

文章编号: 1007- 4252(2008) 01- 0028- 05

导线阵列产生的微电磁力操纵磁粒子

洪小雅, 席文明

(厦门大学 物理与机电学院, 厦门 361005)

摘要:当磁粒子包裹相应的外层物质时, 可以与细胞产生选择性黏附, 该特性可用于细胞分离、分选、药物运输等。在硅片上制做导线阵列, 通过对相应导线阵列的通断电控制, 可以控制微磁粒子运动, 也就控制了与其相联的细胞运动。细胞运动到指定位置, 借助工具对细胞进行操作, 研究细胞特性。讨论导线阵列的 MEMS 工艺, 对通电导线产生的磁场、温度场进行了仿真, 了解电磁力大小的影响因素。

关键词: 导线阵列; 电磁场; 温度场; 磁粒子

中图分类号: TM 15 **文献标识码:** B

Simulation of manipulating micro particle by micro electromagnetic force with wire arrays

HONG Xiao-ya XI Wen-ming

(Department of physics and electromechanical Xiamen University 361005, China)

Abstract The magnetic particle according to the outside layer material wrap up, can produce the selectivity with cell to stick to attach, this characteristic can be used for the cell separation, choose separately, the medicine conveyance etc. The electric order of different wires is changed to form a moving micro electromagnetic field, and then the particle movement can be manipulated, and also the cell movement can be manipulated. When the cell reaches the destination, use the tool to manipulate the cell and research the characteristic of the cell. And discussing the MEMS technique of wire array, simulate the magnetic field and temperature field, and know the influence factors on electromagnetic force.

Key words wire array, electromagnetic field, temperature field, magnetic particle

0 引言

研究表明, 癌细胞的力学特性与正常细胞是不同的, 它们具有不同的弹性模量^[1], 所以根据它们之间的差别, 可以通过一些手段来判断细胞有没有发生病变。要研究细胞的力学特性, 首先需要对其细胞进行操纵, 现有的细胞操纵方法主要有光操

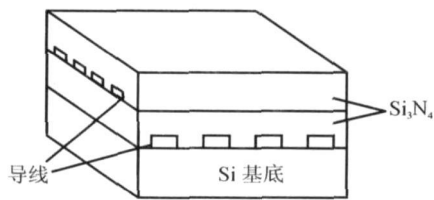
纵^[2]、电泳操纵^[3]、磁操纵^[4]、机械操纵^[5]等等。光操纵也被称为光镊子或者是光电镊子^[2], 当一束激光在物质中传播时, 会对物质产生一种“梯度力”的作用。而光电镊子利用物质的光电效应, 当光照在特定物质上就会有电势产生, 从而来操纵细胞。在外加电场的作用下, 细胞表面将产生极化现象, 从而

收稿日期: 2007- 07- 20 修订日期: 2007- 09- 22

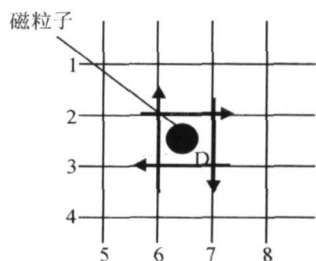
作者简介: 洪小雅 (1982-), 女, 厦门大学机电系研究生, 籍贯为福建, 主要研究方向为 MEMS。

使得细胞在该电场作用下,产生运动,这种现象称为细胞电泳。不同类型的细胞在电场中的泳动速度不同,细胞电泳可用来分离不同种类的细胞。机械操纵方法利用细胞的自身属性来操纵细胞,如细胞自重、细胞大小等。光操纵存在设备昂贵、操作技术要求高等缺点;电泳操作装置主要包括电源和电泳槽,不易集成化;而机械操纵存在工艺制作复杂的缺点;传统的磁操纵技术存在精度不高、难于集成化的缺点。

工作采用导线网格产生局部微磁场,磁场对磁粒子有吸引作用,从而对磁粒子进行操纵,具体原理见图1所示。假设网格由1~8根导线组成,1~4和5~8为不同的两层导线,两导线层之间用 Si_3N_4 层作为绝缘层。如果要在点D位置形成局部微磁场,则对导线2、3、6、7通如图1(b)所示电流。磁粒子在电磁力的作用下运动到局部磁场的中心。在局部磁场中心磁粒子只受到一个与导线阵列平面垂直的力。利用导线网格驱动磁粒子的优点为:其操纵精度为网格尺寸的一半,易实现集成化,操纵简便、易行。



