

릴레이 제어법을 이용한 실리콘 웨이퍼의 정전부상에 관한 연구

전종업#, 이상욱*

Electrostatic Suspension System of Silicon Wafer using Relay Feedback Control

Jong Up Jeon# and SangUk Lee*

ABSTRACT

A simple and cost-effective method for the electrostatic suspension of thin plates like silicon wafers is proposed which is based on a switched voltage control scheme. It operates according to a relay feedback control and deploys only a single high-voltage power supply that can deliver a DC voltage of positive and/or negative polarity. This method possesses the unique feature that no high-voltage amplifiers are needed which leads to a remarkable system simplification relative to conventional methods. It is shown that despite the inherent limit cycle property of the relay feedback based control, an excellent performance in vibration suppression is attained due to the presence of a relatively large squeeze film damping origination from the air between the electrodes and levitated object. Using this scheme, a 4-inch silicon wafer was levitated stably with airgap variation decreasing down to 1 μm at an airgap of 100 μm .

Key Words : Electrostatic suspension(정전부상), Silicon wafer(실리콘웨이퍼), Relay control(릴레이제어), Squeeze film effect(스퀴즈필름효과)

1. 서론

자기부상의 경우 그 대상이 자성체에 국한되는 데 비하여 정전부상은 도체나 반도체, 유전체등 다양한 종류의 물질을 직접 부상할 수 있는 장점이 있다. 이러한 장점에도 불구하고 정전부상에 관한 연구나 산업현장에의 적용에는 그다지 많지 않다. 이는 정전력에 의한 부상력이 자기력에 비해 상대적으로 매우 작기 때문이다. 정전부상에 있어서 부

상력은 부상체와 작은 간격을 두고 마주보고 있는 전극을 이용하여 부상체에 전기장을 가함으로써 얻어진다. 이때 최대 정전력, 즉 부상력의 크기는 부상체와 전극간에 존재하는 매체의 절연파괴에 의해 제한된다. 파센(Paschen)에 의하면 대기환경에서 두 물체간에 절연파괴가 발생하는 전계의 크기는 약 3 kV/mm 이다.¹ 이로부터 정전력에 의한 단위 표면적당의 최대 힘의 밀도를 계산하면 약 40 N/m² 이 얻어진다. 이는 자기력(자기포화가 자

접수일: 2004 년 10 월 12 일; 게재승인일: 2005 년 06 월 29 일

교신저자: 울산대학교 기계자동차공학부

E-mail: jujcon@ulsan.ac.kr Tel: (052) 259-2139

* 울산대학교 대학원 기계자동차공학과

속밀도 1 T 에서 발생한다고 가정하면 약 $3.98 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ 에 비해 상당히 작은 값을 알 수 있다. 그러나 이러한 작은 부상력에도 불구하고 정전력은 판상체(板狀體)나 중공체(中空體), 입자, 저밀도의 물체 등과 같이 그 중량 대비 표면적 비율이 큰 물체에 대하여는 실용적으로 사용 가능한 충분한 부상력을 발휘한다.

1964 년에 Knoebel² 은 폴라리스 잠수함용 항법 안내장치로서 정전부상형 진공자이로를 개발하였다. 회전자는 질량이 25 g 이고, 외경이 50.8 mm, 재질이 알루미늄인 구형상의 중공체이었다. 한편, Kumar³ 등은 마이크로 모터나 마이크로 액추에이터의 마찰문제를 해결하기 위해 정전력에 의한 회전자의 비접촉 지지기구를 제안하였다. 이때 사용된 회전자는 그 표면에 동막이 증착된 크기 $22 \times 22 \times 0.18 \text{ mm}^3$ 인 현미경 커버 슬릿이었다. Rhim⁴ 등은 1993 년에 전기장이 샘플온도에 영향을 받지 않는 것에 착목하여 고온 고진공 환경 하에서의 물질연구에 정전부상을 이용하였다. 그들은 직경 약 2.5 mm, 온도 2250 K 인 용융상태의 질코니움 샘플을 정전력을 이용하여 비접촉 지지하였다. 최근 들어 저자들은 반도체 제품이나 LCD, PDP 등의 제조공정에 사용하기 위한 비접촉 지지기구의 개발을 목표로 4 인치와 8 인치 실리콘 웨이퍼⁵⁻⁷, 크기 $100 \times 100 \text{ mm}^2$ 와 직경 100 mm 인 유리판넬⁸⁻¹⁰ 등을 정전력을 이용하여 부상하는데 성공하였다. 이때 이용한 부상원리는 자기부상의 원리와 유사하다. 즉, 부상체의 바로 위에 전극을 배치하고 이 전극에 수백 V~수 kV 의 전압을 가하여 부상체에 정전부상력을 발생시킨다. 이때 이 정전력을 능동적으로 제어하지 않으면 부상체의 운동은 불안정한 거동을 보이므로 자기부상과 같이 부상체의 위치와 자세를 아날로그식 변위센서를 이용하여 측정하고, 이를 피드백(feedback)하여 전극에 인가되는 전압을 능동제어함으로써 부상체 운동의 안정화를 도모한다. 피드백 제어기로는 PID(Proportional-Integral-Derivative) 제어기를 사용하였으며 충분한 부상력을 얻기 위한 고전압을 발생하기 위해 증폭률 1000 인 고전압 증폭기를 사용하고 있다.

