

SIL 기반 플라즈모닉 리소그래피에서 주파수 적응형 필터를 이용한 나노간극 제어의 성능향상

Improving nano gap control using frequency adaptive peak filter in Solid Immersion Lens-based plasmonic lithography

최국종*, 임 건*, 박노철†

Guk-Jong Choi, Geon Lim and No-cheol Park

(2014년 3월 13일 접수; 2014년 3월 19일 심사완료; 2014년 3월 21일 게재확정)

Abstract

Plasmonic lithography is the latest technique to overcome diffraction limit of previous optical lithography. In the plasmonic lithography, the nano gap between nano metal wave guide and photoresist should be in sub-wavelength region. SIL-based plasmonic lithography is the one of the solutions to maintain small air gap. However, the nano gap control is so sensitive that a little disturbance is able to have a large effect on the nano gap control. So, we analyzed the characteristics of disturbance, and then modified the previous controller to suppress the disturbance. We applied two peak filters which were fixed one and adaptively changeable one. We experimentally confirmed the improvement of the nano gap control, which reduced nano gap error by 30 %. The proposed control will improve the quality of lithography pattern.

Key Words : Solid Immersion Lens (SIL), air gap, near-field, frequency estimation, peak filter.

1. 서론

광 리소그래피(optical lithography)는 고집적 전자 회로의 제작에 핵심이 되는 기술로 반도체 산업에서 널리 쓰여왔다. 리소그래피 기술은 크게 두 가지 방향으로 발전되어 왔는데 공정의 속도를 개선시키는 방향과 집적도를 높이도록 얇은 패턴을 만들어 내는 방향이 바로 그것이다. 그러나 기존의 광 리소그래피는 빛의 회절한계라는 물리적 제약을 받아 패턴의 두께에 한계가 존재했다.

이를 극복하기 위해 표면 플라즈몬 공명(surface plasmon resonance)을 근접장(near field) 영역의 리

소그래피에 응용하는 연구가 진행되었다. 표면 플라즈몬 공명이란 나노어퍼처(nano aperture)를 갖는 금속 웨이브가이드에 빛을 입사시키면 어퍼처 내부의 유전체의 경계면을 따라 전자기파가 공명하는 현상으로 빛 에너지를 회절한계보다 작은 영역에 응축시키는 역할을 하게 된다. 이렇게 응축된 에너지는 전자기파의 형태로 포토레지스트에 반응하게 되며 이를 리소그래피에 응용한 기술이 바로 플라즈모닉 리소그래피이다.

플라즈모닉 리소그래피는 표면 플라즈모닉 공명의 범위가 회절한계보다 작기 때문에 금속과 포토레지스트의 거리인 나노간극(air gap)을 그만큼 작게 유지시키는 것이 중요하게 된다. 나노간극을 유지하기 위한 기존의 연구로는 air bearing 을 이용한 방식[1]과 프로브를 이용한 방식[2]이 있었다. 그 중 air bearing 방식은 하드디스크의 헤드와 디스크간의 거리를 유지시키는 방법을 응용한 것으로 매우 빠른 가공과 안정적

† School of Mechanical Engineering, Yonsei Univ.

E-mail : pnch@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-4530

* School of Mechanical Engineering, Yonsei Univ.

인 나노간극 유지가 가능하다는 장점을 가지고 있었으나 포토레지스트가 도포된 웨이퍼를 고속으로 회전시켜야하며 자유로운 패턴을 만들기 어렵다는 단점이 존재했다. 반면 프로브 방식은 프로브 끝에 해당 웨이브가이드를 제작하고 물리적으로 접촉시켜 스캔하는 방법으로 패턴의 연속성을 가능하게 만들었다. 그러나 이 방법은 10 mm/s 정도로 매우 느린 패터닝 속도와 포토레지스트 위에 보호층을 제작해야하는 번거로움이 존재했다.