(a)



(b)

Fig 1 wire array (a) the sketch of wire array (b) the plan form view

图1 导线阵列图 (a)导线阵列立体图 (b)导线阵列俯视图

1 通电导线磁场以及温度场仿真

磁场仿真分析时, Si基底对磁场强度影响甚微,仿真时可以忽略不计;进行温度分析时, Si基底起着传散热的作用,对温度的分布有着很大的影响,不可忽略。

表1 材料属性表

Table 1 Properties of material

材料	热传导率 ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{k})$)	比热 $\text{J}/(\text{kg}^{\circ}\text{K})$	密度 (kg/m^3)	电阻率 (欧姆 \cdot m)	μ_r
Cu	401	93	8900	1.75×10^{-8}	1
Si_3N_4	20	800	3200		0.999
Si	148	700	2330		
水	0.7	4200	1000		1

表2 仿真模型尺寸

Table 2 Parameter of simulate model

	尺寸 (μm)
硅片厚度	200
导线厚度	0.2
导线宽度	10
导线长度	100
第一层绝缘层厚度	0.3
第二、三层绝缘层厚度	0.4
培养液高度	300

1.1 通电导线产生的电磁场仿真

假设磁粒子为球体,磁粒子在悬浮液中数量有限,可以不考虑磁粒子间的相互作用,磁粒子受到的微电磁力可表示为^[1]

$$\vec{F} = (\vec{m} \cdot \nabla) \vec{B} = V \chi_m (\vec{H} \cdot \nabla) \vec{B} \quad (1)$$

式中 χ_m 为磁粒子体积, \vec{B} 为磁化系数, \vec{H} 为磁粒子所在位置的磁场, 为磁粒子所在位置磁场强度。假设坐标与图2一致,原点位于通电导线网格中心的硅片底部,则磁粒子所受到的 x 、 y 、 z 方向分力 F_x 、 F_y 、 F_z 可表示为

$$\begin{aligned} F_x &= V \chi_m (H_x \frac{\partial B_x}{\partial x} + H_y \frac{\partial B_x}{\partial y} + H_z \frac{\partial B_x}{\partial z}) \\ F_y &= V \chi_m (H_x \frac{\partial B_y}{\partial x} + H_y \frac{\partial B_y}{\partial y} + H_z \frac{\partial B_y}{\partial z}) \\ F_z &= V \chi_m (H_x \frac{\partial B_z}{\partial x} + H_y \frac{\partial B_z}{\partial y} + H_z \frac{\partial B_z}{\partial z}) \end{aligned} \quad (2)$$

根据电磁理论,无限长通电导线在距离导线位置处产生的磁场强度

$$\begin{aligned} \vec{B} &= \frac{\mu I}{2\pi r} \\ \vec{H} &= \frac{\vec{B}}{\mu} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

式中 μ 为磁导率, μ_0 为空气磁导率, μ_0 取值为 $4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$, μ_r 为相对磁导率。

假设磁粒子为球体, 半径为 R , 则

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3 \quad (4)$$

综上所述可知, 磁粒子在载流导线阵列中所受到磁力大小与磁粒子的半径 R 、磁化率 χ_m 、导线中电流大小、其所处位置的磁场梯度有关。取 $x=0, z=0$ 磁粒子半径 $R=3\mu\text{m}$, 电流大小为 3mA , 磁化率 $\chi_m=10000$, $\mu=4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$, 磁粒子在局部磁场中所受磁力大小与位置高度 (y 轴方向) 关系如图 2(a) 所示。在实验中, 较易控制的是载流电流大小和磁粒子的半径大小。载流电流会产生热效应, 使周围温度升高, 对磁粒子粘附物质的特性会有影响, 通电时间过长或通电电流过大有可能产生气泡, 最后使导线断裂。

