

스핀코터를 이용한 박막의 기계적 안정성 평가

김지은 · 김정환* · 홍성철* · 조한구** · 안진호*†

한양대학교 자연과학대학 나노융합학과, *†한양대학교 공과대학 신소재공학과,
**한양대학교 나노과학기술연구소

Mechanical Stability Evaluation of Thin Film with Spin-coater

Ji Eun Kim, Jung Hwan Kim*, Seongchul Hong*, HanKu Cho** and Jinho Ahn*†

Department of Convergence Nanoscience, Hanyang University, Seoul 04763, Korea

*†Department of Materials Science and Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Korea

**Institute of Nano Science and Technology, Hanyang University, Seoul 04763, Korea

ABSTRACT

For high volume manufacturing using extreme ultraviolet (EUV) lithography, mask protection from contamination during lithography process must be solved, and EUV pellicle is the strongest solution. Based on the technical requirements of EUV pellicle, EUV pellicle should have large membrane area ($110 \times 140 \text{ mm}^2$) with film transmittance over 90% and mechanical stability. Even though pellicle that satisfies size standard with high transmittance has been reported, its mechanical stability has not been confirmed, nor is there a standard to evaluate the mechanical stability. In this study, we suggest a rather simple method evaluating mechanical stability of pellicle membrane using spin-coater which can emulate the linear accelerated motion. The test conditions were designed by simulating the acceleration distribution inside pellicle membrane through correlating the linear acceleration and centripetal acceleration, which occurs during linear movement and rotation movement, respectively. By these simulation results, we confirmed the possibility of using spin-coater to evaluate the mechanical stability of EUV pellicle.

Key Words : EUV pellicle, thin film, mechanical stability, spin-coater

1. 서 론

극자외선 노광 기술 (EUV lithography, EUVL)은 가장 유력한 차세대 노광기술로서, 기존 ArF 노광 기술에 사용되는 파장보다 14배 짧아진 파장을 사용하기 때문에 해상력을 향상시킬 수 있지만, 이와 동시에 대부분의 물질에 흡수가 잘 되는 특성을 갖게 되며 기존 노광공정과 대비하여 노광공정 중 발생하는 마스크 오염 방지의 필요성이 크게 대두되었다[1-3]. 펠리클은 오염물질로부터 마스크를 보호하여 마스크 수명을 증가시키고, 오염물질이 펠리클에 흡착되었을 경우 오염물질로 인한 패턴 이미지의 초점을 웨이퍼 위 감광제 면에서 벗어나게 만든다[4-6]. 이와 같이 펠리클은 오

염물질로 인한 공정 수율 감소를 막아주므로 극자외선 노광 공정 양산에도 적용이 고려되고 있다[7].

최근 발표 된 EUV 펠리클의 기술적 사양에 따르면, EUV 펠리클 박막은 극자외선 투과도 90% 이상을 만족시켜야 되기에 초박막 구조를 이용한 고투과도 확보를 위한 연구가 주로 이뤄지고 있다[8]. EUV 파장의 특성상 대기를 포함한 대부분의 물질에서 높은 소광계수를 갖기 때문에 EUV 펠리클 박막 두께는 수십 나노미터 정도로 제한되며, 이와 동시에 EUV 마스크 전면을 보호하기 위해 EUV 펠리클 멤브레인의 면적은 $110 \times 140 \text{ mm}^2$ 를 목표로 하고 있다[9]. 이와 더불어 펠리클의 또 다른 도전과제로 가속도 100 m/s^2 , 압력변화 3.5 mbar/s 를 견뎌야 하는 기계적 안정성 조건이 있다. 이를 위해서는 현재 제안되어 있는 다결정 실리콘 박막을 대체할 수 있는 박막소재의 개발이 필요하

†E-mail : jhahn@hanyang.ac.kr

며, 새로 개발된 소재의 기계적 특성에 대한 비교평가가 우선되어야 한다[10].