이를 극복하기 위해 본 연구진들은 Solid Immersion Lens (SIL)를 이용한 플라즈모닉 리소그래피를 제안한 바 있다[3]. 이 방식은 플라즈모닉 공명을 일으키는 금속을 SIL의 바닥 내부에 가공시켜 나노간극을 능동적으로 제어가능하도록 만들었다. 따라서 기존 연구의 수동적 간극 유지에 의한 단점을 극복하여 자유로운 패턴을 형성하면서도 프로브방식에 비해 10 배 이상 빠른 패터닝이 가능하게 되었다. 그러나 이 방법은 패터닝 시 발생하는 외란에 영향을 크게 받게 된다. 여기서 나노간극 오차가 발생하게 되는데 이는 패터닝 안정성과 선평의 균일성에 악영향을 끼치게 되므로 이 오차를 되도록 작게 유지시키는 것이 중요한 문제가 된다.

나노간극 제어에서 외란의 주요 요인은 웨이퍼를 움직이는데 사용되는 리니어 스테이지가 된다. 리니어 스테이지는 고속 구동에 의해 발생하는 롤링, 피칭 등의 구조적 진동[4]을 발생시키게 되는데 이 진동들은 패터닝 위치에 따라 주파수의 영향력이 바뀌는 특성을 갖는다. 이는 선형 제어기로 극복하기가 어렵다. 따라서 주파수 분포가 바뀌는 외란에 대한 비선형적 대응이 필요하게 된다. 본 연구에서는 이러한 외란 특성을 분석하고, 간극제어 알고리즘에 병렬적으로 설계 추가 가능한 피크필터와 주파수 적응필터를 적용하여 간극오차를 줄이는 연구를 수행하였다.

2. 시스템 설명

2.1 광학 시스템

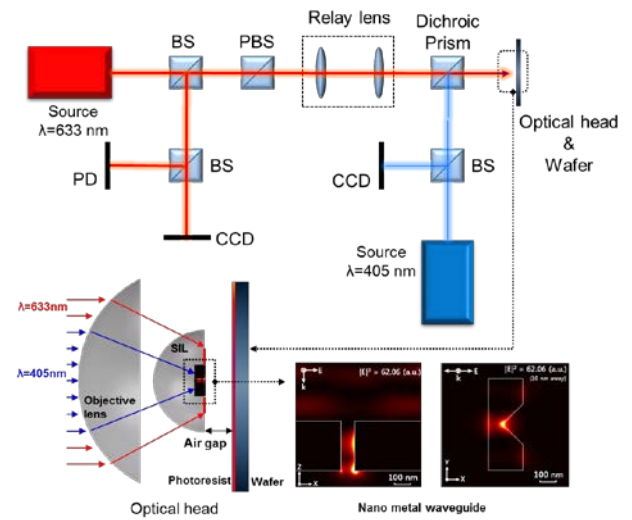


Fig. 1 SIL-based plasmonic lithography system and optical head with nano metal waveguide

SIL 기반의 플라즈모닉 리소그래피의 광학시스템은 크게 포토레지스트를 노광시킬 패터닝을 위한 부분과 나노간극 제어를 위한 부분으로 크게 나누어 볼 수 있다. Fig. 1은 이들의 관계를 전체적으로 나타내어주는 도식이다. 먼저 405 nm 레이저는 SIL 렌즈 내부에 제작된 나노 금속 웨이브 가이드에 집광된다. 이 웨이브 가이드는 그림과 같이 나노 어퍼처가 뚫려 있는 알루미늄으로 플라즈몬 공진을 일으켜 SIL의 출사면에서 전자기장이 집중되도록 하는 기능을 한다. 이때 형성된 전자기장의 세기는 Fig. 2와 같이 나노간극이 커짐에 따라 급격하게 떨어진다.

