐标表示平面线圈与薄膜上永磁体下表面的距离,即空气隙,纵坐标表示电磁力。从图中可以看出,当驱动器输入0.3 A电流时,在0~3 mm的气隙范围内,驱动器产生的电磁力比较大,且变化不明显;当 $\Delta z > 3$  mm时,电磁力明显下降。这说明由于增加磁芯的作用,在线圈中心附近的电磁力产生了积聚现象,磁通量泄漏较少,在 $\Delta z > 3$  mm的地方,磁通量泄漏比较大。实验测得驱动器产生的最大电磁力约50 mN,从实验得到的数据中可知,相对文献中同类型的其他微型电磁驱动器,该微型电磁驱动器具有更高的电磁能量密度,能产生更大的电磁驱动力。

而根据电磁力的理论求解方程式<sup>[21]</sup>:

$$F_z = \int_V \frac{d(M \cdot B_z)}{dz} dV = MV \frac{\partial B_z}{\partial z}, \quad (2)$$

式中 $F_z$ 为沿垂直方向作用力, $V$ 为薄膜上永磁体体积, $\partial B_z / \partial z$ 为磁感应强度在 $z$ 轴正方向的梯度。从公式(2)可以得到电磁驱动器理论计算的最大值为46 mN,实验测量值和理论值基本符合,说明制作的微型电磁驱动器是成功的。

## 5 结论

本文提出了制作高能量密度微型电磁驱动器的制作方法,即微型多匝平面线圈的制作方法和硅基厚磁芯镀层的制作方法。解决了硅基多匝、大长度平面线圈制作工艺难点和硅基厚磁性材料制作工艺难点。利用这种工艺方法还能制作出匝数更多、厚度更大的高能量密度微型电磁驱动器。

在多匝线圈的电铸工艺中,得到了铜镀层达20  $\mu\text{m}$ 厚时采用沿线电铸的临界厚度值;在硅基厚NiFe合金电铸工艺中,得出了 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 含量为4 g/L,电流密度在30  $\text{mA}/\text{cm}^2$ 以下时,可以使合金镀层中Fe含量达到20%左右的实验值。这些为今后电铸多匝微型平面线圈和制作厚磁性材料提供了实验依据。

在10 mm×10 mm×0.38 mm的硅片上,研制出一种线圈匝数达22×2匝,总长度达1 164 mm,NiFe合金磁芯的厚度达200  $\mu\text{m}$ 的微型电磁驱动器。最后将这种微型驱动器应用于微泵做实验分析:磁芯的加入使驱动器产生的磁感应强度是无磁芯情况时的6~8倍;当驱动器输入0.3 A的正弦电流时,驱动器产生约50 mN的电磁力。实验结果表明:这种微电磁驱动器在相同的输入功率下,比同类其他微电磁驱动器具有更高的电磁能量密度,并能产生更大的电磁驱动力。

## 参考文献:

- [1] MECKES A, BEHRENS J, BENECKE W. A microvalve with electromagnetic actuator [C]. *Actuator 98, 6<sup>th</sup> International Conference on New Actuators*, June 1998: 17-19.
- [2] BEHRENS J, MEXKES A, GEBHARD M, et al.. Electromagnetic actuation for micropump and valves [C]. *Actuator 96, 5<sup>th</sup> International Conference on New Actuators*, June 1996: 26-28.
- [3] WILLIAM P T, OLIVER B, Mark G A. Fully integrated magnetically actuated micromachined relays [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1998, 40(2): 181-191.
- [4] 王雷, 谭久彬, 刘玉涛. 超磁致伸缩体内涡流效应有限元分析 [J]. *光学精密工程*, 2006, 14(3): 445-449.  
WANG L, TAN J B, LIU Y T. Analysis on eddy current effect in giant magnetostriction with finite element meth-

