

나노임프린팅 공정에서 정렬 분해능에 관한 연구 Aligning Accuracy of the ISPI method in Nanoimprint Lithography

*#김기홍¹, 이재종¹, 최기봉¹, 임형준¹, 류지형¹, 박수연¹

*#G. H. Kim(geehong@kimm.re.kr), J. J. Lee¹, K. B. Choi¹, H. J. Lim¹, J. H. Lyu¹, S. Y. Park¹

¹ 한국기계연구원 나노융합·생산시스템 연구본부

Key words : Alignment, IPSI, Accuracy, Nanoimprint

1. 서론

차세대 리소그래피 기술로 주목받고 있는 나노 임프린팅 기술[1]은 크게 열경화형과 UV 경화형으로 분류된다. 열경화형은 스템프와 웨이퍼 사이에 도포된 열경화성 레진을 경화하여 스템프의 패턴을 전사하는 방식으로 고온, 고압을 필요로 하는 공정이다. 열경화형 나노 임프린팅 공정은 특성 상 다층 패턴이 불리하며, 주로 단층의 대면적 패턴 공정으로 활용되고 있다. 이에 반하여 UV 경화형은 상대적으로 저온, 저압에서 공정이 진행되며, 개발 초기부터 다층 패턴을 고려한 공정으로 개발되었다. UV 나노 임프린팅은 UV 광을 투과하기 위하여 퀴즈와 같은 투명 스템프를 이용하며, 스템프에 정렬 패턴을 제작한 후 웨이퍼에 전사된 패턴과의 정렬을 통하여 다층 패턴을 구현한다.

1990년대 이후 나노 임프린팅 공정 기술이 발달하면서 다양한 정렬 기술이 개발되었으며, 전통적인 비전 방식, 이중 격자 방식, 모아레 방식 등이 개발되었다. 비전 방식은 정렬하려는 두 패턴간의 기하학적인 관계를 이용하여 정렬을 수행하는 방식이며, 현미경 배율에 직접적인 영향을 받는다. 이 방식은 매우 간편하고, 보편적인 방법이지만, 정렬 정확도를 서브 um 이하로 낮추기 어려운 단점을 가진다. 이중격자 방식[2]은 X-ray 리소그래피에서 활용되기 위하여 개발되었으며, 중첩된 선형 격자 패턴에 레이저 빔을 조사하고, 반사되는 ±1 차 성분의 회절광의 합과 차를 이용하여 정렬 위치를 검출하는 방식이다. 이 방식은 수십 nm 이하의 정렬 정밀도를 검출할 수 있는 장점을 가지지만, 중첩되는 격자 패턴 피치의 관계에 따라 두 패턴의 거리를 정밀하게 유지하여야 하며, 광 경로를 광축에서 분리하기가 어려운 단점을 가진다. 모아레 방식[3-5]은 비전 광학계에 기반을 두어 구현이 용이하며, 패턴 자체의 제작 결함에 큰 영향을 받지 않는 장점을 가진다. 이 중 MIT에서 개발된 interferometric spatial phase imaging(ISPI) 방식은 기존의 선형 격자에서 발생하는 모아레 패턴의 위상 측정 방식에 기반을 두고 있으며, 특히 패턴 설계 시 위상이 정렬 오차에 따라 역방향으로 진행하도록 제작되어, 위상 측정 분해능을 2 배로 증폭하였으며, 검출광을 광축에서 분리하기 위하여 측정 방향에 수직한 패턴을 추가하여 구현한 특징을 가진다.

이 논문에서는 ISPI 정렬 방식에서 위상 측정 알고리즘에 대하여 고찰하며, 이에 따른 정렬 정확도 및 이를 향상시키는 방법에 대하여 연구한다.

2. Interferometric Spatial Phase Imaging

Fig. 1은 ISPI 정렬 시스템을 구현한 UV 나노 임프린팅 장치의 모습을 보여준다. 개발된 시스템은 제진대 위에 웨이퍼의 자세를 제어하기 위한 XYZθ 테이블이 설치된다. 회전 테이블(θ) 위에는 퀴즈 웨이퍼 척이 장착되며, 공압을 이용하여 웨이퍼를 장착한다. 웨이퍼 척 위에는 스템프 척이 설치되며, 스템프 척은 PZT를 이용한 나노 구동 장치에 탑재된다. 나노 구동 장치는 flexure 구조로 제작되었으며 정렬 신호를 바탕으로 스템프의 위치를 제어한다.