본 논문에서는 펠리클 박막의 기계적 안정성 조건 중에서도 노광기 내 스테이지 가속도 조건 100 m/s^2 에 대한 안정성을 스펀코터를 사용하여 유추적으로 확인하는 방법을 제시한다. 스펀코터는 원운동으로 진행되지만, 이를 각 지점에서의 선형적 운동으로 해석하여 펠리클의 가속도 안정성을 확인하는 실험을 진행하였다. 실험의 설계는 모델링을 통해 선형 가속도 100 m/s^2 의 환경을 스펀코터로 구현하였으며, 추가적으로 펠리클 박막내의 가속도 분포를 계산하여 구심가속도를 선형적으로 변환 근거를 보충하였다. 이 결과를 통해 EUV 펠리클의 가속도 안정성 평가 장비로써 스펀코터의 활용가능성을 확인하였다.

2. 실험 방법

거리에 따른 가속도 분포에 대한 보정을 위하여 펠리클 박막 내 각 질점들의 가속도 값을 MathWorks社 Matlab 프로그램으로 계산하였다. 이는 회전축에서 펠리클 박막 내부 각 질점까지 거리, 스펀코터의 회전속도(revolutions per minute: rpm), 펠리클 박막의 크기를 고려하여 계산하였다. Fig. 1은 예상되는 실험 모식도로 위에서 본 이미지를 나타낸다. 펠리클 샘플은 스펀코터의 중심축으로부터 특정한 거리에 위치하며, 펠리클은 프레임 위에 박막이 부착되어 있는 구조를 가정하였다.

선형운동과 가능한 유사하게 전 박막 영역에서의 가속도 차이를 작게 하고, 결합 등 박막 자체특성 이외의 변수를 최소화하기 위해서 펠리클의 박막 면적은 $10 \times 10 \text{ mm}^2$ 로 설정하였고, EUV 펠리클의 가속도 기준인 100 m/s^2 를 중간(median) 값으로 설정하였다. 이 조건에서 연구를 통해 유도한 식을 이용하여, 회전축에서 펠리클까지의 거리에 따른 rpm을 설정할 수 있다. 또한 회전축에서 펠리클까지의 거리에 따른 펠리클 박막 내 최대가속도와 최소가속도의 차이를 분석하였다.

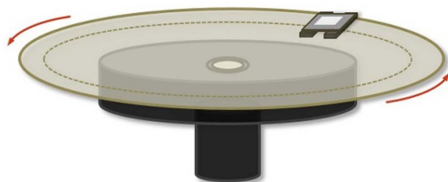


Fig. 1. Schematic of pellicle acceleration test by using spin-coater.

3. 결과 및 고찰

실제 EUV 노광기 내부에서 마스크에 부착된 펠리클의 움직임은 선형으로 움직이기에, 스펀코터를 이용한 펠리클 샘플의 기계적 안정성 확인 실험을 위해서는 선형가속도 응력(stress)과 스펀코터에서 발생하는 응력 간의 관계를 규명할 필요가 있다. Fig. 2는 특정 물체가 원형 운동(circular motion)시 움직이는 궤도를 위에서 바라본(top-view) 모식도를 보여준다. P는 현재 궤도 상 샘플의 위치이며, r은 회전축에서 위치 P까지 거리, θ 는 x축에서 샘플까지 각도 그리고 ω 는 각속도를 의미한다. 회전 각도(θ)의 시간 변화량인 각속도는 물체의 모든 지점에서 동일하며, 설정한 회전 속도(rpm)와 연관된다. 회전 운동에서 받는 가속도를 선형적 움직임으로 해석하기 위해 물체를 여러 질점(material point)들의 모임으로 본다. 각 위치(point)에서 속도와 가속도는 시간에 따른 위치변화량, 속도변화량을 각각 의미하므로, 위치벡터(\hat{r})를 시간에 대하여 미분하여 속도벡터(\vec{v})를 구하고, 구한 속도벡터를 한번 더 미분하여 가속도벡터(\vec{a})를 구한다. 해당 요소(factor)들을 이용하면 원형 운동을 하는 샘플이 위치 P에 있을 때의 샘플의 속도와 가속도는 각각 식 1, 식 2로 표현 가능하다[11-13].