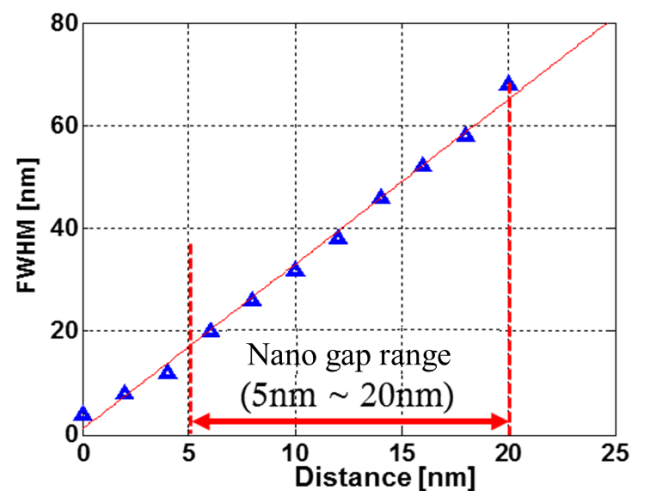


Fig. 2 Full Width Half Maximum (FWHM) of E-field at the bottom of optical head

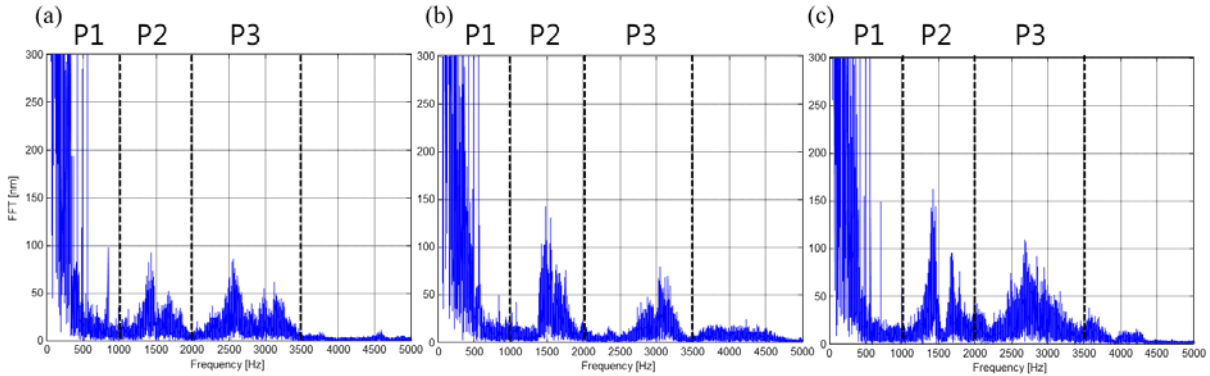


Fig. 3 Frequency spectrum of vertical motion in linear stage at three different operating points

한편 633 nm 레이저 또한 SIL의 출사면에 집광되는데 웨이브가이드의 크기보다 약간 크게 초점이 맺히도록 한다. 이때 웨이브가이드를 제외한 나머지 출사면에서 전반사가 일어나며 동시에 소멸파(evanescent wave)가 발생하게 된다. 소멸파는 회절한계 이하의 근접장 영역에서 존재하는 전자기파로 나노간극이 회절한계이상으로 떨어져 있으면 아무 효과가 없으나, 회절한계보다 작은 근접장(near field)영역으로 들어올 경우 빛을 투과시키는 작용을 한다. 이때 나노간극이 가까울수록 투과되는 빛이 많아지게 되고 반대로 전반사되는 빛은 줄어들게 된다. 따라서 반사된 빛의 세기를 측정하면 나노간극에 대한 정보를 얻을 수 있게 되고 피드백 제어가 가능하게 된다.

2.2 외란 분석

앞서 언급했듯이 나노간극 제어는 수십 나노미터 영역에서 이루어지게 된다. 따라서 외부의 작은 외란에도 민감하게 반응한다. 플라즈모닉 리소그래피의 경우, 직접 웨이퍼를 움직여가며 패터닝을 하기 때문에 웨이퍼 이송장치에서 발생하는 진동이 주요한 외란으로 작용하게 된다. 본 연구에서는 웨이퍼의 모든 면적을 빠른 패터닝이 가능하면서도 위치제어 하기에 적합한 마그네틱 리니어 스테이지 (MX80L, parker)를 사용하였다.

