

Multi-dispensing 방법에 의한 UV-나노임프린트 리소그래피

정준호, 심영석, 손현기, 신영재, 이응숙 | 한국기계연구원

1. 서론

1996년 Chou교수^[1]가 개발한 가열방식의 나노임프린트 리소그래피(nanoimprint lithography, NIL)은 선폭 100 nm 이하의 나노구조물을 경제적으로 제작할 수 있는 대표적인 나노패터닝(nanopatterning)공정으로 많은 기대가 모아지고 있으나, 몇 가지 문제점을 갖고 있다. 다층(multi-layer)작업시 열변형에 의해 다층정렬이 어렵다는 점과, 점도가 큰 레지스트(resist)를 임프린트하기 위해서는 고압(30 bar 정도)이 필요하기 때문에 하단에 제작된 구조물이 손상될 수 있으며, NIL에서 일반적으로 사용되는 불투명한 스탬프(stamp)는 다층화 정렬작업에 불리하게 작용한다. 이러한 문제점들을 해결할 수 있는 방법으로는 상온저압 프린팅 공정기술인 UV 나노임프린트 리소그래피(ultraviolet nanoimprint lithography, UV-NIL)를 들 수 있다.

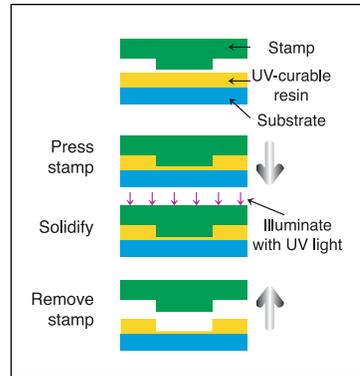


그림 1. Schematic of the UV-nanoimprint

UV-NIL은 1996년 Philips 연구팀인 Haisma 등^[2]에 의해 발표된 바가 있으나 반도체공정에 적용하기 위한 체계적인 연구는 Sreenivasan 등^[3-4]에 의해 이루어 졌다고 할 수 있다. 이 공정기술은 UV 경화소재를 사용하여 상온저압으로 나노구조물을 제작할 수 있는 기법으로, 가열방식 NIL에서는 일반적으로 실리콘 스탬프가 사용되는데 반하여, UV 투과성 재질인 수정(quartz), 유리(glass) 등으로 제작된 스탬프가 사용된다는 점이 특징이다.

UV-NIL의 기본 원리는 [그림 1]에서 나타난 바와 같이 기판(substrate) 위에 코팅된 UV 경화소재를 UV 투과성 스탬프로 가압한 상태에서 UV를 조사하여 경화시킨 후, 이방성 에칭과정과 lift-off 과정을 거쳐 나노패턴을 기판 위에 전사하는 방식이다.

1999년에 Sreenivasan 등^[3-4]이 제안한 Step & Flash Imprint Lithography (SFIL) 공정에서는 전달층(transfer layer)을 추가로 사용한다는 점과 UV 경화 레지스트를 충전시키는데 있어 표면장력을 이용한다는 점이 특징이며, 현재는 전달층과 스탬프 사이에 UV 경화 레지스트 액적을 떨어뜨린 후 스탬프로 가압하는 방식으로 연구가 진행되고 있다. SFIL의 또 다른 특징은 step&repeat 방식으로 전체 웨이퍼를 한번에 임프린트하는 것이 아니라 소 단위 크기의 스탬프로 여러 번 반복하여 임프린트하는 방식을 채택

하고 있다는 것이다. 이외에도 2000년도부터 유럽^[5]과 일본^[6-7]에서 UV-NIL 관련 연구가 활발하게 진행되고 있다.

나노스탬프의 형상정밀도는 기관에 각인된 최종 구조물의 정밀도에 직접적으로 영향을 미치기 때문에 나노스탬프 제작기술은 UV-NIL의 핵심 요소 기술이라 말할 수 있다. 본 연구에서는 Cr 층을 하드마스크(hard mask)로 사용한 에칭방법으로 5×5×0.09 in. 나노스탬프를 제작하고, 제작된 나노스탬프의 SEM 측정 결과를 중심으로 Cr 층을 사용한 나노스탬프 제작기술에 대해 토론한다.

