

나노 임프린팅 장비의 기술개발 현황

이재종, 김기홍, 최기봉, 정광조 | 한국기계연구원

1. 서 론

최근 국내외에서 나노기술 분야의 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이러한 연구는 10nm를 중심으로 접근방식에 따라, 100nm에서 접근하는 하향식(top down)연구와 1nm에서 접근하는 상향식(bottom-up)연구로 구분된다. 국내에서도 하향식 연구의 하나로, 나노제품의 저비용, 고생산성을 목표로 나노메카트로닉스 사업이 진행되고 있고, 나노제품의 대량생산을 위한 방법으로 나노패터닝장비의 중요성이 증가함에 따라 나노패터닝 장비기술을 개발하고 있다. 본 논문에서는 국내외 나노패터닝장비의 기술개발 동향과 나노메카트로닉스 기술개발사업에서 개발하고 있는 나노 임프린팅장비의 기술을 소개하고자 한다.

나노패터닝장비는 현재 세계적으로 몇 개의 기업에서 상품화를 시도하고 있는 초기단계이며, 대표적으로 UTA(U. of Texas at Austin)에서 기술을 개발하여 스펀오프한 MII(Molecular Imprint Inc.), Princeton 대학의 S. Chou교수가 스펀오프한 Nanonex, 스웨덴의 Obducat, 유럽의 Wuppertal대학과 VTT전자 등이 협력하여 스펀오프한 Suss MicroTec 등이 100nm이하의 나노패턴형상을 나노임프린팅공정을 이용하여 구현할 수 있는 나노패터닝장비를 개발하고 있다. 이 외에 EVG, Karl Suss 등은 반도체공정용 Mask Aligner와 Wafer Bonder를 이용하여 UV 임프린팅장비 및 고온 임프린팅장비를 개발하여 상품화하고 있다.

2. 외국의 기술개발동향

나노 임프린팅 리소그래피 장비는 최근 5년 동안 미국, 유럽을 중심으로 선풍 100nm 이하를 실현하고, 실현된 기술을 이용하여 제품에 적용하기 위한 방법으로 나노 임프린팅 리소그래피(NIL) 장비를 개발하여 상품화를 시도하고 있다. 개발되는 장비는 사용하는 재료의 특성에 따라 광경화재료(photoresist)를 사용하는 UV방식과 열경화재료(thermal resist)를 사용한 Hot embossing방식이 있다.

나노 임프린팅 리소그래피 장비를 개발하여 상품화하고 있는 업체는 오스트리아의 EVG사, 미국의 MII(molecular imprint inc.), Nanonex, 스웨덴의 Obducat, 독일의 Suss Microtec 이 있다. EVG와 Suss Microtec 은 기존에 생산되던 반도체 Aligner장비와 Flip Chip Bonder의 구조를 수정하여 임프린팅장비를 개발한

회사이다. MII, Nanonex, Obducat은 공정기술을 바탕으로 나노 임프린팅장비를 개발하여 상품화를 시도하고 있다. 특히, MII와 Nanonex는 대학에서 공정기술과 장비를 개발하여 상품화를 시도하고 있다. 본 논문에서는 각각의 장비에 대한 특성과 적용사례를 기술하고자 한다.

2.1 EVG (Electronic Vision Group)

EVG는 종래에 반도체 장비로 생산되던 Mask aligner장비와 Wafer bonder장비의 구조를 수정하여 작업 영역 6인치 웨이퍼, XY- θ 스테이지, DC-motorized 이송계를 이용하여 위치정렬오차(Align accuracy)가 240nm~450nm, 분해능 100nm 이하인 UV방식의 나노 임프린팅 장비와 온도와 압력을 이용한 Hot embossing장비를 생산하고 있다. 현재 몇 대의 장비를 판매한 상태이며, Hot embossing장비의 경우 다층 구조의 임프린팅 공정을 구현할 수 있는 구조로 개발하고 있다. EVG의 UV나노 임프린팅장비는 웨이퍼와 마스크의 평형을 유지하기 위한 방법으로 공기베어링을 이용한 Wedge compensation장치를 개발했고, 임프린팅 공정 후 마스크와 웨이퍼를 분리시키는 방법으로 실린더를 이용하는 방법을 사용하고 있다. EVG는 개발된 장비를 이용하여 DNA chip, Micro-fluidics, Insulin μ -pump 등에 적용하고 있다.