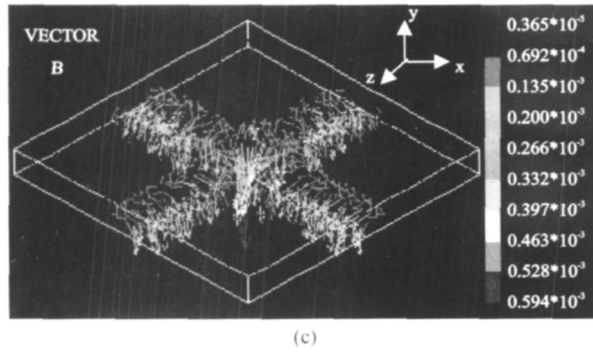
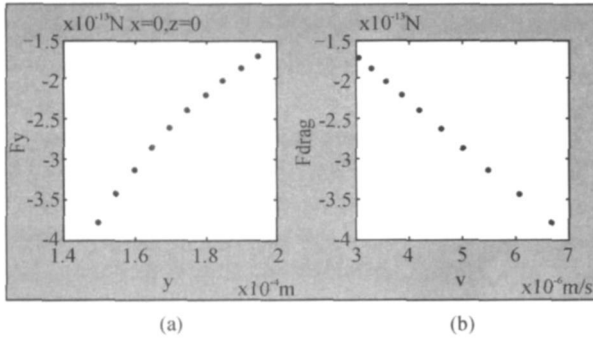


Fig 2 the simulation of electromagnetic force and field (a) $x=0, z=0$ the relation between the micro attraction of particle under the micro electric field and the distance away the surface of wire array (b) $x=0, z=0$ the relation between the stick force and the velocity of particle (c) the height is $10\mu\text{m}$, $I=3\text{mA}$, vector B simulation

图 2 电磁场仿真 (a) $x=0, z=0$ 时, 磁粒子所受磁力与高度 y 关系图 (b) $x=0, z=0$ 时, 磁粒子运动速度与粘滞力关系图 (c) 模型高度 $10\mu\text{m}$, 电流大小为 3 毫安的磁场仿真

磁粒子移动时受到培养液对它的粘滞力作用。假设磁粒子为球形体, 粘滞力可由 G. G. Stokes 公式计算出

$$\vec{F}_{\text{drag}} = -6\pi\eta R \vec{v} \quad (5)$$

式中 η 为培养液粘滞系数, v 为磁粒子在培养液中的运动速度, R 为磁粒子半径。当粘滞力大小等于磁粒子在磁场中所受到的磁力大小, 磁粒子的运动速度达到最大, 此后将以匀速运动。取 $\eta=1.005 \times 10^{-3} \text{Pa/s}$ 磁粒子运动速度与粘滞力关系如图 2(b) 所示。

从图 2(a) 可知, 当高度增大时, 磁力衰减很厉害。综合图 2(a)、(b), 当 $x=0, z=0, y=150\mu\text{m}$ (图上最低点) 时, $F_y = -3.8 \times 10^{-13} \text{N}$, 则当 $F_{\text{drag}} = F_y$ 时, 磁粒子的运动速度 v 最大, 为 $6.7\mu\text{m/s}$ 。从图 2(c) 可以看出, 导线网格中的磁感应强度大于网格附近区域, 梯度变化较大。

1.2 通电导线发热产生的温度场分布

模型初始温度为 25°C , 周围环境温度也为 25°C 。由于模型的体积较小, 没有考虑辐射作用。

从图 3 可知, 其它条件一致时, 空气对流系数越大, 温度越低。其它条件一致时, 通电电压越大, 温度越高。所以不可随便增大导线电流, 若是要增大电流的话, 就要考虑安装散热系统, 改变空气对流情况。图 3 坐标与图 2 坐标一致。

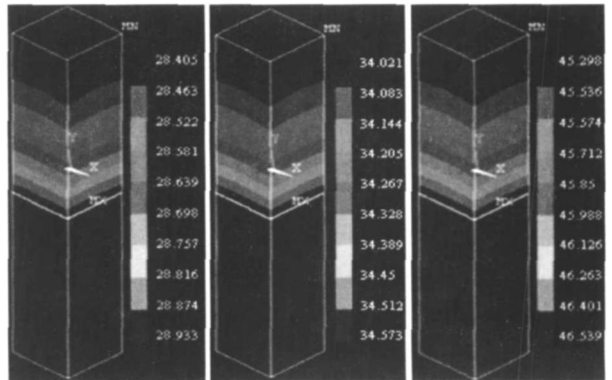


Fig 3 Simulation the temperature field (a) the convection is $50 \text{W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$, $I=3\text{mA}$ (b) the convection is $20 \text{W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$, $I=3\text{mA}$ (c) the convection is $20 \text{W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$, $I=4\text{mA}$.