지금까지의 UV-NIL은 웨이퍼 위에 광경화성 레지스트를 공급하는 방식에 따라 spin-coating 방식과 dispensing 방식으로 나눌 수가 있다. Spin-coating 방식에서는 spin-coater를 사용해서 웨이퍼 전체 면에 레지스트 박막을 코팅하는 방식으로 single-step 임프린트 방법^[7] 과 step & repeat 임프린트 방법에 모두 적용될 수 있다. 한편, dispensing 방식은 dispenser로 일정량의 레지스트 액적을 웨이퍼 표면에 공급한 후 스탬프로 가압하여 임프린트를 하는 방법^[4]으로, 현재 소단위 스탬프(일반적으로 1 in. 이하)를 사용하는 step & repeat 방법에만 적용되고 있다.

본 연구에서는 dispensing 방식 UV-NIL에서 대면적 스탬프를 효과적으로 사용하기 위하여 multi-dispensing 방법에 의한 UV-NIL을 제안하고 관련 실험을 수행하였다. 기존의 소단위 스탬프에서 사용되는 dispensing 방식을 대면적 스탬프에 동일하게 적용할 경우, 레지스트가 충전해야 할 박막영역이 넓어짐에 따라 공정시간이 대폭 증가된다. 본 연구에서는 웨이퍼의 모든 단위영역에 대해 각각 레지스트 액적을 dispensing 한 후 스탬프를 사용하여 single-step으로 가압하기 때문에, 레지스트의 흐름영역은 해당 단위영역으로 국한되어 레지스트의 충전시간이 단위영역 크기의 스탬프를 사용했을 경우와 동일하게 된다. 이 기법에서는 단위영역과 단위영역 사이에 레지스트가 없는 영역이 존재하게 되는데, 최종적으로 이 부분은 dicing 등으로 제거되고 단위영역만 제품으로 사용된다. 본 논문에서 실험 결과를 토대로 제안한 기법의 타당성을 검증한다.

2. Quartz 스탬프 제작과정 및 결과

4 in. 웨이퍼에 대한 UV-NIL을 수행하기 위해 UV가 투과하는 포토마스크용 quartz 기관을 사용하여 5×5×0.09 in. 나노스탬프를 제작했다. [그림 2]는 스탬프의 기본 설계치수를 보여 주고 있다. 가운데 21개의 사각형 형상은 UV-NIL로 제작될 제품을 가상적으로 나타낸 것이다. 본 연구에서는 4 in. 웨이퍼 위에 21개의 13×13 mm 제품에 대한 single-step 방식 UV-NIL 실험을 하기 위해 스탬프를 제작하였으며, 각각의 전 제품영역에 대해 나노구조물을 제작하지 않고 4개의 모서리와 가운데에 500×500 μ m 영역에만 나노구조물을 설계 제작하였다. CADENCE S/W에 의해 설계된 패턴을 구성하는 선의 폭은 100 nm-1 μ m이며, 깊이는 200 nm이다. [그림 3]

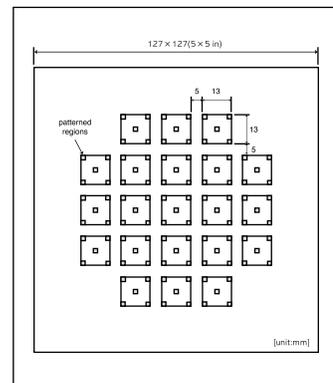


그림 2. Stamp geometry

그림 4는 Cr 층을 하드마스크로 사용한 에칭 방법에 의해 스탬프를 제작하는 과정을 보여주고 있다. E-beam 레지스트와 Cr이 도포된 마스크에 e-beam을 사용해서 패턴을 전사한다. 이어 e-beam 레지스트를 현상(develop)하고 Cr 층을 에칭 한 후 잔여 레지스트를 제거하게 된다. 이 단계까지는 기존의 포토마스크 제조방법과 동일하며 quartz에 나노구조물을 전사하기 위해서는 Cr을 하드마스크로 사용한 에칭 작업과 최종적인 Cr 제거작업이 추가된다.