그림1. EVG 620 imprinting lithography equipment

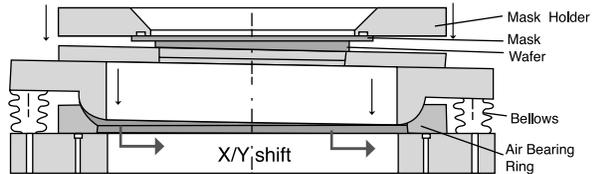


그림2. Wedge compensation system

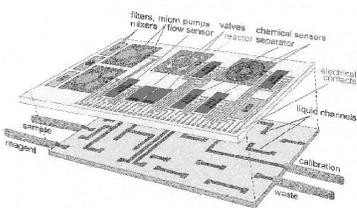


그림3. Micro-channel

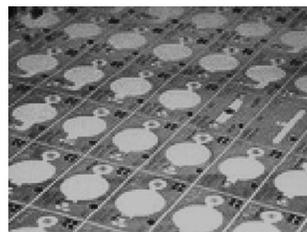


그림4. Insulin μ -pump

2.2 MII (Molecular Imprint Inc.)

MII는 작은 작업영역(field size)의 스텝프를 이용하여 연속적인 작업을 수행하는 SFIL(step&flash imprint lithography) 방법을 이용하여 장비의 분해능 100 nm 이하, CD(critical dimension) 제어값 ± 2 nm (3σ), 패턴막 두께 60 nm (3σ), Overlay 150nm, Field size 25x25mm²으로 2 in~8 in 크기의 웨이퍼에서 임프린팅을 구현할 수 있는 UV방식의 나노 임프린팅 장비를 개발하여 상품화를 추진하고 있다.



그림5. MII Imprio 100

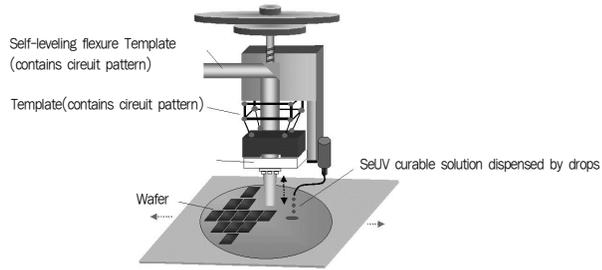


그림6. Self-alignment system

MII장비는 그림 6과 같이 임프린팅시 발생하는 마스크의 경사짐과 웨지현상을 제거하기 위한 방법으로 스튜어트 플랫폼 구조의 자동레벨링 기능을 사용하고 있고, 25x25mm²의 Field size를 임프린팅하기 위해서 미소량의 Resist를 연속적으로 공급한 후 임프린팅하는 방법을 사용하고 있다.

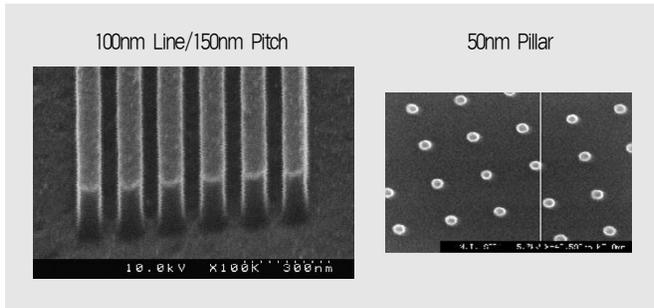


그림7. imprinting examples

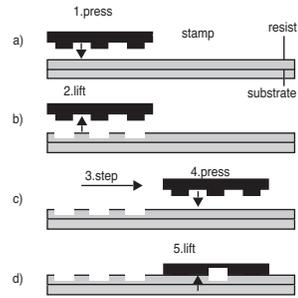


그림8. Step & repeat process (Suss MicroTec)

2.3 Suss MicroTec

Suss MicroTec은 EVG와 유사하게 종래의 Flip Chip Bonder를 기반으로 선폭 100nm이하, 오버레이 500nm (3σ), 최대압력 2kpsi, 웨이퍼크기 2~8 in, Field Size 40x40mm와 가열온도 450°C까지 올릴 수 있는 방법으로 UV방식과 Hot embossing방식의 장비를 개발하고 있다. 임프린팅방법은 MII와 유사하게 연속적으로 필드크기의 스탬프 또는 마스터를 이동시키면서 임프린팅공정을 수행한다.