Fig. 3은 리니어 스테이지를 구동하며 웨이퍼면에 수직한 방향의 움직임을 주파수 도메인으로 나타낸 그래프이다. 이때 리니어 스테이지의 구동 구간을 바꾸어가며 3번 측정하였으며 측정기로는 laser doppler vibrometer를 사용하였다. 그래프를 살펴보면 P1 주파수 영역에 분포하는 저주파 움직임과 1500 Hz 정도에서 발생하는 P2 영역, 2000 Hz 이상에서 발생하는 P3 영역의 고주파 움직임이 존재한다. 특히 P3 영역은 구동 위치가 바뀌면 주파수 밴드가 달리점을 확인할 수 있다.

이에 대한 원인을 살펴보면 리니어 스테이지에

서 발생할 수 있는 외란은 크게 두 가지로 나누어 볼 수 있다. 하나는 리니어 스테이지가 구동할 때 고속 구동에 의해 발생하는 저주파 외란으로 P1 영역의 주파수 대역이 그것이다. 이 외란은 그 크기가 크지만 DC 게인이 큰 선형제어기만으로도 상당부분 해결이 가능하다. 다른 외란은 리니어 스테이지가 구조적으로 갖게 되는 진동이다 (P2, P3). 이 외란은 여러 개의 특정한 주파수 밴드로 발생하는 것을 볼 수 있으며 이는 롤링(rolling), 피칭(pitching), 요잉(yawing) 등의 리니어 스테이지가 갖는 모션오차에서 발생한 것으로 볼 수 있다. 이 모션오차는 구동위치에 따라 조금씩 미치는 영향이 바뀔 수 있어 Fig. 3의 P3 주파수 분포가 바뀌는 것을 설명할 수 있다.

리니어 스테이지의 P3 영역과 같은 움직임은 고주파 영역에 있기 때문에 P3 영역을 전부 억제 시키기에는 어려운 점이 있다. 따라서 주로 영향을 미치는 주파수를 찾아내어 해당 주파수만 억제시키는 알고리즘을 사용하는 것이 해결책이 될 수 있다.

3. 알고리즘 설명

3.1 제어 시스템

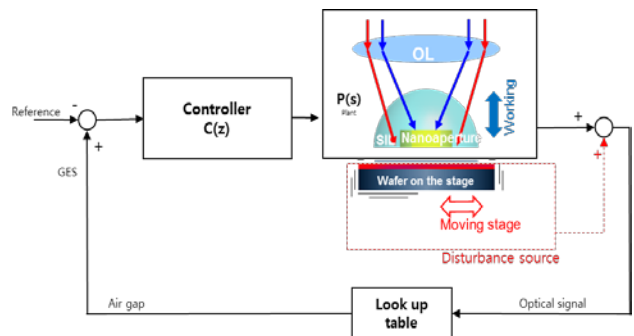


Fig. 4 Configuration of nano gap control in SIL-based plasmonic lithography

이 장에서는 나노간극 제어를 위한 시스템에 대해 소개하고자 한다. Fig. 4 는 나노 간극 제어의 블록다이어그램을 나타낸다. 여기서 플랜트는 광학헤드로 SIL 을 포함한 z 축방향의 구동기로 이루어져 있으며 DVD 광픽업(DVD optical disk drive, LG)을 사용하였다. 컨트롤러는 3 차의 리드-레그 보상기(lead-lag compensator)를 사용하여 피드백 제어를 하였다. 플랜트와 컨트롤러의 식은 다음과 같다.

$$P(s) = \frac{3.924 \cdot 10^7}{s^2 + 111.6s + 83663} \quad (1)$$

$$C(s) = \frac{88.17 (s+1.598 \cdot 10^5) (s+8813) (s+564.5)}{s (s+1.00110^5) (s+1.723 \cdot 10^5)} \quad (2)$$

이 식은 zero order holder 와 bilinear method 에 의해 z 도메인으로 변환하여 사용하였고, digital signal analyzer (CP1103 board, 샘플링: 10-5 sec, dSPACE)와 Simulink(Matlab, MathWorks)를 사용하였다. 오픈루프 주파수 응답은 figure 5 와 같으며 대역폭은 약 5 kHz, 게인마진은 15.2 dB, 위상마진은 47.7°, DC 게인은 약 100 dB 이다. 이 제어기는 리니어 스테이지가 발생시키는 저주파 외란에 매우 강건한 특성을 나타내도록 설계되었다.