이러한 종래의 정전부상 시스템의 주된 단점은 제어기의 구성요소, 특히 고전압 증폭기가 상대적으로 크고 고가인 점이다. 또한, PID 제어기와 같은 안정화 제어기나 아날로그식 변위센서도 그다지 저가는 아니다. 본 연구에서는 낮은 비용으로 부상

체의 안정부상이 실현 가능한 릴레이 피드백 제어에 의한 정전부상에 관하여 기술한다. 고전압 증폭기는 더 이상 필요로 하지 않으며 제어될 전극수에 무관하게 단지 양/음의 일정전압을 출력하는 고전압 전원과 간단한 스위칭 회로만이 필요할 뿐이다. 또한 본 연구에서는 부상체의 위치를 검출하기 위해 아날로그식 변위센서를 이용하였으나(본 연구에서 아날로그식 변위센서를 사용한 이유는, 부상 후의 부상체의 움직임을 고분해능으로 자세히 관찰하기 위해서임) 이는 물체가 기준 거리보다 멀고 가까움에 따라 단지 ON, OFF 신호만을 출력하는 근접스위치로도 충분하다.

본 논문에서는 우선, 릴레이 제어에 의한 계의 안정화 원리에 대하여 설명하고, 부상체가 도체인 경우에 대하여 수행한 시뮬레이션 결과에 대하여 기술한다. 그 후 실리콘 웨이퍼의 정전부상에 적합한 전극구조와 실험장치, 그리고 부상실험 결과에 대하여 기술한다.

2. 릴레이 제어에 의한 계의 안정화

이 절에서는 릴레이 제어법에 의한 계의 안정화 원리에 관하여 1 자유도 모델을 이용하여 설명한다. 부상체는 도체(실리콘 웨이퍼도 도체로 가정)이고 원형상의 판상체로 가정한다.

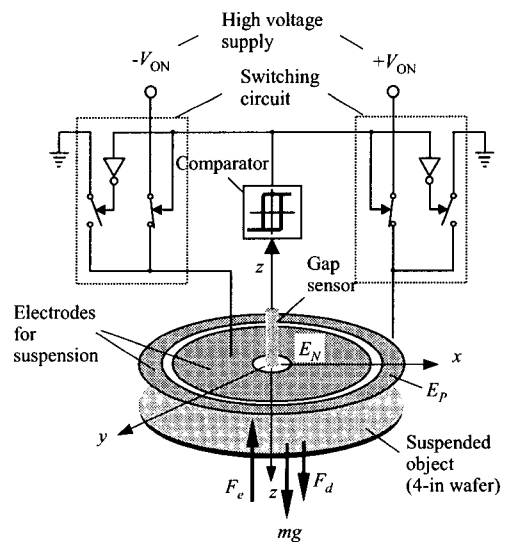


Fig. 1 Electrostatic suspension system with one degree of freedom

2.1.1 자유도 제어용 전극구조

Fig. 1 에 나타난 바와 같이 전극은 링 형상의 전극 E_p , 그리고 이와 동일 면적을 갖는 원형상의 전극 E_N 으로 구성된다. 전극 E_p 의 외경은 부상체의 외경과 같으며 전극 E_N 의 중심부에는 부상 간격(gap)을 측정하기 위한 변위센서가 장착되어 있다. 전극 E_p 와 E_N 에 전압이 인가될 때 동일 절대값을 갖는 반대극성의 전압이 각각에 인가되어 부상체의 전위는 항상 영볼트를 유지하게 된다. 이로 부터 전극과 부상체간에 전위차가 발생하고 따라서 부상체에 정전부상력이 가해진다.

2.2.1 자유도 제어계의 구성 및 제어방법

본 논문에서는 가능한 한 저가의 시스템을 구현하기 위해 Fig. 1 에 나타난 바와 같이 지극히 간단한 형태의 릴레이 제어기를 구성하였다. 아날로그식 변위 센서를 이용하여 검출된 부상 간격 z 는 비교기에 입력되고 비교기에서는 이 입력된 부상 간격 z 와 목표 간격 z_0 를 비교하여 스위칭 회로에 스위칭 신호를 내보낸다. 스위칭 회로에서는 이 스위칭 신호에 근거하여 직류 고전압 전원으로 부터 발생한 고전압 $+V_{ON}$ 과 $-V_{ON}$ 을 각각 전극 E_p 와 E_N 에 공급하거나 차단하여 부상체를 안정부상시킨다. 즉, 전극에의 인가전압 V 는 다음과 같이 제어된다.

