

Photolithography용 선형 BLDC 전동기의 정밀제어

°전정우, 강도현, 김지원, 진영환, 황돈하, 박도영, 김용주

* 한국전기연구원 Mechatronics연구그룹 ** 한국전기연구원 Facts & PQ연구그룹

Precision Control of Linear BLDC Motor for Photolithography

°J.W.JEON, D.H.KANG, J.W.KIM, Y.W.JEON, D.H.HWANG, D.Y.PARK, Y.J.KIM

* Mechatronics Research Group, KERI ** Facts & PQ Research Group, KERI

Abstract - Precision control technologies are required for photolithography. The linear BLDC motor is used for the stage operations. The stage that is installed in a photolithography device is basically controlled in three directions(x, y, z axes). This paper presents precision control technologies of the linear BLDC motor in one direction by computer simulations. A position control system with linear BLDC motor is now being tested.

1. 서 론

반도체 제조를 위한 공정은 매우 복잡하고 다양하게 구성되어 있다. 그 중에서도 반도체 제조에서 상당히 중요한 공정이 바로 photolithography 기술이다. 이것은 웨이퍼 상에 회로를 구성하기 위해 미리 준비된 패턴을 기입하는 공정으로 매우 높은 정밀도를 요구하게 된다. Lithography 장비의 중요 핵심은 웨이퍼가 놓이게 되는 Stage와 Mask 필름이 장착되는 Reticle의 움직임이 일치해야 하는 것으로 아주 정밀하게 제어되어야 한다. Reticle의 경우 1축의 선형제어만 하면 되지만, Stage는 웨이퍼 상에 정밀하게 패턴이 기입될 수 있도록 X, Y, Z축은 물론 각 축의 회전까지 제어되어야 한다. 본 논문에서는 Stage 및 Reticle 정밀제어 기반 기술로서 1축의 리니어 모터를 정밀하게 제어하기 위한 Dynamics 및 제어를 모델링하였다. 특히 FEM에 의해 지속밀도를 먼저 구하여 Simulation의해 추력을 구하는 방식과 실제

로 전류에 따른 추력을 Strain Gauge로 측정된 후 그 값을 BLDC Motor Dynamics Model에 반영하여 시뮬레이션을 수행하는 방식에 대한 결과를 비교, 검토하였다.

2. 본 론

2.1 Photolithography

반도체 공정은 표 1과 같이 매우 다양하고 복잡한 공정으로 구성되어 있다. 그 중에서 Photolithography 기술은 대표적인 반도체 공정기술 중의 하나이다. 이것은 실리콘 웨이퍼상에 미리 설계된 패턴을 감광시키는 작업이다. 그림 1은 Photolithography 작업을 보여주고 있다. 패턴이 기록된 Mask를 렌즈 위쪽에 위치한 Reticle에 부착하고 감광될 웨이퍼는 렌즈 아래쪽에 위치한 Stage에 놓여지게 된다. Reticle의 경우 X축 방향으로만 이동할 수 있으며, Stage는 X축은 물론 Y축 방향으로 이동할 수 있도록 되어있다. 실제로 Photolithography를 수행하기 위해서는 Reticle 및 Stage는 수십에서 수백 nm 단위로 정밀하게 이동이 가능하여야 하며, 또한 동기제어가 가능하여야만 한다.

2.2 Photolithography용 BLDC Motor Modeling

Lithography 기법을 수행하기 위한 Stage 및 Reticle용 모터는 수백 nm 단위로 정밀하게 제어되어야 하며, 빠른응답 특성 및 소형화, 그리고 장시간 사용이 가능하여야만 한다. 따라서 상기의 조건에 의해 반도체 제조장비 분야에서는 BLDC 모터를 주로 사용하였다. 그림 2는 선정된 3상 Linear BLDC 모터에 대한 대략적인 구조를 나타낸다. BLDC 모터의 특성식은 일반 DC모터와 동일