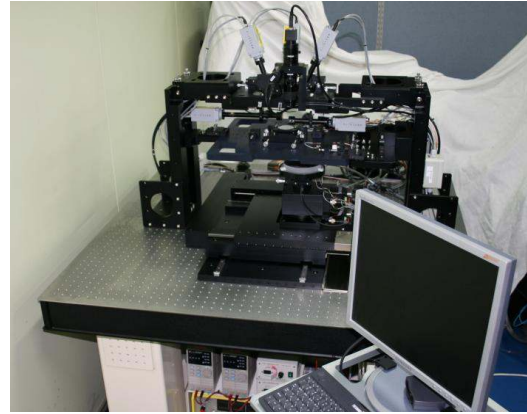


Fig. 1 UV type Nanoimprint Equipment with Interferometric Spatial Phase Imaging Unit

스템프 제어 장치 위에 동심원 모아레를 이용한 정렬을 위하여 2 축의 현미경 시스템이 탑재되며, 상부에 ISPI 용 3 축의 현미경 시스템이 탑재된다.

ISPI 시스템에서 조명은 100W 할로겐 램프를 사용하며, UV 광과 동일한 광축상에서 스템프를 조사할 수 있도록 설계되었다. 사용된 현미경 시스템은 Moritex 사 제품으로 배율은 현미경 배율 8 배, 결상광학계 2 배로 총 16 배의 배율을 가지며, 작동 거리(working distance)는 110mm 이다. 사용한 CMOS 카메라는 Pixelink 사의 PL-B781G 흑백 CMOS 카메라로서 화소수는 2208x3000 이며 화소 피치는 3.5um 로서 최대의 화소 분해능을 낼 수 있는 모델로 선정하였다.

3. 다층 정렬 패턴 제작

Fig. 2는 스템프에 제작된 정렬 패턴들의 도안과 이미지를 보여준다. Fig. 1의 시스템에는 정렬을 위하여 두가지 형태의 정렬 패턴이 제작되었는데, 첫번째는 0.5~1um 정도의 정렬 정확도를 가지는 동심원 모아레 패턴이다.

동심원 모아레 패턴은 두 개의 동심원 패턴이 중첩된 결과로 나타나는 기하학적인 간섭 패턴으로 스템프의 동심원은 주기가 6.4um 에 396.8um 영역에 31 개 패턴이 제작되었다. 웨이퍼에 제작된 패턴은 6um 주기에 396um 영역에 33 개의 패턴이 제작되었다. 상기의 두 패턴이 중첩되었을 때 발생하는 모아레 패턴의 주기는 아래의 수식으로 표현된다.

$$p = \frac{P_1 \times P_2}{2|P_1 - P_2|} = 48um \quad (1)$$

따라서 396um 에서 대략 4.17 주기의 모아레 프린지가 발생된다. 이와 같은 동심원 모아레 패턴을 이용하여 스템프와 웨이퍼간의 대략적인 정렬 위치를 1um 이내로 조정하며, 동심원 모아레를 이용한 정렬이 완료된 후 최종 정렬은 ISPI 모아레 신호를 이용하여 나노 구동 flexure 스테이지에서 최종 조절한다.

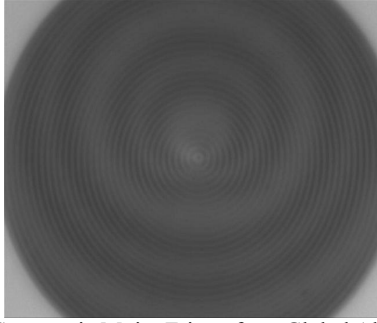


Fig. 2 Concentric Moire Fringe for a Global Alignment

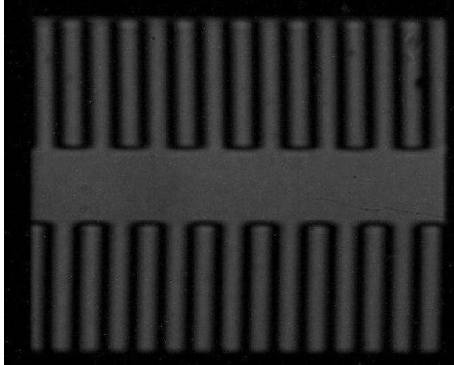


Fig. 3 ISPI Moire Image for a Fine Alignment

Fig. 3 은 스탬프와 웨이퍼에 제작된 정밀 정렬 패턴이 중첩되었을 때 발생하는 ISPI 신호이다. 웨이퍼 면의 패턴은 각각 3.2um, 3.4um 주기로 패턴이 제작되었으며, 스탬프 면의 패턴은 동일 피치로 웨이퍼 면과 반대 영역에 중첩될 수 있도록 제작되었다. ISPI 비축(non-axis) 이미징을 위한 웨이퍼면 패턴은 4um 로 제작되었으며, 패턴면에 대하여 8도의 이미징 축을 가진다.