$$V = V_{ON} (-V_{ON}) \text{ for } z > z_0 + \Delta$$

$$V = 0 \text{ for } z < z_0 - \Delta$$
(1)

여기서, Δ 는 불감대의 폭으로 이는 비교기의 설계 시 의도적으로 설정되거나 스위칭 소자등에 존재하는 스위칭 시간지연에 의해서 발생한다. 이 불감대의 폭 Δ 는 정상상태에 있어서의 부상체의 진동과 스위칭 소자의 수명에 밀접하게 관계한다. 불감대의 폭 Δ 가 클수록 스위칭 주파수는 작아져 스위칭 소자의 수명은 연장되나 그 대신 부상체의 진동이 커지게 된다. 본 연구에서는 비교기에 있어서 불감대를 설정하지 않았으나 고전압 스위칭 소자에 내재하는 스위칭 시간지연등으로 인해 불감대가 발생하였다.

2.3 안정화의 원리

제어대상에 댐핑력이 존재하지 않는 본래 불안정한 시스템에 전술한 바와 같은 간단한 형태의 릴레이 제어법칙을 적용하면, 스위칭 소자 등 제어 요소에 반드시 존재하는 불감대 등의 여러 가지

요인으로 인해 계는 불안정한 리미트 사이클(limit cycle)의 거동을 보인다. 즉, 식(1)의 전압에 의한 정전력과 부상체의 중량만이 부상체에 작용하면 그 운동은 불안정하게 된다. 그러나 정전부상이 대기환경에서 행하여 질 경우에는 상대적으로 큰 공기 댐핑력(air film damping force)으로 인해 부상체의 운동은 안정된 리미트 사이클을 형성하게 된다. 즉, 부상체가 전극에 대하여 상대적인 축방향 또는 틸팅운동을 하면 전극과 부상체 사이에 공기의 출입이 발생하고 이로 인해 부상체에 댐핑력이 가해진다. 통상, 정전부상 시스템에 있어서는 부상 간격이 부상체의 면적에 비해 현저히 작기 때문에 이 공기의 스퀴즈 필름 효과에 의한 댐핑력은 상당히 크다. 이 댐핑력이 부상체의 운동에 안정성을 부여하며, 따라서 정전부상 시스템에 식(1)과 같은 저가의 릴레이 제어법칙을 적용하는 것이 가능하게 된다.

한편, 전술한 예에서는 두개의 전극에 전압을 인가할 때 동일 절대값을 갖는 반대극성의 전압을 각각에 인가하였으나 특히 부상체의 전위를 영볼트로 유지할 필요가 없는 경우에는 하나의 전극은 항상 접지시키고 다른 하나의 전극의 전압만을 부상 간격에 근거하여 제어하여도 된다. 그 경우 고전압 전원은 한 개로 충분하고, 따라서 부상계는 더욱 저가로 구성되어 진다. 게다가 상기에서는 부상체의 위치를 측정하기 위해 아날로그식 변위 센서를 사용하였으나 이 센서와 비교기를 근접스위치(proximity type of sensors)로 대체할 수 있다. 이 경우 부상계의 비용은 한층 더 낮아진다.

3.1 자유도 부상계의 모델링 및 시뮬레이션

3.1 운동방정식

부상체의 전기적 저항을 무시하고 전기장이 부상체와 전극 사이에만 존재하며 균일(homogeneous)하게 분포되어 있다고 가정하면 부상체에 작용하는 정전 흡인력 F_e 는 다음과 같다.

$$F_e = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_s A \left(\frac{V}{z} \right)^2$$
(2)

여기서, ϵ_0 , ϵ_s , A 는 각각 진공의 유전율(=8.854×10⁻¹² F/m), 전극과 부상체간 매질의 비유전율(공기≈1), 전극과 부상체간 중첩부분의 면적이다. 상기 식으로부터 정전 흡인력 F_e 는 부상 간격 z 의 제곱에

반비례하는 것을 알 수 있다. 따라서 전극에 일정 전압을 가하는 경우 정전력을 이용한 시스템은 불안정한 거동을 나타내고 이를 안정화하기 위해서는 피드백 제어를 이용하여 전압 V 를 능동적으로 제어하여야 한다.