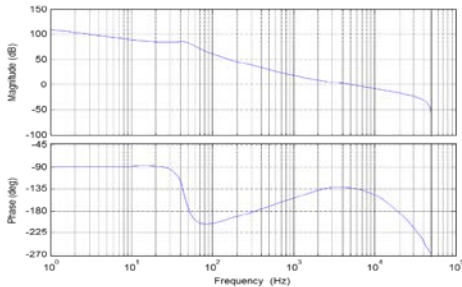


Fig. 5 Frequency response of open loop transfer function with basic controller

3.2 Add-on 피크필터

이 장에선 앞서 설계된 제어기를 기본으로 하여 오픈루프의 특성에 크게 영향을 주지 않으면서 고주파 외란에 강건하도록 Add-on 피크필터 [6]를 설계하고자 한다. 이 필터의 식은 다음과 같다.

$$F(z) = \frac{\alpha_1 z + \alpha_2}{z^2 - 2\zeta \cos \varphi z + \zeta^2} \quad (3)$$

α_1, α_2 는 실수이며, ζ 는 댐핑상수, $\varphi = \omega_c T_s$ 는 피크필터가 억제할 주파수를 의미한다. 이 필터는 기존에 설계되어 있던 제어기에 병렬적으로

적용되며 안정성, bandwidth, 마진 등에 큰 영향을 미치지 않으면서 특정 주파수의 게인을 증가시켜 주는 장점이 있다. 그러나 위상지연이 있으므로 무리하게 많은 필터를 적용할 수 없다.

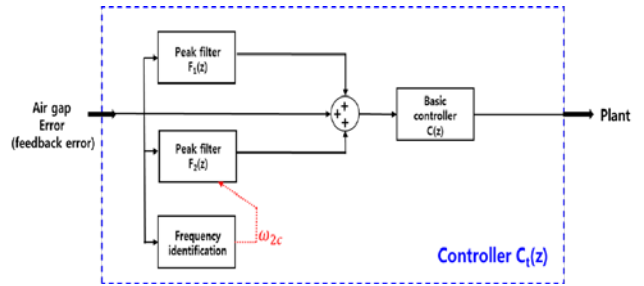


Fig.6 The controller including peak filters and frequency identification

본 연구에서는 figure 6 처럼 피크필터를 두 가지 형태로 추가하여 컨트롤러를 변경하였다. 첫 번째 필터는 주파수가 고정된 것으로 1500 Hz 의 외란을 억제할 목적으로 설계되었다. 두 번째 필터는 피크 주파수가 2000 Hz 에서 4000 Hz 까지 바뀔 수 있는 적응형(adaptive) 필터로 figure 2 의 P3 영역의 외란을 억제할 목적으로 설계되었다. 이 적응필터는 외란의 주파수를 추정하는 알고리즘과 함께 사용되어 주로 발생하는 외란의 주파수를 추종하게 하였다.

Fig. 7 은 두 필터를 적용하였을 때의 오픈루프와 외란 민감도 함수에 대한 주파수 응답을 나타낸 것이다. 적응 필터는 2200 Hz, 3000 Hz, 4000 Hz 경우로 나누어 살펴보았다. Add-on 피크필터를 추가하기 전후의 전체적인 주파수 특성은 크게 변하지 않는 것을 볼 수 있다. 이때 설정된 두 필터의 각각의 대표 게인은 0.005, 댐핑상수는 0.995 로 실험적으로 결정된 값이다.