표 1. 반도체공정

반도체 공정	내 용
Photolithography	웨이퍼상에 패턴을 감광하는 과정
Oxidation	식각된 웨이퍼에 산화처리를 하여 물리/화학적으로 Protection하는 과정
Diffusion	Wafer의 응력을 풀거나 결정 구조를 균일하게 정렬시켜 소자 표면의 영향력을 줄이기 위한 과정
Ion Implantation	반도체 소자가 원하는 전기적 특성을 가지도록 반도체 기판 위에 필요한 부분에만 고전압으로 가속된 이온을 물리적으로 주입하는 것
Thin Film	진공증착 등의 방법으로 기판위에 얇은 두께의 박판(두께 약 5micron이하)을 형성하는 것으로, 저항콘덴서 등의 소자나 혼성 집적회로를 형성하기 위한 것
Interconnection	폴리실리콘과 Al과의 접합을 위한 과정
Packaging and Yield	웨이퍼에서 추출한 칩을 포장하는 과정
Process Integration	각 공정을 소자의 특성에 맞게 Process Flow를 설계하고 제어하는 기능

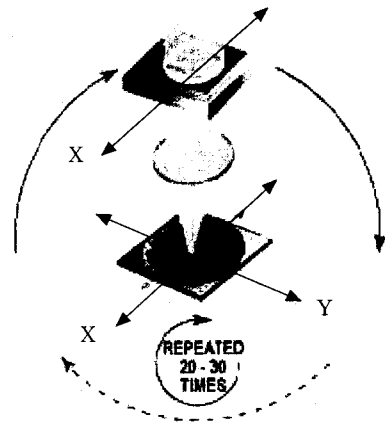


그림 1. Photolithography

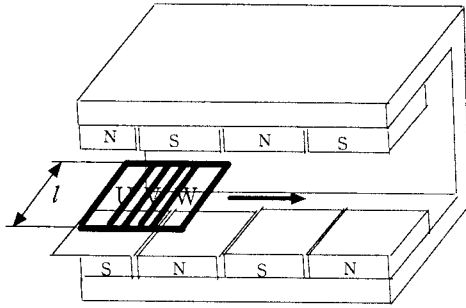


그림 2. 사용된 Linear BLDC Motor의 기본구조

하게 표현되며, 식(1)에 BLDC 모터의 상태방정식을 나타내었다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/(L-M) & 0 & 0 \\ 0 & 1/(L-M) & 0 \\ 0 & 0 & 1/(L-M) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 역기전력 $e_x(x=a, b, c)$ 은

$$e_x = K_f \dot{x} \quad (2)$$

$$K_f = P \cdot I N B_m \quad (3)$$

x = 이동거리, \dot{x} = 속도, P = 극수

l = x 와 직교한 코일 길이, B_m = 자속밀도

R = 저항, L = 자기인덕턴스, M = 상호인덕턴스

또한 Linear BLDC 모터의 운동방정식은 식 (4)와 같다.