$$\vec{v} = r\omega\hat{\theta} \quad (1)$$

$$\vec{a} = r\frac{d\omega}{dt}\hat{\theta} - r\omega^2\hat{r} \quad (2)$$

여기서 $\hat{\theta}$ 는 각도방향의 단위벡터이며, \hat{r} 는 원점에서 점P 방향으로의 단위벡터를 의미한다. 속도 벡터는 그 위치에서 원 운동 경로의 접선 방향을 가지고, 가속도는 속도 벡터 크기의 변화로 인해 발생하는 접선가

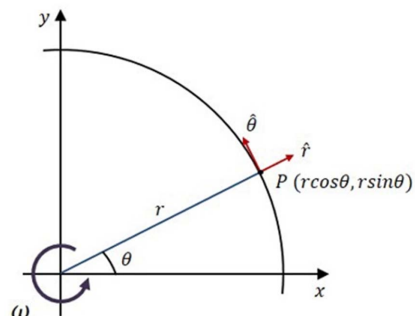


Fig. 2. Schematic of pellicle movement track during circular move.

속도와 속도 벡터 방향의 변화로 인해 발생하는 구심 가속도의 합한 방향을 가진다.

식 2와 같이 원 운동하는 샘플의 총 가속도는 샘플에 가해지는 가속도들의 벡터 합이며, 이를 방향에 따라 구분하면 구심가속도(\hat{r} 방향)와 접선가속도($\hat{\theta}$ 방향)의 벡터 합으로 나타낼 수 있다. 구심가속도 크기는 회전축과의 거리와 각속도 제곱 값 간의 곱으로 표현할 수 있으며, 방향은 원의 중심방향으로 작용한다. 접선 가속도 크기는 회전축에서의 거리와 시간에 따른 각속도 변화 값 간의 곱으로 정의된다. 그러므로 시간에 따라 동일한 각속도를 갖는다면 원형운동을 하는 샘플은 회전축 중심방향으로 작용하는 구심가속도만 받게 된다. 하지만 실제로 스피ن코터를 이용한 가속도 안정성 확인을 위한 실험에서는 크게 rpm이 변화하는 구간과 일정한 구간으로 나눌 수 있다. rpm이 변화하는 구간은 설정한 rpm에 도달하기 전까지 증가하는 구간과 설정된 시간 이후 멈추면서 감소하는 구간을 의미하며, 이 때 펠리클 내부에서 받는 가속도는 접선가속도와 구심가속도의 합으로 나타나고, rpm이 일정한 구간에서는 접선가속도 크기($r d\omega/dt$) 값은 0이 되어서 구심가속도만 존재하게 된다.

원형 운동시 받는 가속도를 선형가속도로 변환하기 위하여 라디안(rad) 단위를 미터(m) 단위로 변환해 주어야 한다. 각속도(ω)는 1초당 회전하는 각도를 의미하며 rad/s로 표현할 수 있는데 이를 이용하여 1초당 움직이는 거리를 계산하면 구심 운동을 m/s 단위로 변환이 가능하다. 1분당 회전 수인 rpm의 정의를 이용하여 f를 1초당 회전수라 하고 1회전 각도 변화 값에 해당하는 2π 와 1초당 회전 수(f)를 곱하여 원 운동시 움직이는 궤도(m, meter)를 표현한다. 이를 사용하면 선형속도와 선형가속도를 라디안 단위로 표시한 식 1, 식 2를 미터 단위로 표현한 식 3, 식 4으로 변환 가능하다.

$$\vec{v} = r(2\pi f)\hat{\theta} \quad (3)$$

$$\vec{a} = 2\pi r \frac{df}{dt} \hat{\theta} - r(2\pi f)^2 \hat{r} \quad (4)$$

식 4에서 접선가속도 크기는 시간당 변화하는 rpm에 비례하기 때문에, rpm이 변화하는 구간을 조정하여 접선가속도 크기를 구심가속도 크기에 비해 무시할 수 있을 정도로 만들어 준다면, 구심가속도만 존재한다고 볼 수 있다.