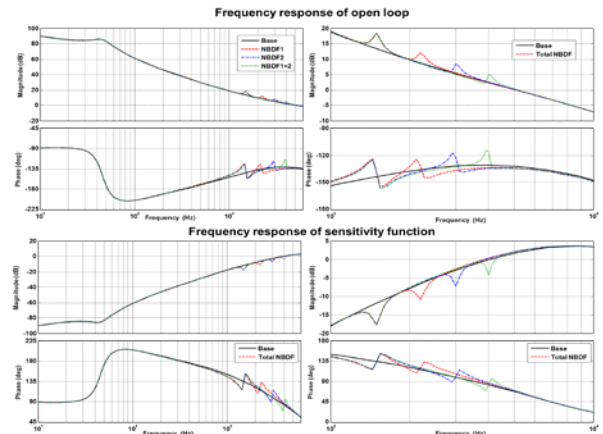


Fig.7 Frequency responses of open loop and sensitivity functions of baseline and added peak filters (1500 Hz, 2200 Hz, 3000 Hz, 4000 Hz)

3.3 주파수 추정 알고리즘

리니어 스테이지의 2000 Hz 이상 영역에서 외란의 주파수밴드가 바뀌므로 이 주파수를 파악할 알고리즘이 필요하다. 일반적으로 푸리에 변환이 널리 쓰이지만 계산량이 매우 많기 때문에 빠르게 주파수를 파악해내기 어려운 단점이 있다. 리니어 스테이지의 구동 위치가 바뀔 때마다 업데이트 시켜줘야 하므로 푸리에 변환보다 계산량이 적고 빠른 LMS(Least Mean Square) [7] 알고리즘을 사용하였다.

LMS 는 피드백 오차에 가장 큰 영향을 미치는 외란의 주파수밴드의 메인 주파수 하나를 추정하는 알고리즘이다. 이는 피드백 간극 오차를 바탕으로 이루어지는데 밴드패스 필터를 통과시켜 추정될 주파수의 범위를 제한시켜 사용하게 된다. 밴드패스 필터링이 된 오차신호를 $g_e(k)$ 라 하고 추정될 주파수 ω 를 갖는 사인함수를 $y(k) = a \cdot \cos(\omega k + \phi)$ 라고 하면 다음과 같이 수식으로 나타낼 수 있다.

$$g_e(k) = y(k) + n \quad (4)$$

$$y(k) + y(k-2) = 2y(k-1)\cos(\omega) = \theta y(k-1) \quad (5)$$

$$\theta(k) = \frac{g_e(k) + g_e(k-2)}{g_e(k-1)} \quad (6)$$

$$e(k) = g_e(k) + g_e(k-2) - \theta(k)g_e(k-1) \quad (7)$$

여기서 n 은 잡음이고, $\theta = 2\cos(\omega)$ 는 추정될 주파수를 포함한 성분이며, $e(k)$ 는 등가오차 (equivalent error)이다. 예측될 주파수를 $\hat{\theta}(k)$ 라 한다면 LMS 알고리즘에 의해 다음과 같은 식 (8)로 나타낼 수 있다.

$$\hat{\theta}(k+1) = \hat{\theta}(k) - \mu \frac{\partial e}{\partial \hat{\theta}} = \hat{\theta}(k) - \mu g_e(k+1)e(k) \quad (8)$$

여기서 μ 는 적응상수로 $\hat{\theta}(k)$ 의 빠른 수렴을 위해 지수함수적으로 수렴하도록 설정했다. 이 알고리즘을 통해 외란 주파수밴드의 메인 주파수가 추정되면 figure 6 과 같이 적응피크필터의 주파수로 사용하게 된다.

4. 실험 결과

본 연구의 목표는 나노간극 제어에서 외란에 대한 피드백 오차를 줄이는 것으로 리니어 스테이지의 외란에 강건하게 대응하고자 한다. 앞서 제안한 보상기가 변화되는 외란에도 효과가 있는지를 검증하기 위해 리니어 스테이지의 구동위치가 다른 두 곳에서 실험을 진행하였다. 실험조건은 스테이지의 구동속도가 100 mm/s, 구동 거리가

20 mm 로 하였고, 나노간극은 20 nm 로 유지하도록 하였다. 이 실험에서 사용된 피크필터는 1500 Hz 로 고정된 것과 주파수 적응이 가능한 것 두 가지를 사용하였다. 외란 주파수 추정을 위한 밴드패스필터는 2200 Hz ~ 4000 Hz 의 bandwidth 를 갖는 2 차 butterworth 필터를 사용하였고, 외란 주파수 추정은 발산할 경우를 대비하여 상한 범위를 밴드패스 필터보다 약간 높이 4200 Hz 로 제한하였다. 적응계수는 200 부터 시작하여 0 으로 감소하도록 설정했으며 0.1 초의 3 % settling time 을 갖도록 하였다.

