'94 대한전기학회 추계학술대회 논문집(1994. 11. 18)

유전 입자 분리기의 제작 및 해석

양성동0, 이상욱, 김용권
서울 대학교 전기공학과

Fabrication and analysis of the dielectric particle separator

Sung-Dong Yang, Sang-Wook Lee, Yong-Kweon Kim
Department of Electrical Engineering, Seoul National Univ.

Abstract

A manipulator which can separate dielectric particles(biological cells) was fabricated on a silicon wafer using polyimide and n-type electroplating. It consists of 1024 electrode arrays(60㎛×60㎛) and spacing insulator. Positive dielectrophoresis is used for attracting particles. We have the solution of 3-D Laplace equation about this device and calculate the force acting on the particles. The solution has spatial periodicity in the x, y directions and decays exponentially in the z direction.

1. 서론

유전 입자나 세포의 조작을 위해 비균일 전계를 이용한 방법인 Dielectrophoresis에 관하여 많은 연구가 되어 왔다[1]. 이는 유전 입자가 비균일 전계 내에서 힘을 받는 현상을 말하는데, 이를 이용한 초소형 입자 조작 기구들의 연구가 마이크로머시닝의 발달과 더불어 활발하여졌다[2-5]. 이런 여러 가지 장치들과 더불어 입자나 세포를 분리해내는 것이 필요하게 되었다. 기존에 자성 입자를 분리해내는 장치가 있었다[6]. 이는 여러 개의 자극을 만들어 자성 입자를 자극에 붙이는 원리로 되어 있었다. 본 논문에서는 이와 유사하게 유전 입자를 분리하는 장치에 관해 기술하고자 한다. 자극 대신 전극으로 하여 자성 입자가 아닌 유전 입자를 붙이는 원리로 하는 것이다.

유전 입자나 세포는 가해준 전계의 크기의 제곱의 Gradient 방향으로 힘을 받는다[1]. Gradient의 양의 방향으로 힘을 받을 때를 Positive Dielectrophoresis라고 하고, 음의 방향으로 힘을 받을 때는 Negative Dielectrophoresis라고 한다. 이는 물질 상수와 주파수에 의해서 결정된다[7]. 이것은 입자에 따라서 달라지므로 이를 이용하면 섞여 있는 다른 입자를 분리해낼 수 있다[7]. 또한 살아있는 세포와 죽은 세포, 정상 세포와 암세포 간의 주파수 특성차를 이용하여 분리하는 것도 가능하다[8].

본 연구에서는 마이크로머시닝 공정으로 크기가 60㎛×60㎛인 전극을 1024개 제작하였고, 이를 삼차원 Laplace 방정식으로 해석하였다.

2. 분리기의 구조 및 제작 방법

분리기는 그림 1과 같은 구조로 제작하였다.

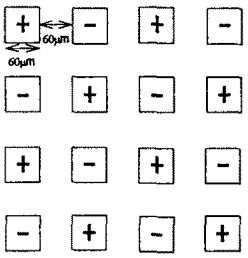

그림 1 전극 구조

각 전극의 간격은 60㎛이고, 전극의 개수는 32×32로 되어 있다. 전극은 구리 또는 니켈이고, 그 사이의 절연물은 Polyimide로 하였다. 도금을 사용한 이유는 금속의 두께를 수㎛에서 수십㎛까지 자유롭게 조절할 수 있기 때문이다. Polyimide는 기계적 전기적인 안정성이 높은 절연재료이므로 사용하였다. 제작 공정은 그림 2와 같다.