본 스탬프 제작에 사용된 quartz 기판은 일본 HOYA 사의 EHQ 5009 2C ZEP7000으로 도포된 Cr과 레지스트의 두께는 각각 100 nm와 400 nm이다. [그림 4(a)] 초기의 패턴 형성을 위한 e-beam 리소그래피를 위해 HITACHI HL800M 50 keV vector scan e-beam 장비를 사용하였고, dose 양은 25 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 로 고정하였다. [그림 4(b)] 패턴을 형성한 후에 FAIRCHILD spin spray를 이용하여 레지스트를 현상하고, 패턴에 남아있는 잔여 레지스트 제거와, Cr 에칭에 의한 패턴 형성을 위해 UNAXIS VLR-700 ICP를 사용하였다. 잔여 레지스트 제거시 사용된 gas는 O_2 이며 전체 유량은 30 sccm, 작업 진공도는 10 mTorr를 유지하였다. Cr 에칭 시에는 $\text{Cl}/\text{O}_2/\text{He}$ gas를 혼합하여 사용하였으며, 전체 유량은 62 sccm이고, 작업 진공도는 6 mTorr를 유지하였다. [그림 4(c)] Cr 패턴을 형성한 후에 SUCCEED wet bench를 사용하여 레지스트를 strip하고, [그림 4(d)] quartz 에칭을 위하여 UNAXIS VLR-700 ICP를 사용했으며, 200 nm 깊이를 갖는 quartz 패턴을 형성하였다. 패턴 형성시 공정조건은 $\text{SF}_6/\text{O}_2/\text{He}$ gas를 혼합하여 사용하였고, 전체유량은 50 sccm, 작업진공도는 5 mTorr로 진행하였다. [그림 4(e)] 최종적으로 Cr을 제거하고, WACOM wet bench로 세정하여 스탬프를 최종적으로 제작하였다. [그림 4(f)] 2002년 관련 연구분야의 선두그룹인 미국의 Motorola lab과 텍사스 주립대학에서는 CD(critical dimension) 손실을 최소화하기 위해 Cr 층을 10 nm 두께로 코팅하여 사용하여 20 nm 선폭을 구현한 바가 있다. [8]

본 연구에서는 100 nm로 코팅이 된 포토마스크용 quartz를 사용한 결과, 최소 선폭이 설계 치수인 100 nm를 상당히 초과하여 377 nm로 제작된 것이 측정되었다. [그림 5(a), 그림 6(a)] 이러한 CD 오차는 패턴이 나노크기로 미세해지면서 나타나는 현상으로, 초기에 e-beam 리소그래피 과정을 거쳐 얻은 선폭은 100 nm 였으나, 레지스트를

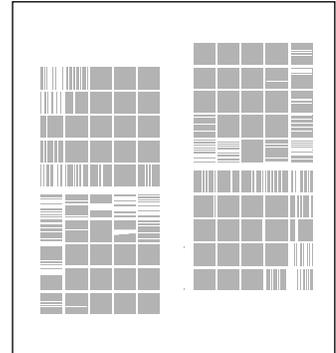


그림3.Stamp geometry

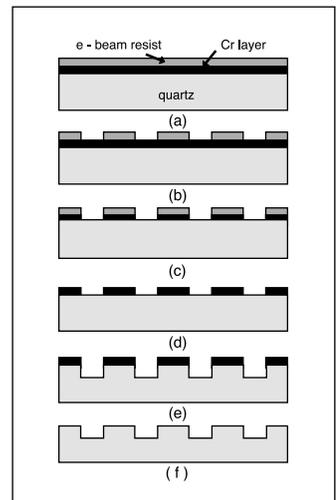


그림 4. Schematic of nanostamp fabrication procedure: (a) coat quartz plate with Cr and resist layers, (b) form pattern on resist by e-beam lithography, (c) etch Cr layer, (d) strip resist, (e) etch quartz plate, and (f) strip Cr layer