Fig. 8 은 동일한 구간에서 기존의 제어기와 제안된 add-on 피크필터를 하나씩 추가하며 간극제어를 수행한 결과이다. Fig. 8 (a) 는 기존의 제어기만 적용한 결과로 저주파는 대부분 제거되었으며 1500 Hz 와 2500 Hz 성분을 갖는 외란이 오차에 영향을 주는 것을 볼 수 있다. Fig. 8 (b) ~ (d) 에서 각각 필터를 적용한 결과를 보면 피크필터가 적용된 주파수가 억제되고 있음을 확인할 수 있고 피드백 오차가 줄어든 것으로 보아 외란이 잘 억제 되었음을 알 수 있다. 그러나 피크필터가 추가되면서 3000 Hz 이상의 주파수 성분이 많아지는 것을 확인 할 수 있는데 이는 위상 지연에 의한 영향으로 보인다.

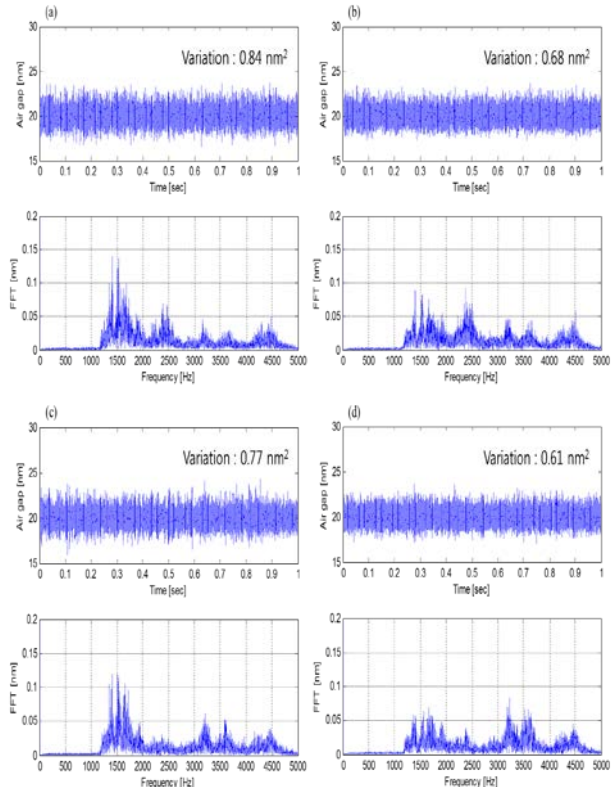


Fig.8 Controlled air gaps and their frequency spectrums (a) basic, (b) peak filter at 1500 Hz (c) adaptive peak filter, and (d) both peak filters

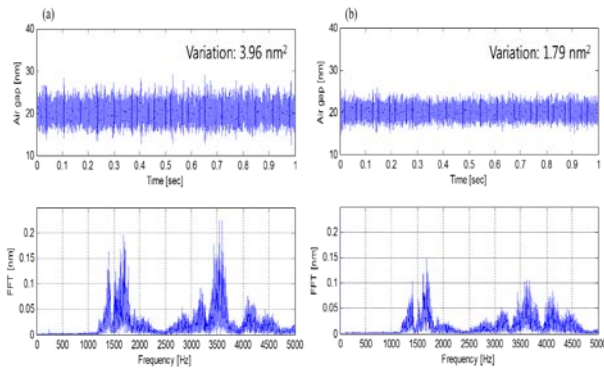


Fig.9 Controlled air gaps and their frequency Spectrums of (a) baseline (b) both peak filters