스핀코터로 인해 원운동을 하는 펠리클 샘플은 박막 내 동일한 각속도를 가지지만, 위의 식은 특정 점 P에서 받는 속도 및 가속도를 분석하였기 때문에 일정 크

기로 제작된 펠리클 박막에 대한 분석은 박막 내 수많은 질점(material point)들의 가속도 값들에 대한 분석으로 가능하다. 펠리클 박막 내부의 각기 다른 질점마다 회전 중심축에서부터 거리 차이(distance variation)가 발생하며, 이는 가속도의 분포(acceleration variation)를 야기시킨다.

동일한 펠리클 박막에서 받는 최대 가속도와 최소 가속도의 차이는 중심축에서 박막 간 최단거리에 반비례하며, 최단거리와 최대거리 차이가 커질 수록 같은 펠리클 박막내의 가속도 분포는 증가한다. 선형 가속도 운동의 경우 펠리클 박막 내 모든 위치에서 동일한 가속도를 받게 되기에, 스피ن코터를 이용하여 이와 유사한 실험 환경을 구현하기 위해선 박막 내 가속도를 최대한 균일하게 만들어 줄 필요가 있다. Fig. 3는 회전축과 박막 내 최단거리와 최대거리의 차이를 최소화하기 위하여 운동 궤도의 접선에 펠리클 샘플 한 변을 위치시킨 모식도를 좌표계에 표시한 그림이며, 정사각형 펠리클의 한 면의 길이는 l 로 정의하였다. 박막 내 회전축과 거리(r)가 가장 큰 경우 r_M , 작은 경우 r_m 이라 하고, 각 지점에서의 가속도 값은 $|\vec{a}_M|$, $|\vec{a}_m|$ 로 표시한다. 회전축과 펠리클 내부의 가장 먼 지점까지 거리(r_M)를 r_m 과 l 를 이용하면 식 5와 같이 표현이 가능하며, 최소 가속도와 최대 가속도는 식 6, 식 7과 같이 표현이 가능하다.

$$r_M = \sqrt{(r_m + l)^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2} \quad (5)$$

$$|\vec{a}_M| = \sqrt{(r_m + l)^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2} (2\pi f)^2 \quad (6)$$

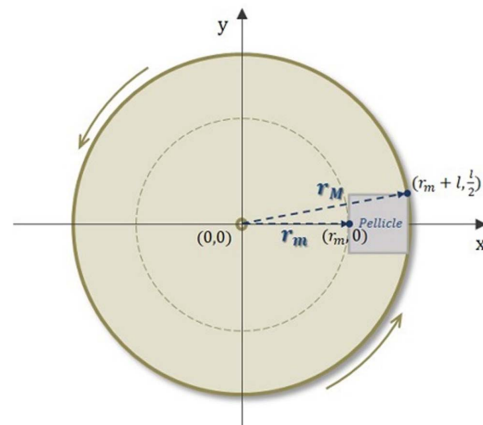


Fig. 3. Schematic of coordinates applied for calculating the acceleration of pellicle membrane.

$$\left| \vec{a}_m \right| = r_m (2\pi f)^2 \quad (7)$$

선형운동과 유사하게 실험을 계획하기 위해 회전 시 펠리클 면적 내 최대와 최소 가속도 차이를 10% 이내로 계획하였으며, EUV 펠리클 필요조건 중 가속도 조건을 고려하여 펠리클 면적 내 가속도의 크기는 $100 \pm 5 \text{ m/s}^2$ 로 설정하였다. 최소, 최대 가속도가 각각 $95, 105 \text{ m/s}^2$ 라고 고정한 후 식 6과 7에 대입하여 회전축에서 펠리클까지의 최단거리 r_m 을 구할 수 있으며, 구한 r_m 과 가속도 값을 통해 rpm을 설정 할 수 있다. 이를 통해 펠리클 박막 내 최대가속도와 최소가속도의 차이를 줄여 선형가속도를 구심가속도로 분석하는 모델을 확보하였다.