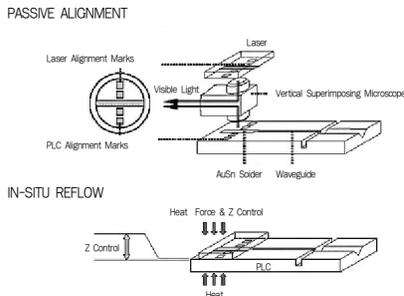


그림9. Passive alignment system

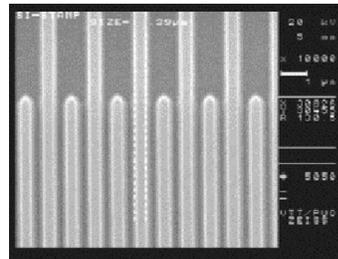


그림10. Imprinting result (400x500nm)

2.4 NanoNex

NanoNex는 선폭 100nm를 구현하기 위해서 UV방식과 Hot embossing방식의 장비를 개발하고 있으며, MII, EVG, Suss MicroTec과는 다르게 한번의 작업으로 전체 웨이퍼에 패턴을 전사하는 One-shot 방식의 패터닝방식을 적용하고 있다. NanoNex 장비는 Overlay 500nm(3 σ), Field size 4in~6in, 압력 300psi/600psi(option)을 구현하고 있으며, CMOS, 정보저장메모리, 센서 등에 적용할 수 있는 다양한 공정을 개발하고 있다.

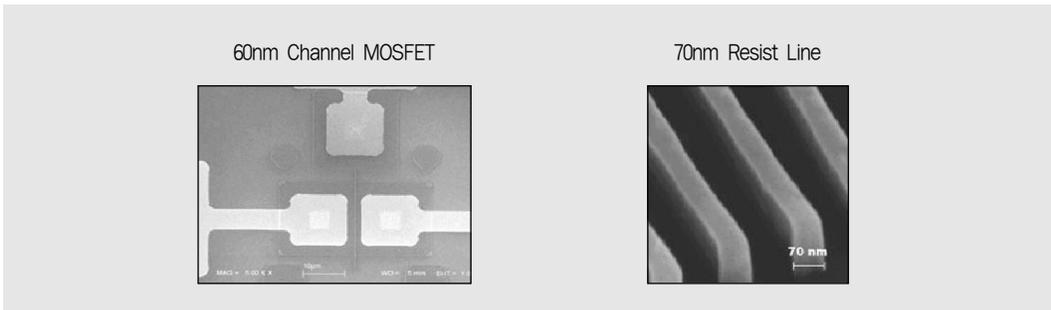


그림11. Imprinting results

2.5 Obducat

Obducat은 온도와 압력을 이용한 Hot embossing방식의 임프린팅장비를 개발하고 있고, Si, GaAs, InP, Polymer, Ceramic, Metal Substrates 를 이용하여 Print Uniformity \pm 10nm, 최대 온도 250°C, 최대압력 70 bar, 스템프 크기 ϕ 65mm로 작업을 하도록 되어있고, 임프린팅시의 하중영향을 줄이기 위해서 소프트 프레스링기능을 부가하였다.