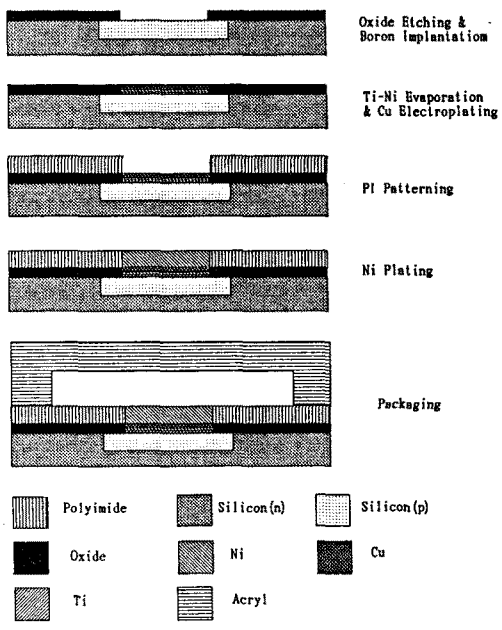

그림 2 제작 공정

n-type 실리콘 기판에 배선을 위한 Oxide를 패터닝 한 후에 각 전극간의 절연을 위해서 붕소 주입을 한다. 그 위에 다시 Photoresist로 패턴을 만든 후 Ti(1000Å)와 Ni(2000Å)을 Evaporation한다. 그런 후에 Lift-off를 하여 배선을 만든다. 그 위에 구리로 약 1㎛정도로 구리 도금을 한다. 절연층으로 Polyimide를 Coating(10㎛)하고 그 위에 전극 패턴을 Photoresist로 만든다. RIE용 Hard Mask로 Ni(2000Å)를 Evaporation을 한다. 다시 Lift-off를 한 후에 O_2 RIE를 하여 구멍을 파낸다. Ni로 도금을 하여 전극을 만든다. 마지막으로 아크릴로 Packaging을 한다.

그림 3은 분리기의 배선 사진이며 그림 2의 두번째 공정까지 된 상태이다. 그림 4는 완성된 분리기의 사진으로 정사각형 모양이 Ni를 도금된 전극이고 그 주변은 Polyimide로 된 절연물이다.

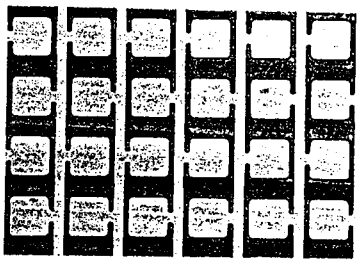

그림 3 분리기의 전극 배선

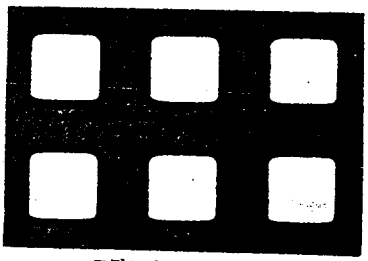

그림4 완성된 분리기

3. 힘의 해석

힘의 해석을 위해서는 먼저 전극에 의해 발생하는 전계를 구해야 한다. 전극이 규칙적으로 배열되어 있기 때문에 주기적으로 경계 조건을 주어 풀면 된다. 한 전극을 그림 5와 같이 좌표 설정을 한다.

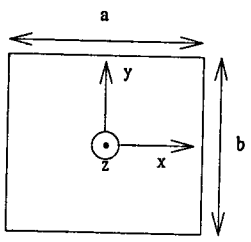

그림 5 전극에 대한 좌표

직교 좌표계의 Laplace 방정식은 식(1)이 되며, V를 XYZ로 변수분리하면 식(2)-(5)를 얻는다.

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 V}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 V}{\partial z^2}=0 \qquad (1)$$

$$\frac{\partial^2 X}{\partial x^2}+k_x^2 X=0 \qquad (2)$$

$$\frac{\partial^2 Y}{\partial y^2}+k_y^2 Y=0 \qquad (3)$$

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial z^2}-\alpha_z^2 Z=0 \qquad (4)$$

$$\alpha_z^2=k_x^2+k_y^2 \qquad (5)$$

X, Y는 공간에 대한 주기 함수이고 우함수이므로 cosine함수의 Fourier Series가 된다. 그리고 Z는 Exponential함수가 된다. 경계 조건은

$z\to\infty$ $V\to 0$이고, X, Y는 공간 주기가 각각 4a, 4b이다.