부상체가 원형상인 경우 대기중에서 부상체에 작용하는 댐핑력 F_d 는 다음과 같다 (부록 A1 참조).

$$F_d = -\frac{3\pi\eta r_0^4}{2z^3} \frac{\partial z}{\partial t} \quad (3)$$

여기서, η , r_0 는 각각 공기의 점도($=18 \times 10^{-6}$ Ns/m²), 부상체의 반경이다. 이 댐핑력이 앞 절에서 설명한 바와 같이 계의 안정화에 기여하는 힘이다. 4 인치 실리콘 웨이퍼를 간격 0.3 mm로 부상시킬 때 진폭 5 μ m, 주파수 120 Hz의 진동이 발생하였다고 하면 (이는 실험에 의한 데이터이다) 상기 식으로부터 댐핑력의 진폭을 계산하면 약 0.047 N(4.8 gf)정도가 얻어진다. 웨이퍼의 중량이 약 9.1 gf인 것을 고려하면 댐핑력이 상당히 큰 것을 알 수 있다. 식(3)에서 알 수 있듯이 이 댐핑력은 부상 간격의 3승에 반비례하기 때문에 부상 간격을 줄임으로써 댐핑력은 현저하게 증가한다.

상기의 식(2)와 (3)을 이용하여 질량이 m 인 부상체의 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = mg - \frac{3\pi\eta r_0^4}{2z^3} \frac{\partial z}{\partial t} - \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_s A \left(\frac{V}{z} \right)^2 \quad (4)$$

식 (1)과 식(4)는 릴레이 피드백제어를 행하였을 때의 부상체의 비선형 운동방정식이다.

Table 1 Simulation conditions

Parameters		Condition #1	Condition #2
Initial gap z_i (mm)		0.33	0.11
Desired gap z_0 (mm)		0.3	0.1
Voltage V_{ON} (kV)		0.8	0.26
Time delay τ (ms)		0	0.5
Wafer	Radius r_0 (mm)	50	
	Mass m (g)	9.1	
	Thickness (mm)	0.5	

3.2 시뮬레이션 및 그 결과

부상체가 4 인치 실리콘 웨이퍼인 경우에 대하여 MATLAB의 SIMULINK를 이용하여 시뮬레이

션을 수행하였다. Table 1은 시뮬레이션 조건이다. 초기 간격 z_i 는 $z_i = z_0 \times 1.1$ 과 같이 설정하였고 전압 V_{ON} 은 초기 간격에 있어서의 바이어스 전압의 1.5배로 설정하였다. (부록 A2 참조)

조건 1에 있어서 우선 스위칭 시간지연이 없는 경우($\tau=0$)에 대하여 시뮬레이션을 행한 결과 정상상태에 있어서 리미트 사이클의 진폭은 약 0.03 μ m이었다. 이 결과로부터 공기에 의한 댐핑력이 부상체의 진동을 억누르는데 충분히 큰 것을 알 수 있다. Fig. 2(a)는 조건 1에 있어서 스위칭 시간지연을 고려하여 시뮬레이션을 행한 결과이다. 시간지연의 크기는 본 논문에서 제작한 스위칭 회로에 맞추어 0.5 ms로 설정하였다. 그림으로부터 약 4 μ m 진폭의 리미트 사이클이 발생하는 것을 알 수 있다. 전술한 것처럼 부상 간격을 작게 함으로써 공기의 댐핑력은 현저하게 증가한다. Fig. 2(b)는 부상 간격이 0.1 mm인 조건 2의 경우에 대하여 시뮬레이션을 행한 결과이다. 정상상태에 있어서의 리미트 사이클의 진폭이 약 0.1 μ m로 억제됨을 알 수 있다. 이와 같이 부상 간격을 작게 함으로써 스위칭 시간지연이 존재함에도 불구하고 부상체의 진동을 미크론 이하로 억제할 수 있다.

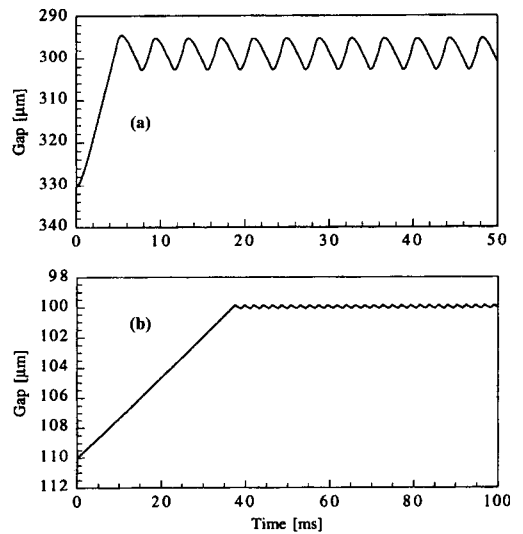


Fig. 2 Simulation results for (a) condition #1($\tau=0.5$ ms) and (b) condition #2