$$M_A \ddot{x} = F - F_L - C_d \dot{x} \quad (4)$$

$$F = K_f \cdot i \quad (5)$$

M_A = Stage 질량, \ddot{x} = 가속도, F = 추력

F_L = 부하, C_d = 마찰계수

2.3 3상 Linear BLDC Motor System 기본구성

Linear BLDC 모터제어를 위한 기본적인 구성을 그림 3에 나타내었다. 크게 세부분으로 되어 있으며, 첫

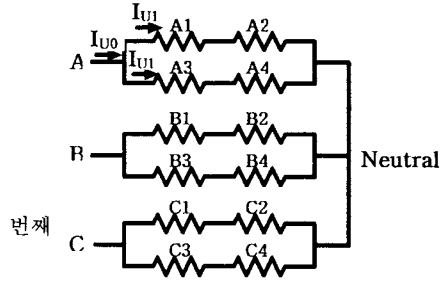


그림 4. 전기적인 회로 구성

부분은 앞에서 제시한 식을 이용하여 모터를 모델링하였고, 두 번째인 driver 부분은 전류제어기 출력에 따라 위치에 대한 3상 전류명령을 만들고, 각상별로 스위칭을 하도록 구성하였다. 마지막으로 제어부분은 PID 제어방식으로 전류제어기와 속도제어기 그리고 위치제어기로 각각 구성하였다. 본 연구에 사용된 모터의 전기적인 회로 구성은 그림 4와 같이 상당 4개의 권선을 직·병렬로 구성하였으며, 3상 단전원 중성점 비접지 방식으로 제어하는 것을 고려하였다. 모터의 각종 파라미터들을 표 2에 나타내었다. 모터의 추력을 구하기 위해 본 논문에서는 2 가지 방식으로 모델링을 하였다. 첫 번째 방식은 Linear BLDC Motor 를 그림 5와 같이 FEM 해석을 위해 모델링 한 후 자속밀도 (B_m)을 그림 6과 같이 구하였으며, 그 결과와 식(3) 및 식(5)를 이용하여 모터의 추력을 구

표 2. Linear BLDC 모터 파라미터

파라미터	값	파라미터	값
저항(R)	12.1 [Ω]	x 와 직교한 코일길이(l)	0.07 [m]
인덕턴스(L)	5.81 [mH]	코일턴수(N)	195
상호인덕턴스(M)	0.285 [mH]	Stage 질량(M_A)	0.93 [Kg]
극수(P)	1	마찰계수(C_d)	0.012
공극	0.001 [m]	영구자석 자속밀도	1.2 [T]

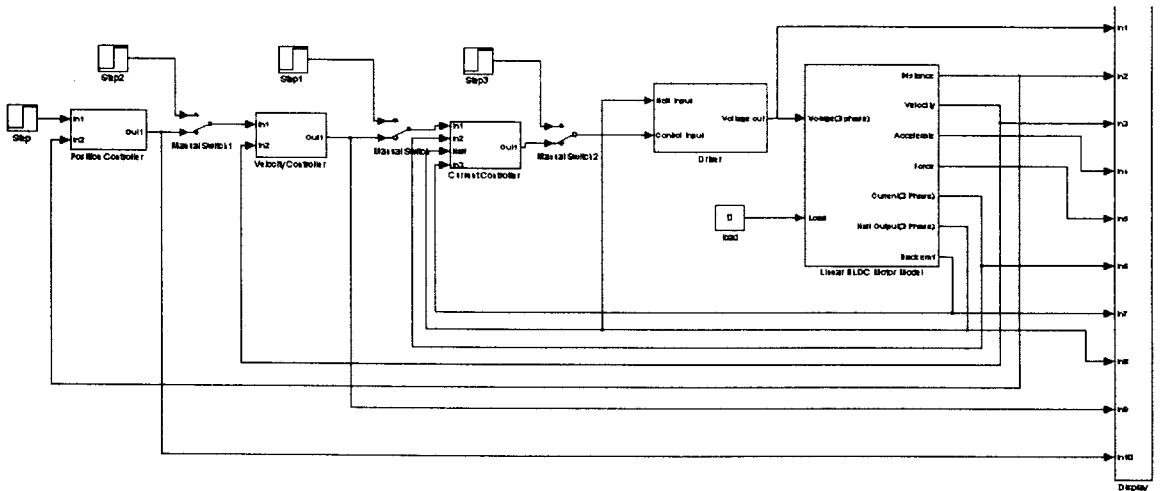


그림 3. Linear BLDC 모터 제어 System 기본구성

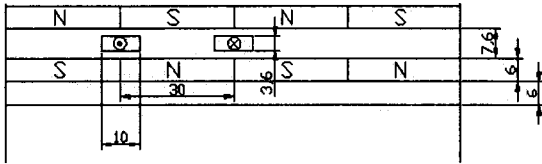


그림 5. FEM 해석 모델링

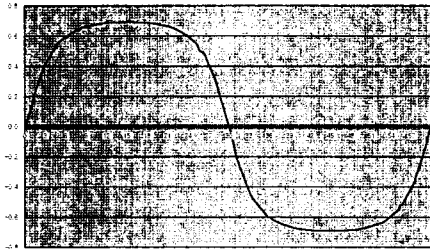


그림 6. FEM으로 해석한 자속밀도 (B_m)