그리고 z=0일 때 V는

$V=V_o L(x)L(y)$라 하고 L(x)는 근사적으로 그림 6와 같이 가정한다. L(y)는 그림 6에서 x를 y로 a를 b로 바꾸면 동일하다.

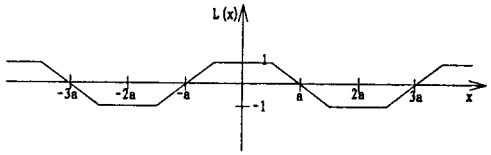

그림 6 L(x)

이를 이용하여 풀면

$$V=\sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty}V_{mn}\cos\frac{(2m+1)\pi}{2a}x\cos\frac{(2n+1)\pi}{2b}y\,e^{-\alpha_{mn}z} \qquad (6)$$

$$\alpha_{mn}=\frac{\pi}{2}\sqrt{\left(\frac{2m+1}{a}\right)^2+\left(\frac{2n+1}{b}\right)^2} \qquad (7)$$

$$V_{mn}=\frac{64V_0}{(2m+1)^2(2n+1)^2\pi^4}\left\{\cos\frac{(2m+1)\pi}{4}-\cos\frac{3(2m+1)\pi}{4}\right\}\times\left\{\cos\frac{(2n+1)\pi}{4}-\cos\frac{3(2n+1)\pi}{4}\right\} \qquad (8)$$

힘의 시간 평균은 이를 이용해서 다음을 계산하면 된다.

$$\left\langle\vec{F}\right\rangle=\frac{1}{4}\varepsilon_m v\,Re\left[\chi_{eff}\right]\nabla\left|\vec{E}_{rms}\right|^2 \qquad (9)$$

이때 χ_{eff}는 주파수와 입자와 매질의 물질상수(유전률, 전도도)에 의해 결정된다[7].

4. 계산 결과

이를 실제의 경우에 맞추어 계산을 하였다. 무한급수이므로 m, n을 10까지 하여 계산하였다. V_0는 10V로 하였고 a, b는 60㎛로 하였다. $\frac{1}{4}\varepsilon_m v\,Re\left[\chi_{eff}\right]$는 3.755×10^{-24}로 하였다.

계산의 결과를 보면 전극 근처에서는 전극의 가장자리로 힘을 받는다는 것을 알 수 있다. 전극의 모양 설계는 이것을 고려하여 원하는 장소에 입자를 붙이기 위해서 하여야 한다.

그림 7은 전극으로부터 10㎛ 떨어진 xy 평면에서 구한 힘을 나타낸다. 이것은 전극의 중앙점(0㎛, 0㎛, 10㎛)에서부터 절연물의 space의 중간점(60㎛, 60㎛, 10㎛)까지를 나타 낸 것이다. 그림에서 전극의 가장자리는 x, y 각각 30㎛되는 지점이 된다. Fx, Fy, Fz의 양의 방향은 x, y, z의 양의 방향과 같다. 이것을 보면 전극의 가장자리로 힘을 받는다는 것을 알 수 있다.

전극으로부터 전극의 폭 정도 크기만큼 떨어진 곳에서부터는 아래 방향으로 힘을 받는다. 이 때는 힘의 크기가 z의 지수 함수적으로 감소하는데 이 감쇄 상수가 전극의 공간 주기에 의해서 결정되기 때문이다. 그러므로 이러한 지역을 고려할 때는 전극의 공간 주기를 잘 선택하면 된다.