4. 다자유도 운동제어 및 전극구조

4.1 다자유도의 안정화

정전부상 시스템에 있어서, 판상체의 경우, 그 넓은 면에 있어서는 그 면에 대항하도록 다수의 전극을 배치하고 이들 전극에 인가되는 전압을 능동적으로 제어한다. 이로부터 부상체의 축방향 운동(z 축)과 수평면내의 2 축(x, y 축)에 대한 회전운동, 즉, 피칭, 롤링운동의 안정화를 도모한다. 반면, 부상체의 측면에 있어서는, 부상체의 x, y 운동을 능동 제어하기 위해 측면에 대항하도록 전극을 배치하여 전압을 인가하여도 부상체 측면의 면적이 대단히 작기 때문에 큰 정전력을 얻을 수 없고 제어계만 복잡하여질 뿐이다. 따라서 본 연구에서는 부상체의 x, y 운동의 안정화에 수동안정성을 이용한다. 즉, 전극들에 의해 형성되는 전극 패턴의 외곽형상과 그 크기가 부상체의 그것과 동일하고 전극들을 부상체의 상부에 배치하면, 부상체의 x, y 운동은 정전장의 프린지필드(fringe field) 효과에 의해 수동적으로 구속되어 안정된 거동을 보인다.¹¹

4.2 다자유도 안정부상을 위한 전극구조

Fig. 3 은 실리콘 웨이퍼와 같은 원형상 판상체의 정전부상에 적합한 전극구조를 나타낸다. 전극은 각각 2 개의 전극으로 구성되는 3 개의 전극그룹으로 나뉘어져 각 전극그룹은 각각 부상체에 정전력을 인가하기 위한 하나의 액추에이터로서 작용한다. 그림에 있어서 전극 E_{ip} 와 E_{in} 이 하나의 전극그룹 i 를 형성한다. 단 $i=1,2,3$ 이다. 전극 E_{ip} 와 E_{in} 은 동일면적이고 또 이들 전극에 전압이 인가될 때 서로 반대극성의 같은 절대치를 갖는 전압이 인가되어 부상체의 전위는 영볼트를 유지하도록 되어 있다. 전극 E_{ip} 와 E_{in} 의 면적중심점은 일치하고 그 면적중심점에는 변위센서가 설치되어 있다. 또, 전극 E_{1p} 와 E_{2p} , E_{3p} 에 의해 형성되는 원의 외경은 부상체의 직경과 같다.

각 전극그룹에의 인가전압은 다른 전극그룹과 독립해서 제어된다. 즉 전극 E_{ip} 와 E_{in} 에의 인가전압의 공급 또는 차단은 변위센서 i 로부터 검출한 부상 간격 신호만에 의해 제어된다. 제어방법은 1 자유도 모델에 있어서 설명한 바와 같다. 한편 본 연구에서는 전극에 전압이 인가될 때, 전극 E_{ip} 에는 양전압을, 전극 E_{in} 에는 음전압을 인가하였다.

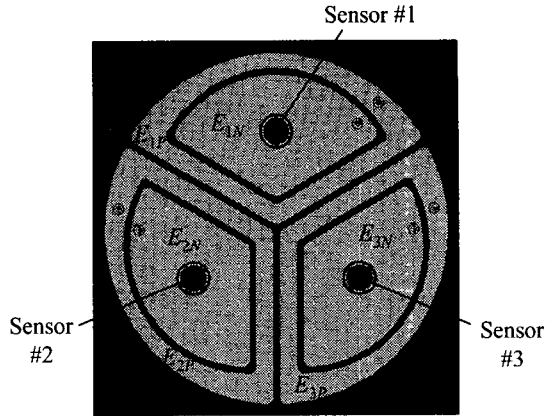


Fig. 3 Electrode pattern for the suspension of a circular-shaped object like silicon wafer

5. 실험결과 및 고찰

5.1 실험장치

Fig. 4 는 실험장치 기구부의 개략도이다. 전극판과 부상체는 각각 3 개의 마이크로미터 위치결정 스크류에 의해 지지되어 수평도 조정 및 초기 간격 설정이 행하여 진다.

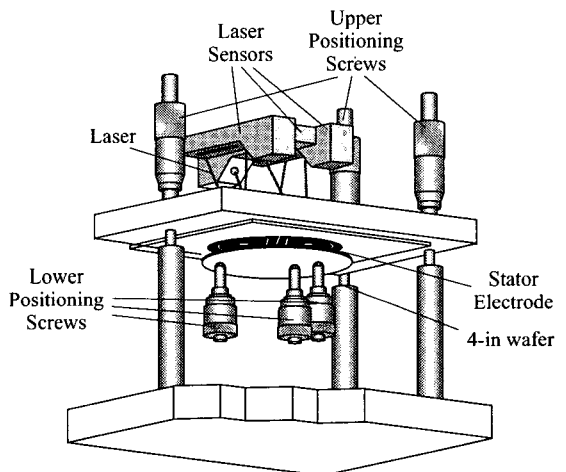


Fig. 4 Schematic drawing of experimental apparatus

4 인치 실리콘 웨이퍼의 부상실험을 수행하기 위해 Fig. 3 의 전극패턴을 갖는 고정자 전극을 제작하였다. Fig. 5 는 제작한 고정자 전극의 사진이

다. 전극은 유리에폭시 기판상에 35 μm 의 동막이 부착된 감광기판을 이용하여 에칭기법으로 제작하였다. 각 전극의 면적은 11.42 cm^2 이다. 변위센서로는 전반사식 레이저센서를 이용하였다. Fig. 6 은 실험장치의 사진이다.