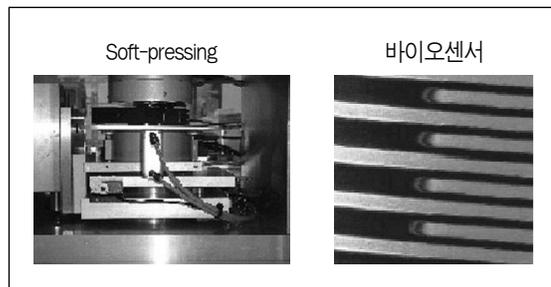


그림12. Soft pressing mechanism and application

3. 100nm급 나노 패터닝장비 개발

전술한 바와 같이 미국, 유럽을 중심으로 개발되고 있는 선폭 100nm이하를 구현할 수 있는 차세대 리소그래피 장비로 인식되고 있는 나노 임프린팅 리소그래피 장비의 국산화 개발과 개발된 장비를 이용한 나노구조물의 대량생산 기술을 개발하기 위해서 나노 메카트로닉스 기술개발사업에서 나노 임프린팅장비를 개발하고 있다.

나노 임프린팅장비는 3단계를 거쳐 선폭 100nm이하, 50nm, 10nm를 구현할 수 있는 장비개발을 목표로 하고 있으며, 현재 1단계의 연구를 수행하고 있다. 1단계에서는 나노 임프린팅 리소그래피 장비를 구성하고 있는 핵심 요소기술을 개발하고 있으며, 현재 2인치 웨이퍼에서 200nm 선폭을 구현할 수 있는

나노 임프린팅 장비의 시제품1을 개발하고 있고, 1단계가 마무리 되는 3차년도에서는 4인치 웨이퍼에서 선폭 100nm이하를 구현할 수 있는 나노 임프린팅 장비를 개발할 계획이다.

현재 개발되고 있는 UV방식의 나노 임프린팅 장비는 장비의 특성과 공정기술에 따라서 다르나 웨이퍼를 공급해주고 웨이퍼의 위치결정을 위한 위치결정 및 스테이지기술, 다층박막(multi-layer)을 구현하는데 있어 반드시 요구되는 나노 정렬기술, 임프린팅에 따른 영향을 줄여줄 수 있는 소프트 프레스싱 및 간극측정 기술, 극저주파 진동에 의한 영향을 줄이기 위한 극저주파 진동 절연기술 및 변형최소화 기술이 개발되고 있다.

또한, 고생산성(high throughput)을 실현하기 위해서 4인치 나노임프린팅 마스터(nanoimprinting master)를 사용하여 한번의 임프린팅 방법으로 패턴을 전사할 수 있는 방식과 1~2인치 크기의 마스터를 사용하여 4인치 웨이퍼에 패턴을 전사하는 방식을 겸한 나노 패터닝장비를 개발하고 있다. 이와 함께 이러한 나노 패터닝을 위한 4인치 크기의 Quartz재질의 나노임프린팅 마스터 제작기술 및 나노 임프린팅 마스터를 제작할 수 있는 대면적 시리얼방식의 프린팅장비를 개발하고 있다. 그림 13은 나노 임프린팅의 기초공정실험을 위해 제작한 실험장치이며, 그림 14는 나노 임프린팅 실험장치에서 사용된 나노임프린팅 마스터에 패터닝된 나노패턴 형상을 나타낸 것이다.

여기에서는 개발되고 있는 연구의 특성상 나노 임프린팅 장비용으로 개발되고 있는 나노 스테이지에 관해서 기술하고자 한다.