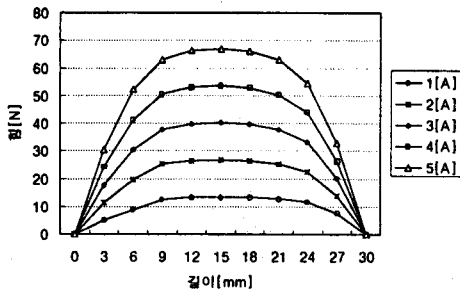


그림 7. 전류에 따라 측정된 추력

하였다. 두 번째 방식은 Strain Gauge를 이용하여 그림 7과 같이 전류에 따른 추력을 직접 측정하였다. 각각의 방식으로 구하여진 추력을 적용하여 Simulation을 수행하였다.

2.4 Simulations

그림 8과 9에 자속밀도와 측정추력에 의한 Simulation 결과를 보였다. 여기서 정밀제어를 위한 목표거리를 $1[\mu m]$ 로 하였고, 전류제어기의 입력 최대값은 $5[A]$, 속도제어기의 입력 최대값은 $3[m/s]$ 로 하고, 동일한 제어기 및 게인값을 사용하였다. 모두다 목표거리에 잘 도달하고 있음을 보이고 있다. 시뮬레이션 결과를 보면 측정추력에 의한 결과가 목표위치까지의 도달시간이 짧고, Overshoot가 상대적으로 작음을 알 수 있었다. 각각의 Simulation 결과를 표 3에 나타내었다. 향후 제어기 설계시 최대전류 및 최대전압을 고려하여, 요구되는 전류측정 정밀도 및 전압출력 정밀도는 각각 수(mA)와 수백(mV) 정도임을 알 수 있었다.

표 3. Simulation 결과

방식	최대전류 (mA)	최대전압 (mV)	최대속도 (m/s)	최대BackEMF (mV)	최대추력 (N)
자속밀도	7.77	440	1.81×10	1.83	0.118
측정추력	7.36	450	2.11×10	2.14	0.217

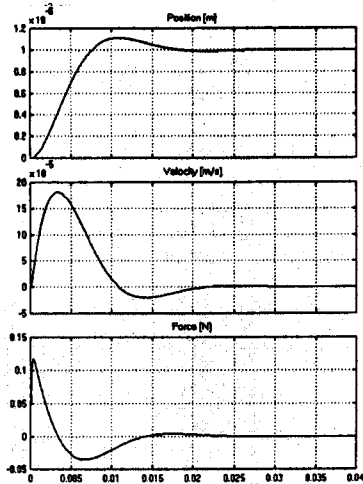


그림 8. 자속밀도에 의한 Simulation

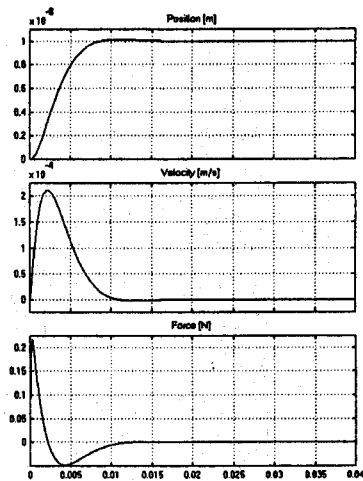


그림 9. 측정추력에 의한 Simulation

3. 결 론

본 논문에서는 반도체 제조장비 중 Lithography 장비에 사용되는 stage의 정밀제어를 위한 기반 기술로서 1축 Linear BLDC 모터의 정밀제어를 위한 Dynamics 및 제어기를 모델링 하였으며, 좀 더 실제 시스템과 유사하게 하기 위해 직접 FEM을 통하여 해석한 자속밀도와 실제 측정된 추력을 각각 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과, 측정추력을 이용한 결과특성이 좀 더 양호함을 알 수 있었다. 현재 실제 시스템을 구성하고, 설계된 제어기를 적용하여 실험중에 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] PRAGASEN PILLAY, RAMU KRISHNAN, "Modeling, Simulation, and Analysis of Permanent-Magnet Motor Drives, Part II: The Brushless DC Motor Drive". IEEE Transaction on Industry Applications, VOL.25, NO.2, pp.274-279, MARCH/APRIL 1989.