펠리클 박막의 면적 내 가속도 범위를 설정하면, 실험 시 설정해야 할 요소인 회전축과 펠리클의 최단거리와 스핀코터의 rpm을 구할 수 있다.

펠리클 박막의 면적이 $10 \times 10 \text{ mm}^2$ 인 경우 선형운동 시 받는 가속도(100 m/s^2)와 유사하기 위해 가속도 분포가 $95 \sim 105 \text{ m/s}^2$ 라 하였을 때 수식에 의해 회전축과 펠리클의 최단거리는 0.096 m 이상을 가져야 한다. 최단거리를 0.1 m 라 고정하였을 때, 최소가속도 95 m/s^2 임을 이용하여 수식을 계산하면 rpm을 295로 설정해야 한다. Fig. 4(b)는 $10 \times 10 \text{ mm}^2$ 펠리클 면적에서 295 rpm, 회전축과 펠리클 최단거리 0.1 m 조건으로 가속도 실험을 진행하였을 시 가속도 분포를 나타낸 그림이다. 이때 최소가속도는 95.3 m/s^2 이며 최대가속도는 105 m/s^2 로 최대와 최소 가속도 차이는 9.7 m/s^2 가 발생된다. Fig. 4(a)와 (c)는 회전축에서 펠리클까지 최단거리가 길어질 수록 최대 가속도 차이는 줄어들음을 확인하기 위해 최단거리를 $0.05, 0.15 \text{ m}$ 으로 추가 설정한 후 가속도의 중간값이 100 m/s^2 가 되도록 rpm을 407 및 243으로 각각 설정하여 펠리클 박막 내 가속도 분포를 확인한 이미지이다. 가속도 값을 색으로 나타내는 컬러 바(color bar)에서 파란색은 최소값인 90 m/s^2 , 빨간색은 최대값인 110 m/s^2 로 고정하였으며, Table 1에는 최단거리에 따른 최소가속도, 최대가속도와 그 차이 정리를 통해 회전축과 펠리클의 거리가 길어짐에 따라 가속도 차이가 줄어드는 것을 확인하였다.

Fig. 5는 접선가속도를 무시하고 구심가속도만을 고려하기 위해 설정해야 하는 rpm을 그래프로 표시하였다. 가속($0 \sim t_1$)과 감속($t_2 \sim t_3$) 구간에서 구심가속도 대비 접선가속도의 크기 값이 1% 이하를 가지도록 하기 위해서는, 최단거리에서 구심가속도 크기 값이 95.3 일

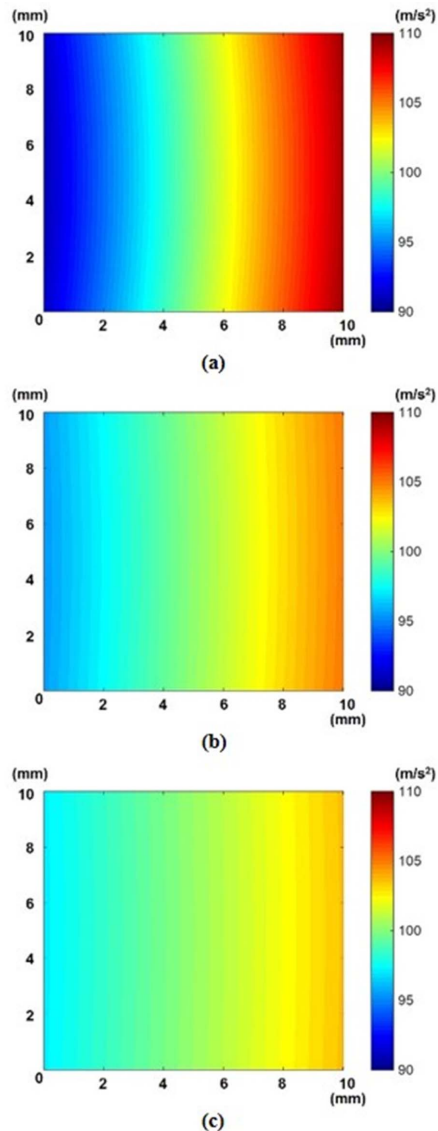
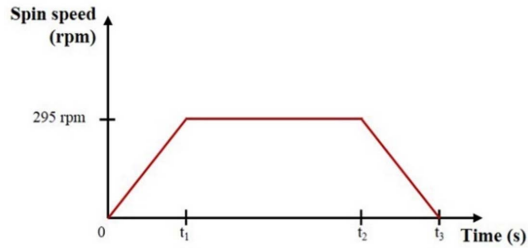