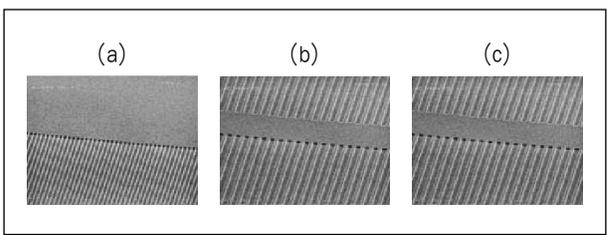


그림 5. SEM images of the grooves of the stamp with the designed widths: (a) 100nm, (b) 600nm, and (c) 1mm

현상하거나, Cr을 에칭하는 과정에서 패턴이 형성된 주변의 레지스트나 Cr 층들이 과도하게 에칭되었기 때문이다. 그러나, 600 nm 선폭 이상에 대해서는 2% 이하의 CD 오차를 나타냄으로써 비교적 양호한 치수 정밀도를 보이고 있다. [그림 5 and 6] Groove간의 최소간격을 100 nm로 설계한 부분을 측정한 결과 [그림 7]에서와 같이 10% 내외의 CD 오차를 나타내었다. 이 결과는 100 nm 선폭 groove 제작에 비하여 groove사이에 있는 양각의 간격을 100 nm로 제작하는 것이 보다 용이했음을 보여주고 있다.

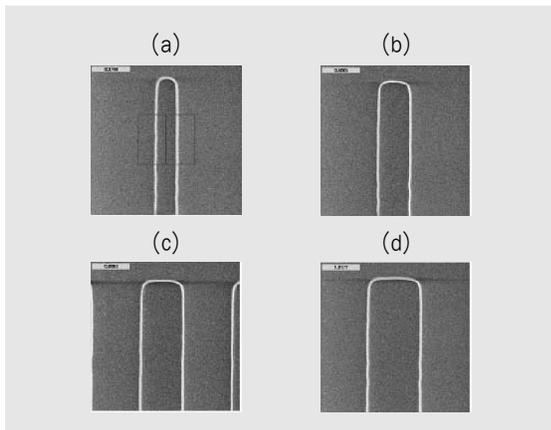


그림 6. CD measurement results for the grooves of the stamp with the designed widths: (a) 100nm, (b) 600nm, (c) 800nm, and (d) 1µm.

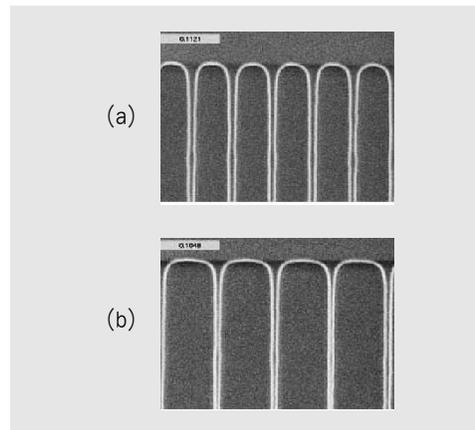


그림 7. Dimension measurement results of the groove intervals of stamp

3. Multi-dispensing 방식에 의한 UV-NIL 실험 및 결과

본 연구에서는 SUSS Microtech사의 aligner인 MA6를 사용하여 UV-NIL 실험을 수행하였으며 UV 경화 레지스트는 일본의 Tejin Seiki사에서 개발한 TSR-820 (viscosity=225 cps)을 사용했다. UV 노출 후 경화된 레지스트와의 분리를 용이하게 하기 위하여 제작된 quartz 스탬프에는 점착 방지막(anti-adhesion layer) 처리를 하였다. 점착 방지막 처리를 위하여 사용한 시약과 용매는 Trichloro(1H, 1H, 2H, 2H-perfluorootyl)silane, ethanol, acetone, toluene, H₂SO₄, H₂O 이며, 처리 전의 bare quartz에 대한 접촉각은 27° 였으나 처리 후에 105°로 증가되었음을 확인할 수 있었다.