图 3 温度场仿真 (a) 空气自然对流系数 $50 \text{W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$, 电流为 3mA (b) 空气自然对流系数 $20 \text{W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$, 电压为 3mA (c) 空气自然对流系数 $20 \text{W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$, 电压为 4mA

2 导线阵列制作工艺

导线的制作过程如下:首先,在硅表面 PECVD 一层 $0.3\mu\text{m}$ 厚的 Si_3N_4 层;其次,溅射一层 $0.2\mu\text{m}$ 厚的 Cu 金属层,制作第一层导线;接着,在导线上 PECVD 一层 $0.4\mu\text{m}$ 厚的 Si_3N_4 层,在该 Si_3N_4 层上再溅射一层 $0.2\mu\text{m}$ 厚的 Cu 金属层,制作第二层导线;最后,PECVD 一层 $0.4\mu\text{m}$ 厚的 Si_3N_4 层。

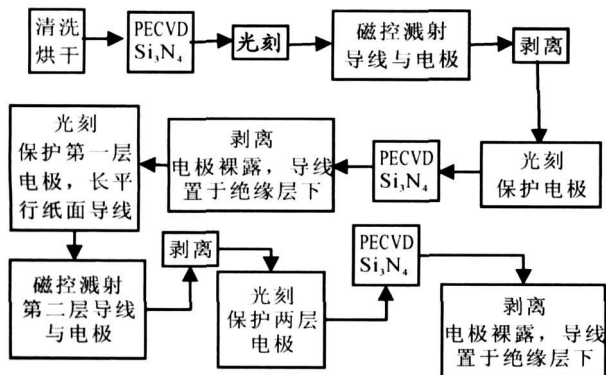


Fig 4 Process flowchart

图 4 工艺流程图

尽管正胶的分辨力是最好^[6]的,正胶的显影剂采用水性溶剂,与硅的黏附性能一般,但实际应用中由于加工类型、加工要求、加工成本的考虑,需要对光刻胶进行合理的选择。负性胶仅要求少量的感光剂,比正性胶便宜,与硅的黏附性能优秀,负性胶多采用有机溶液,如二甲苯溶液等致癌物质。剥离工艺一般采用反转胶技术,反转胶技术对环境温湿度要求高,操作技术复杂,一次操作成功率低,且反转胶在 PECVD 中的抗轰击能力低,从低毒、水溶液显影剂方面考虑,本次工艺中,选用的光刻胶是正胶 BP212。正胶 BP212 涂胶转速为 $2500\text{r}/\text{min}$,时间 30s ,曝光时间要根据胶的具体特性决定。

导线材料选定铜。铜的导电性要好于铝,铜的电子信号传输速度比铝更快,铝会跟碱性显影液发生反应,显影时较难控制。如果是要选金做为导线材料,最好是采用反转胶技术,因为金相对铜、铝较难剥离的多。绝缘层较常用的是 SiO_2 薄膜,但是 Si_3N_4 薄膜较 SiO_2 薄膜有着较良好的抗杂质扩散和水汽渗透能力,而且具有非常高的化学稳定性^[7]。

导线阵列主要由 PECVD、光刻、磁控溅射和剥离工艺组成。光刻胶 BP212 在温度超过 150°C 的环境下会发生碳化,碳化后的胶无法使用丙酮浸泡剥

离,所以工艺操作时,要区分一下有胶无胶的操作温度。无胶情况下,PECVD 的操作温度设定为 250°C ,而有胶情况下的操作温度设定为 100°C 。光刻、曝光和显影后,接着是后烘坚膜工序,但如果后续工艺是剥离工艺,一般省略此道工序,只需把片子用 N_2 吹干,为的是使牺牲层较易被剥离。