Fig. 4. Acceleration distribution in EUV pellicle membrane (a) $r_m = 0.05 \text{ m}$, 407 rpm, (b) $r_m = 0.1 \text{ m}$, 295 rpm, (c) $r_m = 0.15 \text{ m}$, 243 rpm.

때에 접선가속도는 0.953 이하를 가져야 한다. 접선가속도를 구하는 공식에 의해 초 당 rpm의 변화가 91.1 이하이면, 그 크기 값이 구심가속도에 비해 1% 이하를 가짐으로 이를 무시하고 구심가속도만 존재한다고 가정할 수 있다. 이 크기는 가속과 감속 구간에서 접선의 기울기를 의미한다. 다시 말해서, 295 rpm을 기준으로 스핀코터의 가속이나 감속 구간을 3.24 sec 이상으로 가져간다면 위의 가정을 만족시킬 수 있다.

Table 1. Calculated acceleration results according to distance (r_m)

	$r_m = 0.05\text{ m}$ (407 rpm)	$r_m = 0.1\text{ m}$ (295 rpm)	$r_m = 0.15\text{ m}$ (243 rpm)
Minimum acceleration (m/s^2)	90.7	95.3	97.0
Maximum acceleration (m/s^2)	109.3	105	103.6
Acceleration difference (m/s^2)	18.6	9.7	6.6

**Fig. 5.** The rpm change according to operating time ($r_m=0.1\text{ m}$, 295 rpm).

또한, 최대와 최소 가속도 차이가 가장 작게 하기 위해 회전축과 펠리클 박막의 최단거리와 최대거리 차이를 최대한 작게 놓아야 하고, 이 때 위치는 운동 궤도의 접선에 펠리클 박막의 한 면이 있을 때이다. 이와 같이 수식을 계산하여 회전 시 받는 펠리클 박막 내부의 가속도 분포를 확인하며, 이를 바탕으로 스피너코터로 펠리클의 기계적 안정성 평가의 가능성을 확인하였다.

4. 결 론

EUV 펠리클에 대한 연구가 진행되고 있지만 기계적 안정성에 대해 정형화 된 실험방법이 없는 현재, 스피너코터를 이용하여 펠리클 박막의 특성조건중 하나인 가속도에 대한 안정성을 확인하는 실험을 제시하였다. 펠리클이 실제 노광기 내부에서 선형 운동하는 것을 회전운동 시 받는 가속도를 선형적으로 계산하여 스피너코터를 이용한 펠리클 가속도 안정성 평가 실험을 구축하였다. 회전 운동시 접선가속도와 구심가속도를 가지는 영역이 존재하지만, 접선가속도 크기를 구심가속도 크기의 1% 이내로 설정한 후 무시하여 구심가속도만을 고려하였다. 더불어 구심가속도이기에 발생할 수 있는 펠리클 면적 내부 가속도의 분포 계산을 통해 실험

의 신뢰성을 보완해주었다. 본 연구에서는 물리적 공식을 통해 구심가속도를 선형적으로 분석한 스피너코터를 이용한 펠리클 박막의 가속도 안정성 확인 실험을 설계하였고, 이 실험은 다양한 펠리클 박막에 있어서도 공통적으로 사용할 수 있는 실험이라는 점에서 그 의의를 찾을 수 있다.