서론에서 언급한 바와 같이 UV-NIL은 웨이퍼 위에 UV 경화성 레지스트를 공급하는 방식에 따라 spin-coating 방식과 dispensing 방식으로 나눌 수가 있다. Spin-coating 방식의 UV-NIL에서는 spin-coater를 사용해서 웨이퍼 위에 레지스트 박막을 코팅하고 스탬프로 가압하여 임프린트하고, dispensing 방식의 UV-NIL에서는 dispenser로 일정량의 레지스트 액적을 웨이퍼 표면에 공급한 후 스탬프를 가압하여 임프린트한다. Spin-coating 방식에 의한 UV-NIL을 시도한 Hiroshima 등^[7]은 진공환경에서 5×5mm 스탬프를 사용했으며, Otto 등^[8]은 step & repeat 방법에 10×10mm 스탬프를 사용하여 대기압상태에서 임프린트를 수행한 바가 있다. 이와 같이 spin-coating 방식은 진공환경을 사용하거나 10×10mm 정도의 작은 스탬프를 사용하고 있는데 이는 대면적 스탬프를 사용할 시 공기포집이 문제가 되기 때문이다. 본 연구에서도

4 in. 웨이퍼에 TSR-820을 spin-coating한 후 5 in. 스탬프를 사용하여 UV-NIL을 수행한 결과 [그림 8]과 같이 상당히 많은 부분에 공기가 포집되어 있는 것을 발견할 수 있었다.

Dispensing 방식은 MII사에서 개발한 장비에서 채택하고 있는 방식으로 1 × 1 in. 스탬프를 사용하고 있으며 대기압 환경에서 작업이 가능하다. 그러나 각각의 단위영역에 대해 dispensing과 임프린트에 1-2 분 정도가 소요되고 4 in. 웨이퍼 기준 7번의 반복작업이 필요하기 때문에 각 4 in. 웨이퍼에 대해 10여분의 작업시간이 요구된다.

본 연구에서는 대기압 환경에서 대면적 스탬프를 효과적으로 사용하기 위한 multi-dispensing 방법에 의한 UV-NIL을 제안한다. 이 방법에서는 웨이퍼 상의 모든 단위영역에 대해 각각 일정한 양을 dispensing하고 대면적 스탬프를 사용해서 single-step UV-NIL을 수행하게 된다. 본

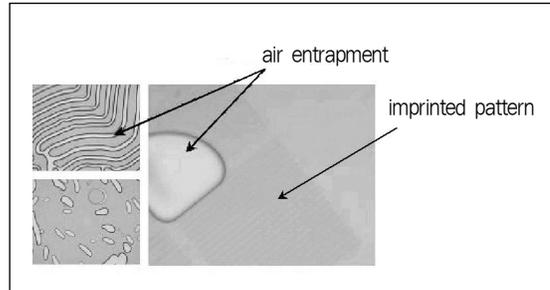


그림 8. Optical microscope images of air bubbles entrapped into the resist

연구에서는 5 in. 스탬프와 4 in. 웨이퍼를 사용한 임프린트 실험을 수행하기 위해서 0.2 μl까지 유량제어가 가능한 pipette (Vistalab사)을 사용했으며, 각 단위영역 중앙에 dispensing을 용이하게 하기 위해 여러 개의 구멍이 가공된 가이드(guide)를 제작했다. 각 웨이퍼에 대해서는 세정처리를 했으며, [그림 9(a)]는 레지스트 액적을 multi-dispensing한 웨이퍼를 보여 주고 있다.

Dispensing 가이드를 제작하여 사용했으나 수작업에 의해 위치 오차가 발생했고, 사용한 레지스트의 점도가 큰 관계로 0.2 μl로 고정된 dispensing양 또한 다소의 변화가 발생했다. [그림 9(b)]는 aligner MA6를 사용해서 가압(pressure = 1 N/cm²)한 상태에서 UV 노출(exposure time = 60 sec, exposure intensity = 12 mW/cm²)을 하여 레지스트가 경화된 후 스탬프가 웨이퍼에 부착되어 있는 상태를 보여주고 있다. 스탬프에 의해 눌러 온 형태를 이룬 레지스트의 직경이 차이를 보인 원인은 주로 dispensing한 액적 양의 편차 때문으로 판단되며, 다음으로는 스탬프와 웨이퍼 사이의 정렬 오차, 스탬프와 웨이퍼 평탄도가 영향을 주었을 것으로 보인다. Dispensing한 액적 양의 편차문제는 초정밀 자동 dispenser를