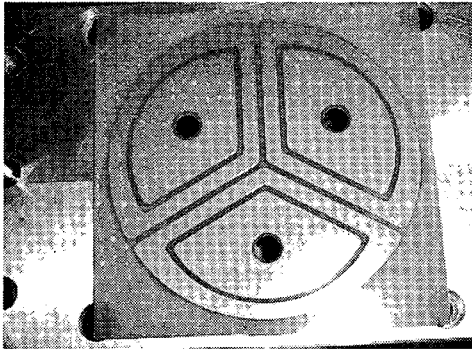


Fig. 5 Photograph of the stator electrode

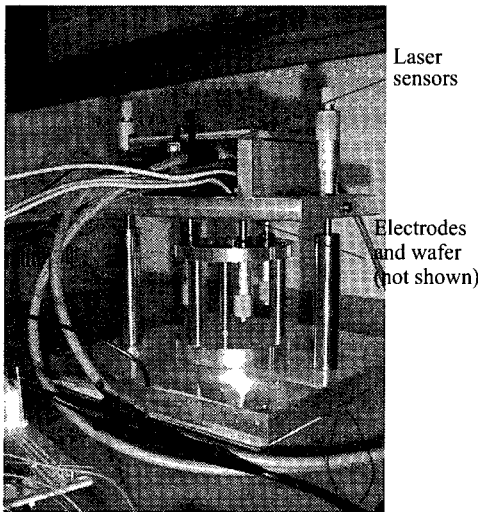


Fig. 6 Photograph of the experimental apparatus

제어기에 있어서 스위칭 소자로는 반도체 릴레이(Matsushita 전공(電工)의 Photo-MOS Relay AQV258)를 사용하였다. 이 스위칭 소자의 내압은 1.5 kV 이다. Fig. 7 은 제작한 릴레이 제어기를 테스트한 결과이다. 비교기에 있어서 불감대의 폭은 0 으로 설정하였으며 테스트용 입력신호로써는 진폭 50 mV, 주파수 250 Hz 의 정현파를 사용하였다. 출

력전압에는 비교기에 있어서의 불감대의 폭이 0 임에도 불구하고 약 0.5 ms 의 스위칭 시간지연이 존재한다. 본 실험에서 이용한 반도체 릴레이의 동작시간은 0.35 ms 로 상당히 큰 값을 가지며 이것이 스위칭 시간지연의 주 원인으로 생각된다.

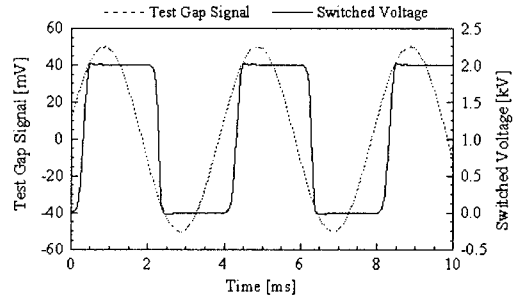


Fig. 7 Test result of switching time delay for the relay controller

5.2 실험결과 및 고찰

대기환경에서 4 인치 실리콘 웨이퍼의 부상실험을 수행하였다. 목표 간격이 0.3 mm, 전극에의 스위칭 전압이 0.8 kV(-0.8 kV)일 때, 웨이퍼는 안정적으로 부상하였으나 정상상태에서 진폭 5 μm 의 리미트 사이클을 보였다. 이와 같이 상당히 큰 진동이 발생한 것은 시뮬레이션의 결과로부터 알 수 있듯이 스위칭 회로에 존재하는 스위칭 시간지연 때문이다. 공기의 댄핑력을 증가시킴으로써 부상체의 진동을 억제하기 위해 부상 간격을 0.1 mm 로 하여 실험을 수행하였다. 스위칭 전압은 0.175 kV(-0.175 kV)이었다. Fig. 8 은 안정부상 후 센서 장착위치에 있어서의 간격의 변동을, Fig. 9 는 그 때의 전극에의 인가전압을 나타낸다. 진동의 진폭이 거의 미크론 이하로 억제되고 있음을 알 수 있다. Fig. 10 은 안정 부상상태의 실리콘 웨이퍼를 보여 주고 있다.