감사의 글

이 논문은 한국 정부 (MSIP)에서 후원하는 한국연구재단(National Research Foundation of Korea, NRF)의 기초연구 사업에 의하여 지원되었음(Grant No. 2011-0028570).

참고문헌

1. B. Wu and A. Kumar, "Extreme ultraviolet lithography: A review", J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 25, No.6, pp. 1743-1761, (2007).
2. H. Meiling, V. Banine, P. Kurz, N. Harned. "Progress in the ASML EUV program", Proc. of SPIE, Vol. 5374, Issue PART 1, pp. 31-42, (2004).
3. I. S. Kim, J. W. Kim and H. K. Oh, "Study of temperature behaviors for a pellicle in extreme-ultraviolet lithography: Mesh structure", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 52, No. 12, 126506 (2013).
4. K.H. Ko, G.J. Kim, M. Yeung, E. Garouch and H.K. oh, "Imaging performance of mesh supported pellicle for extreme ultraviolet lithography", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 53, No. 6, 06JA02 (2014).
5. L. Scaccabarozzi, D. Smith, P. Rizo Diago, E. Casimiri, N. Dziomkina, and H. Meijer, "Investigation of EUV pellicle feasibility", Proc. of SPIE, Vol. 8679, Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography IV, 867904, (2013).
6. I. Skurai, T. Shirasaki, M. Kashida, and Y.Kubota, "Pellicle for ArF excimer laser photolithography", Photomask and X-ray Mask Technology 4, Proc. of SPIE, Vol. 3748, pp. 177-187, (1999).
7. H. Lee, E. Kim, J. Kim, and H. OH, "Temperature Behavior of Pellicles in Extreme Ultraviolet Lithography", J. Korean Phys. Soc., Vol. 61, No. 7, pp.1093-1096, (2012).
8. Y. A. Shroff, M. Leeson, and P. Yan, "High transmission pellicles for extreme ultraviolet lithography reticle protection", J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 28, No.6, pp. C6E36-C6E41, (2010).
9. Y. A. Shroff, M. Goldstein, B. Rice, S. H. Lee, K. V. Ravi, and D. Tanzil, "EUV Pellicle Development for

- Mask Defect Control”, Proc. of SPIE, Vol. 6151, Emerging Lithographic Technologies X, 615104, (2006).
10. C. Zoldesi, K. Bal, B. Blum, G. Bock, D. Brouns, F. Dhalluin, N. Dziomkina, J. Diego, A. Espinoza, J. de Hoogh, S. Houweling, M. Jansen, M. Kamali, A. Kempa, R. Kox, R. de Kruif, J. Lima, Y. Liu, H. Meijer, H. Meiling, I. van Mil, M. Reijnen, L. Scaccabarozzi, D. Smith, B. Verbrugge, L. de Winter, X. Xiong, and J. Zimmerman. “Progress on EUV pellicle development”, Proc. of SPIE, Vol. 9048, Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography V, 90481N, (2014).
 11. J. Chung, J.E. Oh and H.H. Yoo, “Non-linear vibration of a flexible spinning disc with angular acceleration”, Journal of Sound and Vibration, Vol.231, No.2, pp375-391, (2000).
 12. Ruth E. Mayagoitia, Anand V.Nene and Peter H.Veltink, “Accelerometer and rate gyroscope measurement of kinematics: an inexpensive alternative to optical motion analysis systems”, Journal of biomechanics, Vol. 35, No. 4, pp.537-542, (2002).
 13. Seppo J. Ovaska and Sami Valivita, “Angular acceleration measurement: A Review”, Instrumentation and Measurement Technology Conference, IEEE Vol. 2, pp.875-880, (1998).
-
- 접수일: 2016년 2월 3일, 심사일: 2016년 2월 19일,
 게재확정일: 2016년 2월 29일