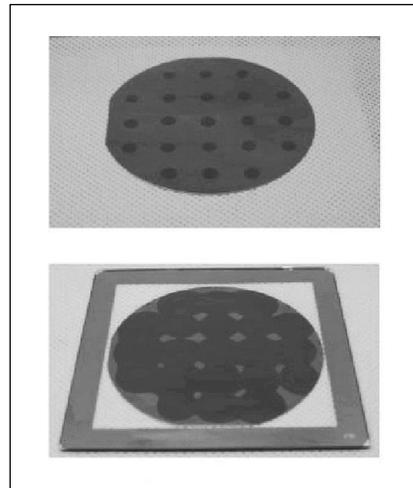


그림 9. Resin drops (a) multi-dispensed on a wafer and (b) pressed by the quartz stamp

사용하면 쉽게 해결될 수 있을 것으로 판단된다. Dispensing 양의 편차와 가압력 부족으로 모서리부분이 일부 미충전된 경우를 제외한 모든 단위영역이 완전 충전되었음을 확인할 수 있었다. 단위영역사이에 존재하는 미충전부분은 최종적으로 제거될 부분으로, 스탬프에 의한 가압시 이 부분에 공기가 고립되어 주위의 잔여두께를 증가시킬 소지가 있기 때문에 이를 방지하기 위한 연구가 현재 진행 중이다.

본 연구에서 사용한 aligner MA6는 경사를 주면서 스탬프와 웨이퍼를 분리할 수 있는 기능이 없기 때문에, 임프린트한 후 웨이퍼가 붙어있는 스탬프를 chuck으로부터 분리한 후 수작업으로 측면부부터 분

리하였다.

[그림 10]은 웨이퍼에 임프린트된 레지스트 패턴을 보여 주고 있다. 스탬프에 각인되어 있는 최소선폭 377 nm, 최소간격 100 nm, 높이 200 nm 의 구조물을 포함해서 1 μm 까지 다양한 선폭의 구조물들이 상당히 정밀하게 전사된 것을 볼 수 있다. [그림 11]은 임프린트된 선폭 600 nm 간격 400 nm 높이 200 nm 패턴의 단면을 보여 주고 있으며, 잔여 레지스트 두께는 1.1 μm 로 측정되었다. Aligner MA6에서 hard contact 모드를 적용한 경우 잔여 레지스트 두께는 3-4 μm 였으며, 가압한 상태에서 60sec를 유지한 후 vacuum hard contact 모드를 적용한 결과 1 μm 내외의 잔여 레지스트 두께를 얻을 수 있었다. 가압한 상태에서 60 sec를 유지한 이유는 레지스트가 단위영역을 채울 수 있는 충분한 시간을 주기 위함이다. [그림 11]에서 구조물의 단면이 직사각형의 형태로 보이지 않은 것은 패턴의 단면이 매끄럽게 절단되지 않았기 때문으로 보인다.

O₂ RIE (reactive ion etching)공정에 의해 임프린트된 패턴을 Si 웨이퍼로 전사하기 위해서는 충분히 작은 잔여두께(100 nm 선폭, 200 nm 높이 구조물에 대해 대략 500 nm 이하의 잔여두께 필요)가 요구되나, 본 연구에서 사용한 aligner MA6의 가압력(최대 가압력 $p = 1 \text{ N/cm}^2$)이 4 in. 웨이퍼에 대한 임프린트를 위해 충분하지 못한 관계로 1 μm 내외의 두께를 얻을 수 밖에 없었다. 5×5 mm 스탬프를 사용한 Hiroshima 등^[7]은 20-200 N/cm^2 의 압력을 가하여 초기 spin-coating 시 900 nm 두께의 레지스트를 290-480 nm로 임프린트 했음을 보고한 바가 있다.