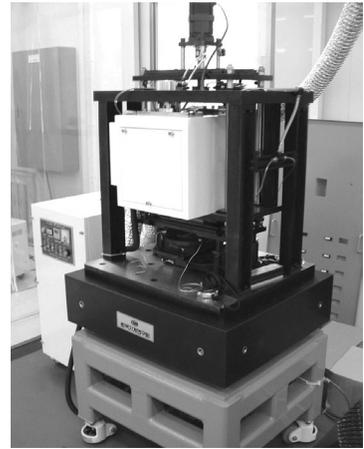


그림13. Manufactured nano-imprinting experimental equipment

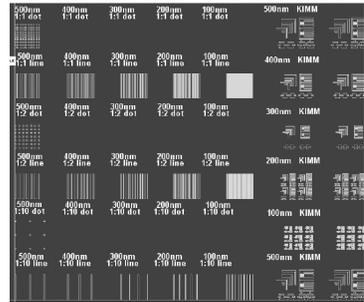


그림14. Behavior of wafer stage with passive compliance

3.1 나노패터닝 장비용 스테이지

그림 13과 같은 나노 패터닝 실험장치에서 임프린팅헤드에 장착된 마스터는 스테이지 위에 장착된 웨이퍼 척에 의해 고정되어 있는 웨이퍼에 미소이동으로 접근하다 접촉하게 되며, 접촉 후에는 패턴이 웨이퍼 상에 전사될 수 있도록 임의의 압력에 의해 가압하게 된다. 이 때 그림 15(a)와 같이 임프린팅 마스터와 웨이퍼가 경사진 상태에서 임프린팅을 할 경우 웨지(wedge)현상이 발생하는 문제가 생기기 때문에 구조적으로 마스터와 웨이퍼 면을 서로 평행하게 유지해 주는 것이 매우 중요하다. 하지만 기구의 가공 및 조립 오차로 인하여 완벽하게 평행을 유지하는 것이 매우 어렵기 때문에 미소한 비평형 면을 기구적 운동에 의해 평형 면을 이루도록 보상해 주어야 한다. 이러한 방법에는 능동구동에 의해 기구적 평형을 보상해 주는 방법과 수동적인 컴플라이언스 메커니즘에 의해 보상해주는 방법을 고려할 수 있다. 전자는 기구가 복잡해지고 장비의 단가가 상승하는 단점을 가지기 때문에 본 연구에서는 PZT와

갭센서를 이용한 능동적 방식과 수동적 컴플라이언스 메커니즘을 이용하여 임프린팅실험을 수행했다.

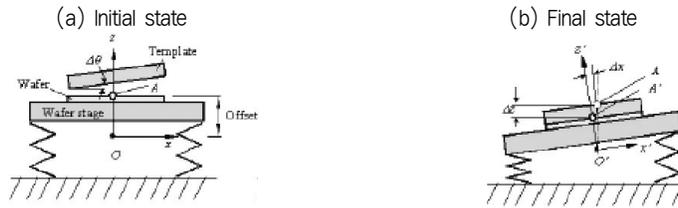


그림15. Nano-imprinting master patterns

능동적인 방식은 기본적으로 갭센서를 이용하여 임프린팅간극을 측정하여 임프린팅을 하기 때문에 시스템의 셋업이 어렵지만 비교적 양호한 임프린팅 결과를 얻을 수 있고, 수동적 컴플라이언스 메커니즘을 이용한 방법은 작용하는 임프린팅 하중을 이용하여 마스터와 웨이퍼의 평행화를 시킨 후 임프린팅을 수행하기 때문에 공정조건에 영향을 받기 때문에 공정조건 안정화가 중요하다.

수동적 컴플라이언스 메커니즘의 구동방법은 선형으로 구동되어 웨이퍼에 접근하는 마스터가 초기단계에서 웨이퍼 면과 비평행면을 이루기 때문에 웨이퍼 면에 접촉할 때에는 어느 한 점부터 접촉된 후 계속 가압에 의해 전 면에 걸쳐 접촉이 이루어진다.

이 때 스테이지는 마스터와 평행을 이루도록 가압이 됨에 따라 웨이퍼 면이 그림 15(b)와 같이 경사가 이루어야 한다. 따라서 스테이지는 2 자유도의 경사를 위한 회전운동과 1 자유도의 중력방향 병진운동이 필요하다. 또한 경사진 스테이지의 웨이퍼 위의 중심(center)은 스테이지가 경사를 이룸에 따라 평면상으로 병진 이동하게 된다. 그러므로 스테이지는 평면상의 병진 운동을 보살할 수 있는 구조가 첨가되어야 하며, 최소 5자유도의 운동을 할 수 있는 구조가 되어야 한다. 본 연구에서는 스테이지가 3자유도의 면외운동(Out-of-motion)과 3자유도의 평면운동(In-plane motion)을 구현할 수 있는 메커니즘을 개발했다.