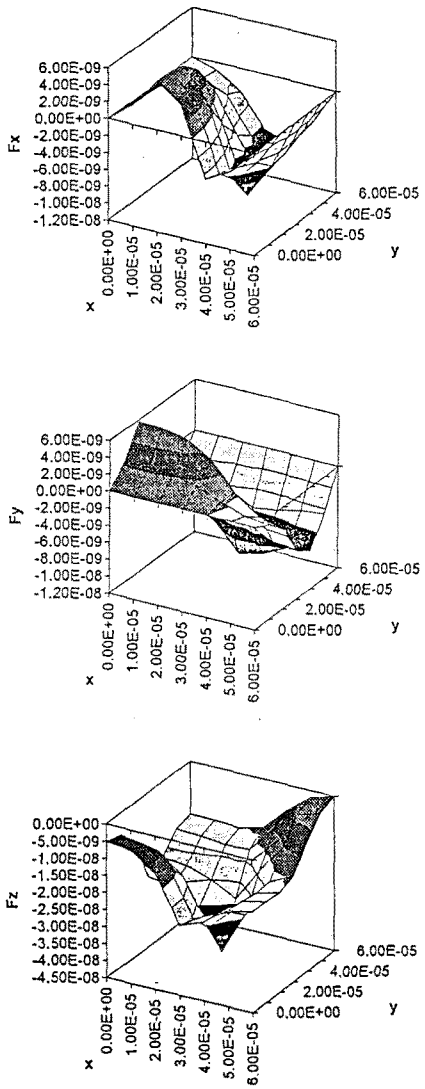

그림 7 전극 근처(z방향으로부터 10μm 위)에서의 힘

5. 결론

입자와 세포 분리 장치를 n형 기판 위에 Polyimide와 도금 공정으로 제작하였다. Polyimide를 RIE로 수십μm식각하고 도금을 하여 구조물을 만드는 것이 가능하였다. 분리기의 전계 해석을 위한 수학적 모델을 제시하고 이를 토대로 입자에 미치는 힘을 해석하였다. 힘이 미치는 범위는 전극의 공간 주기에 영향을 받는다는 것을 알 수 있었고, 입자가 붙는 위치는 전극의 가장자리라는 것도 알았다.

참고문헌

[1] H. A. Pohl, Dielectrophoresis, Cambridge University Press, 1978.

[2] Senichi Masuda, Masao Washizu & Toshiyuki Nanba, 'Novel Method of Cell Fusion in Field Constriction Area in Fluid Integrated Circuit', IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 25, No. 4, pp. 732-737, July/August 1989.

[3] Masao Washizu, Toshiyuki Nanba & Senichi Masuda, 'Handling Biological Cells Using a Fluid Integrated Circuit', IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 26, No. 2, pp. 352-358 March/April 1990.

[4] Gunter Fuhr, Stefan Fiedler, Torsten Muller, Thomas Schnelle & Henning Glasser, 'Particle Micromanipulator Consisting of Two Orthogonal Channels with Traveling Wave Electrode Structures', Sensors and Actuators A, 41-42, pp. 230-239, 1994.

[5] Masao Washizu, Seiichi Suzuki, Osamu Kurosawa, Takeshi Nishizaka and Tusuneo Shinohara, 'Molecular Dielectrophoresis of Biopolymers', IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30, No. 4, pp. 835-843, July/August 1994.

[6] Chong H. Ahn & Mark G. Allen, 'A Fully Integrated Micromachined Magnetic Particle Manipulator and Separator', Proc. of International Workshop on Micro Electromechanical Systems, pp. 91- 96, 1994.

[7] I. Turcu & C. M. Lucaciu, 'Dielectrophoresis:A Spherical Shell Model', J. Phys. A:Math. Gen. 22 (1989) pp. 985-993, Printed in the UK.

[8] Peter R. C. Gascoyne, Jamileh Noshari, Frederick F. Becker and Ronald Pethig, 'Use of Dielectrophoretic Collection Spectra for Characterizing Differences between Normal and Cancerous Cells', IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30, No. 4, pp. 829-834 July/August 1994.