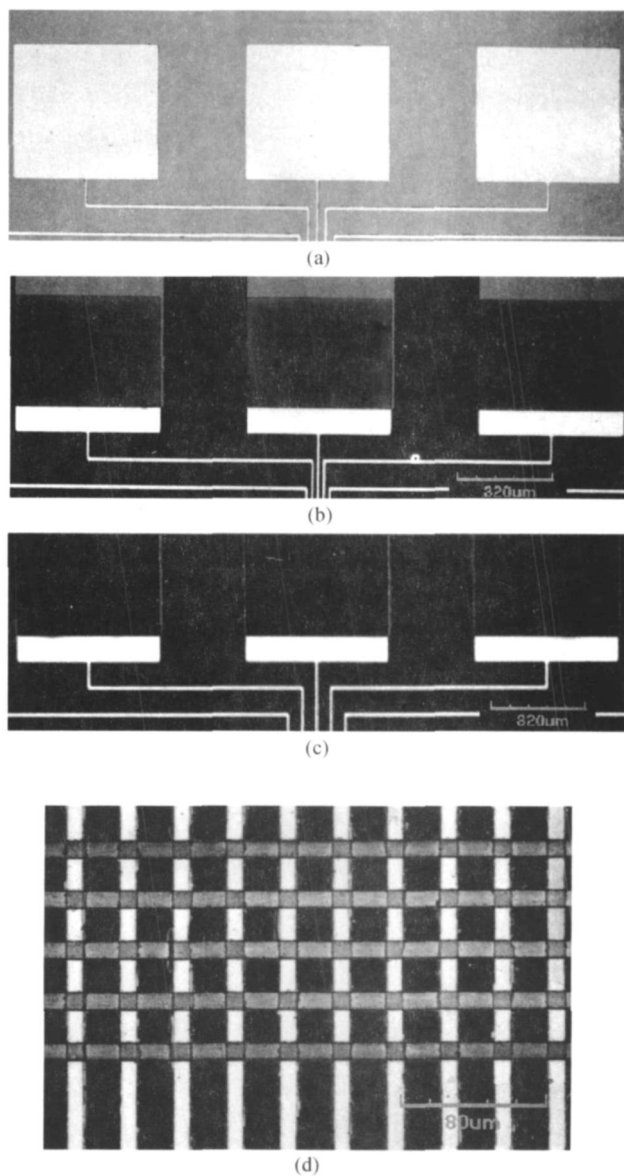


Fig 5 Wire array (a) the first Si_3N_4 layer and the second Cu layer (b) the second Cu electrode after PECVD the second Si_3N_4 layer (c) the second Cu electrode after PECVD the third Si_3N_4 layer (d) wire array

图 5 导线阵列芯片 (a)第一次磁控溅射后的电极图 (b)第二次 PECVD 后的电极图 (c)第三次 PECVD 后的电极图 (d)导线阵列图

图 5 为制作完成的导线网格及电极, 图 5 (a)、(b)、(c) 同为垂直纸面第一层导线的电极, 颜色越来越深是因为每步工艺所花费的时间要几天, 铜被氧化, 电极颜色深的地方大部分都被氧化。图 5 (d) 是导线阵列, 颜色浅的为第一层导线, 颜色深的为第二层导线, 颜色深浅的差异是由于中间隔有一层 Si_3N_4 绝缘层。

3 结论

本文对导线阵列产生的微电磁力操纵磁粒子方法的可行性进行了研究, 通过 matlab 软件对磁粒子所受到微电磁力进行仿真, 以及 ansys 软件对通电导线产生的电磁场、温度场进行仿真, 确定该方法的可行性。现在, 已在 MEMS 中心完成了导线阵列制作, 正在进行驱动电路设计, 该电路完成后就可进行磁粒子驱动实验, 从而验证本文方法的可行性。

参考文献:

[1] Jin- Woo Choi. Magnetic particle separators and integrated biofilters for magnetic bead- based biochemical detection

system [D]. Ph D, 2000. 11- 1- 20.

- [2] Aaron T Ohta, Pei- Yu Chiu, *et al*. Optically- controlled manipulation of live cells using optoelectronic tweezers [J]. **Optical Trapping and Optical Micromanipulation**, 2006, 6326- 632617.
- [3] Changqing Yi, Cheuk- Wing Li, *et al*. Microfluidic technology for manipulation and analysis of biological cells [J]. **Analytical Chimica Acta**, 2006, 560- 1- 23.
- [4] Ostergaard S, Blankenstein G, *et al*. A novel approach to the automation of clinical chemistry by controlled manipulation of magnetic particles [J]. **Journal of magnetism and magnetic materials**, 194- 156- 162.
- [5] Ralph W Bernstein, Xiaojing Zhang, *et al*. Characterization of drosophila embryos immobilized by fluidic microassembly [J]. **IEEE**, 2003, 6- 987- 990.
- [6] 来五星, 轩建平, 史铁林, 等. 微制造光刻工艺中光刻胶性能的比较 [J]. **半导体技术**, 2004, 29 (11): 22- 25.
- [7] 刘宝峰, 李洪峰, 金立国. 半导体器件钝化层 Si_3N_4 薄膜的制备及特性研究 [J]. **哈尔滨理工大学学报**, 2003, 8 (6): 105- 108.