모아레 신호 해석에서 가장 중요한 부분은 모아레 신호의 가시도(contrast)를 최대한 증폭시키는 것이다. 모아레 신호의 가시도가 낮을 경우 위상 계산에서 많은 오차를 유발한다. ISPI 신호에서는 이미징을 위한 광축의 정밀도는 크게 영향을 주지 않으며, 오히려 현미경의 개구수(numerical aperture)가 가시도에 가장 큰 영향을 미친다. Fig. 1의 시스템 특성 상 ISPI 를 관찰하는 비전 시스템은 측정면에서 되도록 긴 작동 거리를 유지하여야 하므로, 해당 거리에서 렌즈의 직경이 큰 시스템을 설계하는 것이 가장 중요하다. 이와 함께, 정렬 패턴에 수직으로 입사하는 조명의 강도도 중요한데, 일반적인 100W 할로젠 램프나 백색 LED 등을 사용할 때 되도록 패턴면에 조명광이 집광될 수 있도록 조명 광학계를 추가하는 것이 가시도를 높이는 방법이다.

4. 신호해석 알고리즘

Fig. 3의 ISPI 신호에서 정렬 위치를 추출하는 방법은 두 영역으로 분리된 모아레 신호에서 각 영역에서의 초기 위상 분포를 계산한 후 차를 계산하는 방법이다.

Fig. 3의 영상에서 수평 1 줄의 광강도 값은 아래 수식으로 맞출 수 있다.

$$y(x) = a + b \cos(wx + \phi) \quad (2)$$

(2)수식에서 x는 화소의 축, a는 평균 광강도, b는 가시도, w는 모아레 곡선의 주파수, φ는 초기 위상값을 나타낸다. (2)식에서 초기 위상을 추출하는 방법으로 최소자승법을 이용한다. (2)식을 전개하면 아래의 수식으로 풀이된다.

$$y_n = a + b \cos \phi \cos wx_n - b \sin \phi \sin wx_n \quad (3)$$

(3)식을 최소 자승법 형태로 전개하면 아래와 같다.

$$\begin{pmatrix} N & \sum \cos wx_n & \sum \sin wx_n \\ \sum \cos wx_n & \sum \cos^2 wx_n & \sum \cos wx_n \sin wx_n \\ \sum \sin wx_n & \sum \cos wx_n \sin wx_n & \sum \sin^2 wx_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \cos \phi \\ -b \sin \phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum y_n \\ \sum y_n \cos wx_n \\ \sum y_n \sin wx_n \end{pmatrix} \quad (4)$$

(4)식에서 3x3 행렬식의 역행렬을 계산하면 초기 위상 φ 값이 계산된다. 이러한 방법으로 특정 수평 줄에서의 위상을 계산한 후 이의 평균값을 계산하고, 이러한 방법으로 계산된 두 영역간의 평균 위상값의 차이를 계산하면 정렬 오차를 계산할 수 있다.

현재 이러한 방법으로 20~30nm 정도의 정렬 오차를 측정할 수 있으며, 시스템을 좀더 최적화 할 경우 10nm 이하의 정렬 오차 측정도 가능할 것으로 기대된다.

5. 결 론

이 논문에서는 ISPI 방법을 이용한 시스템 구성과 이로부터 획득한 ISPI 신호 특성, 그리고 분석법과 정밀도 향상에 관하여 고찰하였다. ISPI 신호 구성에서 가장 중요한 점은 가시도가 좋은 모아레 간섭 신호를 획득하는 것으로, 이를 위하여 시스템을 구성할 때 되도록 개구수가 큰 현미경 시스템과 고회도의 조명 광학계를 사용하는 것이 관건이다. 또한 신호 해석에서 미세 피치 및 높은 화소 분해능의 카메라를 사용하는 것도 정밀도를 향상시키는 방법으로 생각된다.

후기

이 논문은 교육과학기술부의 21세기 프론티어 사업인 나노 메카트로닉스 사업의 지원으로 수행되었다.

참고문헌

1. Chou, S. Y., Krauss, P. R. and Renstrom, P. J., "Nanoimprint lithography," J. Vac. Sci. Tech. B, 14(6), pp.4129, 1996.
2. D. C. Flanders and H. I. Smith, "A new interferometric alignment technique," Appl. Phys. Lett., 31(7), Oct. 1977, pp.426-428
3. 김기홍, 이재종, 최기봉, 박수연, 조현택, 이종현, "나노 임프린트 리소그래피에서 동심원 모아레를 이용한 정렬 방법," 한국정밀공학회지, 23(11), 2006, pp.34-41
4. E.E. Moon and M.K.Mondol, "Dynamic alignment control for fluid-immersion lithographies using interferometric-spatial-phase-imaging," J. Vac. Sci. Technol. (B), 23(6), Nov/Dec 2005, pp.2607-2610
5. E.E.Moon, J. Lee, P.N.Everett, and H.I.Smith, "Application of interferometric broadband imaging alignment on an experimental x-ray stepper," J. Vac. Sci. Technol. (B), 16(6), Nov/Dec 1998, pp.3631-3636