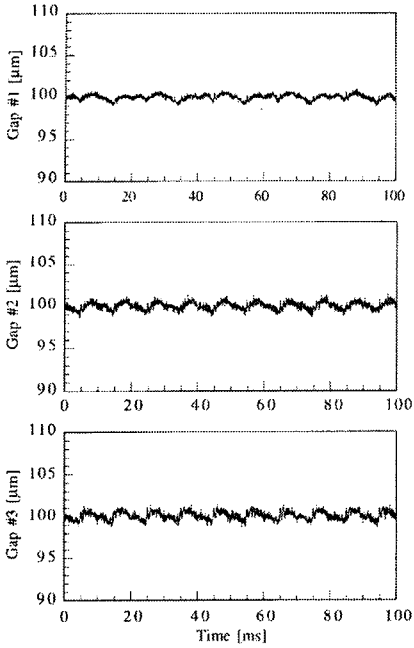


Fig. 8 Gap variations in state of suspension (gap: 0.1mm)

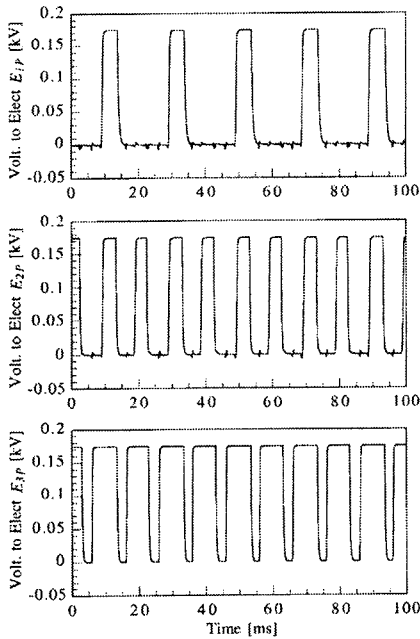


Fig. 9 Electrode voltages in state of suspension (gap: 0.1mm)

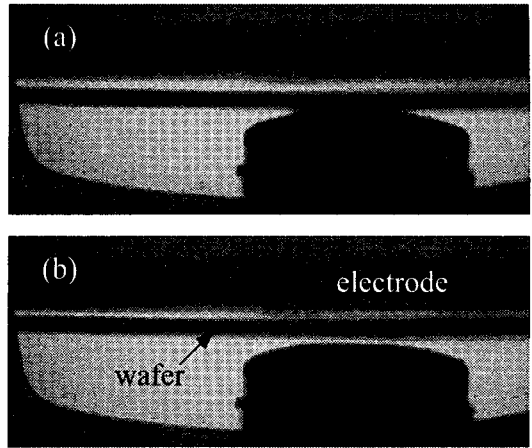


Fig. 10 Photograph showing the silicon wafer under stable suspension

6. 결론

본 논문에서는 1 자유도 모델을 이용하여 릴레이 제어에 의한 정전부상의 원리에 대해 기술하고 부상체가 도체인 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 4 인치 실리콘 웨이퍼에 대한 부상 실험을 수행하여 웨이퍼가 안정적으로 부상함을 확인하였으며, 부상 간격 0.1 mm 에서 리미트 사이클(limit cycle)의 진폭이 $1 \mu\text{m}$ 이하로 억제됨을 확인하였다. 이는 전극과 부상체간에 존재하는 공기의 댐핑력이 부상체의 안정화에 기여하기 때문이다.

릴레이 제어에 의한 정전부상계는 기존 부상계에서 필요로 하는 고전압 증폭기와 선형제어기, 아날로그식 변위센서 대신에 고전압 전원과 간단한 스위칭 회로, 근접스위치(본 연구에서는 부상 후의 부상체의 움직임을 고분해능으로 자세히 관찰하기 위해서 근접스위치 대신에 아날로그식 변위센서를 사용하였음) 등으로 구성되기 때문에 저비용의 콤팩트한 시스템 구성이 가능하다. 또한 제어장치의 구조가 간단하기 때문에 시스템의 신뢰성을 높일 수 있고 고장시의 보수가 용이하다. 릴레이 제어는 특히 알루미늄 시트나 플라스틱 시트, 종이등과 같은 유연한 물체의 정전부상시 그 유효성을 발휘한다. 유연한 물체를 안정 부상하기 위한 한가지 방법은 유연성에 준하여 전극의 수를