- od[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 445-449. (in Chinese)
- [5] KLOPZING M. A novel linear micromachined electromagnetic actuator including magnetic suspension[A]. *Actuator 98, 6<sup>th</sup> International Conference on New Actuators, June 1998*; 17-19.
- [6] 李淑娟, 吴一辉, 宣明. 电磁式微流体动态混合器的动力学数值模拟[J]. *光学 精密工程*, 2005, 13(2): 127-134.  
LI SH X, WU Y H, XUAN M. Dynamic numerical simulation of electromagnetic microfluidic active mixer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2): 127-134. (in Chinese)
- [7] 杨杰伟, 吴一辉, 贾宏光, 等. 轴向磁化永磁微电机磁场分析及设计方法研究[J]. *光学 精密工程*, 2006, 14(1): 83-88.  
YANG J W, WU Y H, JIA H G, *et al.*. Design method and magnetic field analysis of axial-magnetized permanent magnet micromotor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1): 83-88. (in Chinese)
- [8] 韩邦成, 虎刚, 房建成. 磁悬浮控制力矩陀螺高速转子的优化设计[J]. *光学 精密工程*, 2006, 14(4): 662-666.  
HANG B CH, HU G, FANG J CH. Optimization design of magnetic suspended gyroscope rotor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 662-666. (in Chinese)
- [9] YAO F, EROL C H, MURALIDHAR K. Fabrication of microstructures with different aspect ratios in a single layer[J]. *SPIE*, 2005, 5650: 156-162.
- [10] KO C H, YANG J J. Efficient magnetic microactuator with an enclosed magnetic core[J]. *Microolith, Microfab, Microsyst*, 2002, 1(2): 144-149.
- [11] SUTANTO J, PAPANIA A D, BERTHELOT Y H, *et al.*. Dynamic characteristics of membrane displacement of a bidirectional electromagnetic microactuator with microcoil fabricated on a single wafer[J]. *Microelectronic Engineering*, 2005, 82: 12-27.
- [12] 苏宇锋, 陈文元. 基于 Parylene 薄膜的微型电磁驱动器设计与工艺[J]. *机械制造*, 2004, 42(484): 25-28.  
SU Y F, CHEN W Y. Design and fabricate micro electromagnetic actuator based on the parylene films[J]. *Mechine Manufacture*, 2004, 42(484): 25-28. (in Chinese)
- [13] 郭占社, 吴一辉, 宣明, 等. 电磁型平面微电机及其制作工艺[J]. *光学 精密工程*, 2003, 11(2): 120-124.  
GUO ZH SH, WU Y H, XUAN M, *et al.*. Electro-magnetic planar micromotor and its fabrication[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(2): 120-124. (in Chinese)
- [14] JACK W J. *Magnetic microactuators with polysilicon flexures*[D]. University of Berkeley Doctor Dissertation, 1994: 66-72.
- [15] HYOUNY J C, CHONG H. A bidirectional magnetic microactuator using electroplated permanent magnet arrays [J]. *Journal of Microelectro-Mechanical Systems*, 2002, 11(1): 78-84.
- [16] ZHANG Y H, DING G F, CAI Y L, *et al.*. Electroplating of low stress permalloy for MEMS[J]. *Materials Characterization*, 2006, 1(6): 1-5.
- [17] 张涛, 吴一辉, 张平, 等. Si 基 Cu/NiFe 薄膜的生长及其粘附特性研究[J]. *传感技术学报*, 2006, 9(5): 1444-1447.  
ZHANG T, WU Y H, ZHANG P, *et al.*. The growth and adhesion properties research of the Cu/NiFe films on the silicon substrates[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2006, 9(5): 1444-1447. (in Chinese)
- [18] 杨杰伟, 吴一辉, 王淑荣, 等. 平面微电机定子线圈制作工艺研究[J]. *微细加工技术*, 2006, 6(3): 27-31.  
YANG J W, WU Y H, WANG SH R, *et al.*. Study on fabrication process of planar stator coil of micromotor [J]. *Microfabrication Technology*, 2006, 6(3): 27-31. (in Chinese)
- [19] 兰英斌, 于金库. 电镀 NiFe 合金的实验研究[J]. *腐蚀与防护*, 1999, 120(8): 355-370.  
LAN Y B, YU J K. Experiment research of plating technique of NiFe alloy [J]. *Corrosion and Protection*, 1999, 120(8): 355-370. (in Chinese)
- [20] 丁桂甫, 张寿柏, 李依群, 等. 微马达转子电镀导磁的研究[J]. *微细加工技术*, 1996, 3: 71-76.  
DING G F, ZHANG SH B, LI Y Q, *et al.*. A study on plating soft magnetic underlayer for the rotor of micromotor[J]. *Microfabrication Technology*, 1996, 3: 71-76. (in Chinese)
- [21] YAM H C, LOTTO C, ASSAF E, *et al.*. A PMMA valveless micropump using electromagnetic actuation [J]. *Microfluid and Nanofluid*, 2005, 1: 197-207.

作者简介: 张涛(1978—), 男, 河南南召人, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生, 主要从事微光机电一体化研究。E-mail: zqs\_0431@126.com  
吴一辉(1965—), 女, 吉林长春人, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究员, 博士生导师, 主要从事集成微光机电系统的研究。