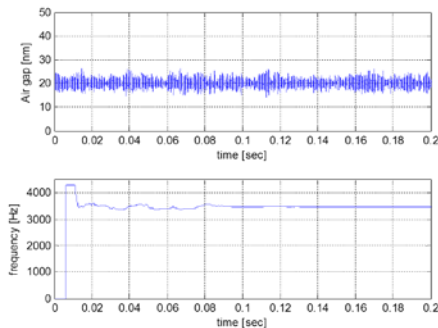


Fig.10 Controlled air gap and estimated frequency of disturbance

Fig. 9 는 스테이지의 구동 구간이 다른 곳에서 같은 조건으로 실험한 결과이다. Fig. 9 (a) 에서 기존의 제어기를 이용한 결과를 보면 외란이 1500 Hz 와 3500 Hz 에서 주로 발생한 것을 볼 수 있으며, 이전 결과보다 주파수밴드가 크게 집중되어 있는 것을 알 수 있다. 그 결과 피크필터에 의한 개선이 더욱 크게 일어난 것을 확인할 수 있다. 따라서 외란이 집중되어 있을수록 효과가 크다는 것을 알려준다.

Fig. 10 는 주파수 추정을 시간에 따라 본 그래프이다. 그림을 살펴보면 리니어 스테이지의 구동과 동시에 업데이트를 시작하여 0.01 초 안에 3500 Hz 로 수렴해 가는 모습을 보이고 있다. 그러나 빠른 수렴을 위해 초기 적응계수를 크게 한 것이 초기 오차에 영향을 준 것으로 보인다.

5. 결론

본 논문에서는 SIL 기반의 플라즈모닉 리소그래피 시스템에서 주파수 적응 필터를 추가시켜 간극제어 오차를 줄이는 연구를 수행하였다. 이를 위해 외란의 특성을 분석하고 기존의 제어시스템에 병렬적으로 추가 가능한 피크필터를 적용

하였으며, 외란의 주요 주파수를 파악하기 위해 LMS 알고리즘을 사용하였다. 실험결과로 간극오차의 분산값이 최대 2 배까지 감소되는 효과를 볼 수 있었다. 이런 오차의 감소는 외란의 주파수 밴드가 집중되어 있을 때 더욱 큰 효과가 나타났다. 궁극적으로 알고리즘은 플라즈모닉 리소그래피에서 안정적인 나노간극 유지와 패턴의 선평 균일도에 기여할 것으로 예상된다.

후기

이 논문은 2013 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2013-016979).

REFERENCES

- [1] Srituravanich, W., Pan, L., Wang, Y., Sun, C., Bogy, D. B., & Zhang, X., 2008, "Flying plasmonic lens in the near field for high-speed nanolithography", *Nature Nanotechnology*, Vol.3, No.12, pp. 733-737
- [2] Kim, Y., Kim, S., Jung, H., Lee, E., & Hahn, J. W., 2009, "Plasmonic nano lithography with a high scan speed contact probe", *Opt. Express*, Vol.17, No.22, pp. 19476-19485.
- [3] Kim, T., Lee, W. S., Joe, H. E., Lim, G., Choi, G. J., Gang, M. G., ... & Park, N. C., 2012, "High-speed plasmonic nanolithography with a solid immersion lens-based plasmonic optical head", *Applied Physics Letters*, Vol.101, No.16, 161109-161109.
- [4] Gao, W., Arai, Y., Shibuya, A., Kiyono, S., & Park, C. H., 2006, "Measurement of multi-degree-of-freedom error motions of a precision linear air-bearing stage", *Precision engineering*, Vol.30, No.1, pp. 96-103.
- [5] Hung, J. P., 2009, "Load effect on the vibration characteristics of a stage with rolling guides. *Journal of Mechanical Science and Technology*", Vol.23, No.1, 89-99.
- [6] Hong, F., & Du, C., 2010, "Stable peak filtering method to reject high frequency disturbance in hard disk drives", *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, Vol.4, No.1, pp. 119-129.
- [7] Xu, J. X., Huang, D., Venkataramanan, V., & Huynh, T. T., 2012, "Adaptive compensation of contact-induced vibration in high density HDD servo systems using peak filter method", In *Industrial Electronics (ISIE), 2012 IEEE International Symposium*, pp. 797-802