늘리고 각 전극에의 인가전압을 각각 독립적으로 제어하는 것이다. 이때 릴레이 제어에 있어서는 전극의 수에 비례하여 저가인 스위칭 회로와 근접스위치의 수를 늘리는 것만으로 안정부상이 가능하므로 지극히 저가의 부상시스템을 구현할 수 있다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 지역대학우수과학자지원연구(과제번호: R05-2002-000-00895-0)의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Bart, S. F., Lober, T. A., Howe, R. T., Lang, J. H. and Schlecht, M. F., "Design Considerations for Micromachined Electric Actuators," Sensors and Actuators A, Vol. 14, pp. 269 - 292, 1998.
2. Knoebel, H. W., "The Electric Vacuum Gyro," Control Engineering, Vol. 11, pp. 70 - 73, 1964.
3. Kumar, S., Cho, D. and Carr, W. N., "Experimental Study of Electric Suspension for Microbearings," IEEE/ASME J. Microelectromechanical Systems, Vol. 1, No. 1, pp. 23 - 30, 1992.
4. Rhim, W. K., Chung, S. K., Barber, D., Man, K. F., Gutt, G., Rulison, A. and Spjut, R. E., "An Electrostatic Levitator for High-Temperature Containerless Materials Processing in 1-g," Review of Scientific Instruments, Vol. 64, No. 10, pp. 2961 - 2970, 1993.
5. Jin, J., Higuchi, T. and Kanemoto, M., "Electrostatic Silicon Wafer Suspension," Proc. 4th Int. Symp. Magnetic Bearings, ETH Zürich, Switzerland, pp. 343 - 348, 1994.
6. Jeon, J. U., Jin, J. and Higuchi, T., "Electrostatic Suspension of 8-inch Silicon Wafer," Proc. Inst. Electrostat. Jpn., Vol. 21, No. 2, pp. 62 - 68, 1997.
7. Jin, J., Yih, T. C., Higuchi, T. and Jeon, J. U., "Direct Electrostatic Levitation and Propulsion of Silicon Wafer," IEEE Trans. Industry Applications, Vol. 34, No. 5, pp. 975 - 984, 1998.
8. Jeon, J. U. and Higuchi, T., "Electrostatic Suspension of Dielectrics," IEEE Trans. Industrial Electronics,

Vol. 45, No. 6, pp. 938 - 946, 1998.

9. Jeon, J. U., Jin, J. and Higuchi, T., "Rotary Actuators with Electrostatic Suspension," Proc. 5th Int. Symp. Magnetic Bearings, Kanazawa, Japan, pp. 411 - 418, 1996.
10. Jeon, J. U. and Higuchi, T., "Induction Motors with Electrostatic Suspension," J. Electrostatics, Vol. 45, No. 2, pp. 157 - 173, 1998.
11. Woo, S. J., Jeon, J. U., Higuchi, T. and Jin, J., "Electrostatic Force Analysis of Electrostatic Levitation System," Proc. 34th SICE Annual Conf., Sapporo, Japan, pp. 1347 - 1352, 1995.

부 록

A1. 원형상의 부상체에 작용하는 댐핑력

유체가 비압축성이고 층류라고 가정하면 레이놀드 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{z^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{z^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6(u_1 + u_2) \frac{\partial z}{\partial x} + 6(v_1 + v_2) \frac{\partial z}{\partial y} + 6z \left[\frac{\partial}{\partial x} (u_1 + u_2) + \frac{\partial}{\partial y} (v_1 + v_2) \right] + 12 \frac{\partial z}{\partial t}$$

단, p , u_1 , v_1 , u_2 , v_2 는 각각 압력, 부상체의 x, y 방향 이동속도, 고정자 전극의 x, y 방향 이동속도이다. 여기서, 부상체의 수직방향 운동만을 고려하면

$$z(x, y, t) = z(t), \quad u_1 = v_1 = u_2 = v_2 = 0$$

와 같고, 상기 식은 다음과 같이 간략화된다.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = \frac{12\eta}{z^3} \frac{\partial z}{\partial t}$$

이 식으로부터 압력분포 $p(x, y, t)$ 를 구하고 이를 부상체 전면에 걸쳐 적분함으로써 부상체에 작용하는 공기 댐핑력이 얻어진다. 특히 본 연구에서와 같이 부상체가 원판상인 경우에는 부상체의 대칭구조를 고려하면 상기 식의 해는 해석적으로 간단히 구해진다. 상기 식을 원통좌표계로 변환하면, 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{12\eta}{z^3} \frac{\partial z}{\partial t}$$

여기서, 압력 p 는 $p(r, t)$ 이다. 이 식을 원판의 외주 (반경 r_0)와 중심점에서의 경계조건

$$p=0 \quad \text{for } r=r_0$$

$$\frac{\partial p}{\partial r}=0 \quad \text{for } r=0$$

를 이용하여 풀면 다음과 같은 압력 분포식을 얻을 수 있다.

$$p(r, t) = \frac{3\eta(r^2 - r_0^2)}{z^3} \frac{\partial z}{\partial t}$$

이 식을 부상체의 전면에 걸쳐 적분하면 부상체에 작용하는 댐핑력 F_d 는 다음과 같이 구해진다.

$$F_d \left(z, \frac{\partial z}{\partial t}, t \right) = \int_0^{r_0} p(r, t) 2\pi r dr = -\frac{3\pi\eta r_0^4}{2z^3} \frac{\partial z}{\partial t}$$

A2. 바이어스 전압

초기 간격 z_i 에 있어서의 바이어스 전압 V_0 는 식(4)로부터 구해진다. 즉, V_0 는 다음 식을 만족한다.

$$mg - \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_s A \left(\frac{V_0}{z_i} \right)^2 = 0$$