스테이지의 메커니즘 설계에 있어서 강제 평판과 컴플라이언스를 갖는 유연 스프링을 연결하여 6자유도의 수동운동을 구현한다. 또한 메커니즘이 단일 평판 상에서 제작되도록 평면 메커니즘으로 구현하며, 열변형에 대처할 수 있도록 대칭을 이루도록 한다. 이러한 개념으로 설계한 스테이지의 구조는 그림 16과 같다.

그림 16에서 중앙에 위치한 원형평판은 웨이퍼 척을 고정하기 위한 것이며, 이 원형평판과 외부의 환형평판과는 3 쌍의 굽힘형 스프링으로 연결된다. 1쌍의 굽힘형 스프링은 서로 대칭인 L 자형 스프링으로 구성된다. 이 스프링에 의해 중앙의 원형평판은 3자유도의 평면운동(In-plane-motion), 즉 2 자유도의 병진운동과 1자유도의 회전운동이 가능하다. 또한 외부의 환형평판은 3개의 판 스프링에 의해 고정됨과 동시에 3쌍의 굽힘형 스프링에 의해 원형평판과 연결된다. 3개의 판 스프링에 의해 환형평판은 2 자유도의 경사운동과 1자

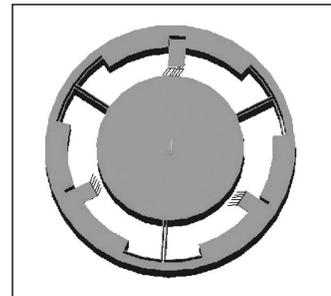


그림16. Structure of the stage with flexure

유도의 중력방향 병진운동의 면외운동이 가능하다. 환형평판이 면외운동을 할 때 중앙의 원형평판도 함께 면외운동을 하므로 원형평판은 총 6자유도의 운동이 가능하게 된다.

3.2 스테이지의 운동해석

스테이지의 운동방정식을 구하기 위해 침자의 번호는 기저를 0, 환형평판을 1, 원형평판을 2로 나타내자. 그리고 기저와 환형평판 사이의 판스프링을 위에서부터 시계방향으로 1, 2, 3으로 정하고, 환형평판과 원형평판 상이의 L자형 스프링을 아래의 오른쪽부터 시계방향으로 4, 5, 6, 7, 8, 9로 정하자. 이 때 운동방정식은 다음 식으로 나타낸다.

$$Mq + Kq = 0 \tag{1}$$

여기서,

$$M = \begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$M_i = [\text{dia } m_i \quad m_i \quad I_{xi} \quad I_{yi} \quad I_{zi}] \tag{3}$$

$$K = \begin{bmatrix} K_{11} & -K_{12} \\ -K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$K_{11} = \sum_{j=1}^9 \tilde{D}_{1j} \tilde{K}_j \tilde{D}_{1j}^T \tag{5}$$

$$K_{22} = \sum_{j=1}^9 \tilde{D}_{2j} \tilde{K}_j \tilde{D}_{2j}^T \tag{6}$$

$$K = \begin{bmatrix} K_{11} & -K_{12} \\ -K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \tag{7}$$

$$D_0 = \begin{bmatrix} 0 & -d_z & -d_y \\ d_z & 0 & -d_x \\ -d_y & d_x & 0 \end{bmatrix} \tag{8}$$

$$\tilde{K}_i = \begin{bmatrix} {}^0R_{o_{si}} & 0 \\ 0 & {}^oR_{o_{si}} \end{bmatrix} \quad \tilde{K}_{si} = \begin{bmatrix} {}^oR_{o_{si}} & 0^T \\ 0 & {}^oR_{o_{si}} \end{bmatrix} \tag{9}$$

D는 평판 좌표의 원점에서부터 스프링까지의 좌표를 나타내는 것으로 첫번째 침자는 평판을, 그리고 두번째 침자는 스프링의 번호를 나타낸다. D 행렬의 요소들은 각 방향의 거리를 나타낸다.

\tilde{K}_{si} 는 i번째 스프링의 강성(stiffness)를 나타내며, ${}^oR_{o_{si}}$ 는 i번째 스프링의 기준좌표에 대한 회전행렬이다.

설계한 스프링과 평판을 식 (1)~(9)에 의해 동해석을 수행하여 12개의 진동모드를 얻었고, 이 중 중요한 모드에 대한 각 방향의 진동수는 다음과 같다.

$$[f = 66.7 \quad 66.7 \quad 64.5 \quad 129.8 \quad 129.8 \quad 114.5]$$

또한 FEM 해석을 통해서 스테이지의 진동모드 및 고유진동수를 구했다. 해석을 통해서 구한 각 방향의 중요한 진동모드와 진동수는 그림 17과 같다.

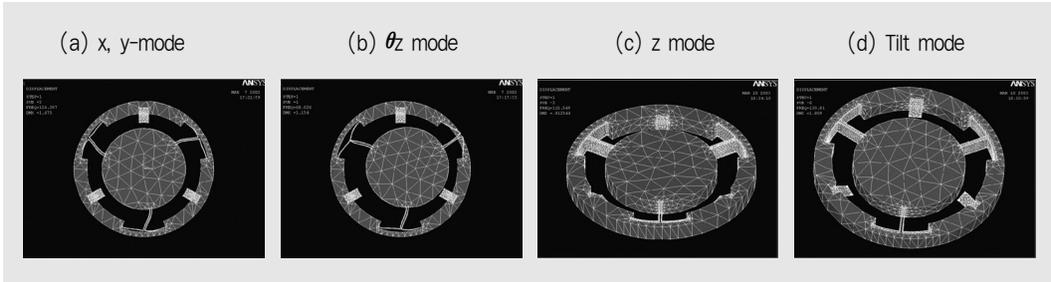


그림17. Simulation results of modal analysis

3.3 나노임프린팅 실험결과

전술한 바와 같이 해석결과에 따라 제작된 스테이지는 그림 18과 같고, 제작된 스테이지를 나노 임프린팅 실험장치에 설치하여 나노 임프린팅 공정실험을 수행했다. 실험은 4인치 실리콘 웨이퍼 표면에 UV레지스트(NIP-K21, 점도 6 cps, curing 조건 15mW/min)를 사용했고, 웨이퍼와 레지스트간의 점착력을 높이기 위해서 점착프로모터를 사용했다. 또, 임프린팅 마스터와 웨이퍼가 쉽게 분리될 수 있도록 소수성 단분자막(hydrophobic self-assembled monolayer)을 사용했다.

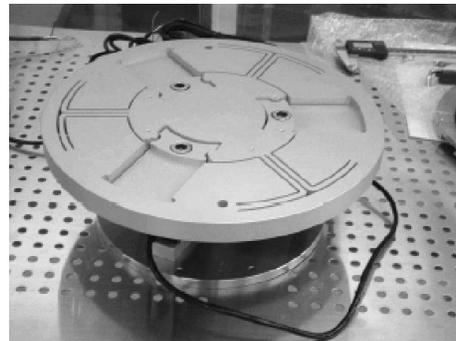


그림18. Manufactured flexure stage

그림 19는 제작된 UV나노임프린팅 실험장치에 사용된 Quartz 임프린팅 마스터와 사용된 마스터에 의해서 실리콘 웨이퍼에 전사된 나노패턴을 나타낸 것이다. 실험결과에 나타낸 바와 같이 사용된 패턴에 의해서 정확한 패턴이 전사되었음을 알 수 있으며, 임프린팅에 따른 전사효율을 높이기 위해서 사용된 임프린팅 마스터의 선폭을 100nm이하로 제작하는 기술, 잔류층의 두께(residual thickness)를 최소화할 수 있는 기술, 미소한 힘에 의한 임프린팅 효율을 높일 수 있는 방법에 대한 연구를 수행할 계획이다.

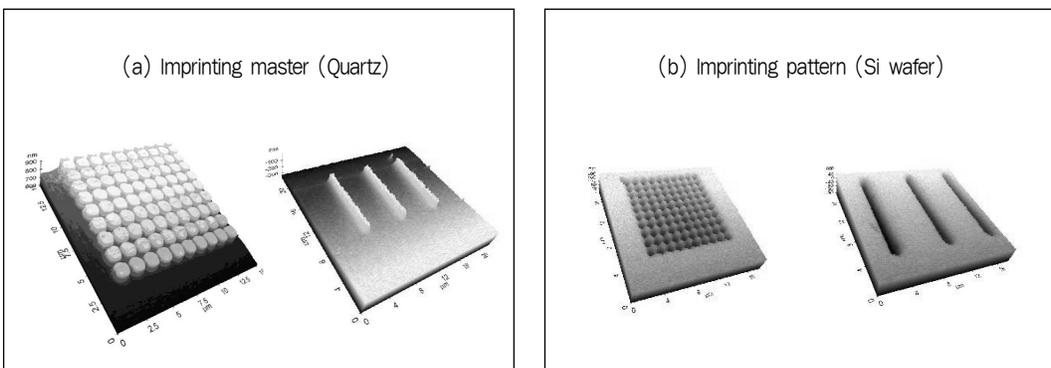


그림19. Imprinting results (200nm) using the manufactured experimental equipment

4. 결 론

현재까지 개발되어 상품화하고 있는 장비는 대부분 실험용 장비이며, 아직 양산화하여 사용하기에는 상당한 문제점을 가지고 있다. 유럽과 미국을 중심으로 향후 급속히 팽창할 나노제품 시장을 점유하기 위해서 최근 3~5년 동안 연구개발을 수행해 왔고, EVG, Suss MicroTec 등과 같이 대부분 반도체 장비를 바탕으로 기술개발을 하고 있다. 국내에서도 프론티어사업인 나노 메카트로닉스 기술개발사업으로 차세대 리소그래피 기술로 인식되고 있는 나노 임프린팅 장비를 개발하고 있으며, 기술개발이 완료될 경우 개발된 나노 임프린팅 공정 및 장비기술을 이용하여 선폭이 10nm~100nm의 나노제품을 저비용, 고생산성을 가지고 제작할 수 있는 나노 메카트로닉스 기술을 상품화할 수 있다.

참 고 문 헌

1. C. Schaefer, et al, "State of the art automated nanoprinting of polymers and its challenges", 7th International conference on the commercialization of micro and nano systems CMOS, Sep., 8-12, 2002
2. B. Michel, et al, "Printing meets lithography: soft approaches to high-resolution patterning, IBM, J. Res. & Dev., Vol.45, No.5, Sep., 2001
3. S.V. Sreenivasan, et al, "Low-cost nanostructure patterning using step and flash imprint lithography", NIST-SPIE Conference on Nanotechnology, Sep, 2001
4. D.J. Resnick, et al, "High resolution templates for step and flash imprinting lithography", J. of Microlitho. Microfab, Microsyst, Vol.1, No.3, Oct., 2002
5. T. Haatainen, et al, "Step and stamp imprint lithography using a commercial flip chip bonder", Inter. NNT conference, Dec., 2002
6. B. J. Choi, S. Johnson, M. Colburn, S. V. Sreenivasan and C. G. Willson, 1999, "Design of Template Alignment Stages for Step & Flash Imprint Lithography," Prof of ASPE 1999 Annual Meeting
7. S.Y.Chou, et al, "Imprint Lithography with sub-10nm Feature Size and High Throughput", Microelectronics Engineering, No.35, 1997



이 재 중

- 한국기계연구원 지능형정밀기계연구부 책임연구원
- 관심분야 : 나노임프린팅 공정 및 장비기술, E-Beam리소그래피 기술
- E-mail : jjee@kimm.re.kr



김 기 홍

- 한국기계연구원 지능형정밀기계연구부 선임연구원
- 관심분야 : 나노임프린팅 장비 및 나노측정기술, E-Beam리소그래피 기술
- E-mail : geehong@kimm.re.kr



최 기 봉

- 한국기계연구원 지능형정밀기계연구부 선임연구원
- 관심분야 : 나노스테이지기술, 지능형 로봇제어기술
- E-mail : kbchoi@kimm.re.kr



정 광 조

- 한국기계연구원 지능형정밀기계연구부 책임연구원
- 관심분야 : 지능형 로봇제어기술
- E-mail : gjchung@kimm.re.kr