본 연구에서는 아직 O₂ RIE 공정에 적용할 수 있을 만큼의 잔여두께를 얻지는 못했으나, multi-dispensing 방법에 의한 UV-NIL과 최소 선폭 377 nm 구조물을 갖는 5 in. quartz 스탬프를 사용하여 임프린트하는데 성공했다. 또한, 전체 소요공정시간은 2분이나 UV intensity를 증가시키고 공정조건을 최적화한다면 공정시간을 보다 더 단축시킬 수 있다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 UV-NIL용 스탬프를 제작하기 위하여 UV 투과성 재질의 quartz를 사용하였다. 제작된

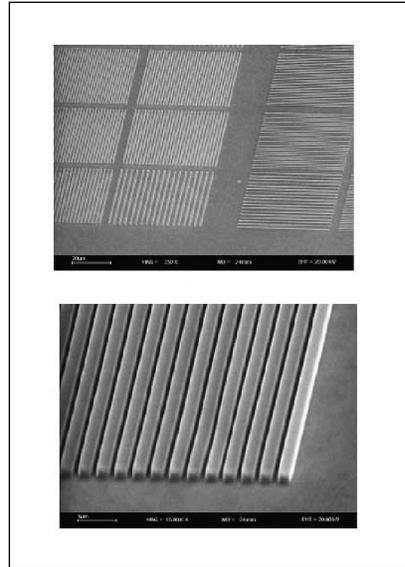


그림 10. SEM images of (a) the imprinted patterns of the resist and (b) a 377-nm wide and 200-nm high pattern spaced 100-nm apart.

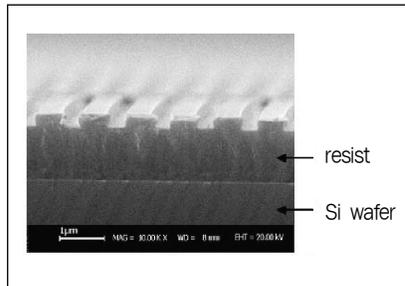


그림 11. SEM image of the cross-section of the imprinted resist

최소 선폭은 설계 치수인 100 nm를 3배 이상 초과하는 377 nm로 측정되었으며 이는 레지스트 현상과정 및 과도한 두께(=100 nm)의 Cr 층에 대한 에칭과정에서 발생하는 CD 오차의 결과라 판단된다. 이러한 현상 및 에칭 공정조건을 최적화한다면 현재 국내에서도 100-200 nm 선폭의 quartz 스탬프 제작이 가능 하리라 사료된다. 제작한 5in. 스탬프에 점착 방지막을 처리하여 multi-dispensing 방식에 의한 UV-NIL 실험을 수행했으며, 대기압 환경에서 4in. 웨이퍼에 대해 377 nm-1 μ m 선폭의 나노구조물을 성공적으로 임프린트할 수 있었다.

향후 계획으로, 본 연구팀은 100 nm 이하 선폭을 갖는 quartz 나노 스탬프 제작에 관한 연구를 지속적으로 수행하며, O₂ RIE공정을 위하여 4 in. 웨이퍼 전체에 대해 잔여두께가 500 nm 이하로 균일하게 유지될 수 있는 방안에 대해 연구할 계획이다.

후 기

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 나노메카트로닉스기술개발사업단의 연구비 지원(M102KN01001)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] Chou, S.Y., Krauss, P.R., and Renstrom, P.J., "Nanoimprint lithography," J. Vac. Sci. Technol. B Vol. 14(6), pp. 4129-4133, 1996.
- [2] Haisma, J., Verheijen, M., and Heuvel, K., "Mold-assisted nanolithography: A process for reliable pattern replication," J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 14(6), pp. 4124-4128, 1996.
- [3] Colburn, M., Johnson, S., Stewart, M., Damle, S., Bailey, T., Choi, B., Wedlake, M., Michaelson, T., Sreenivasan, S.V., Ekerdt, J., and Wilson, C.G., "Step and flash imprint lithography: A new approach to high-resolution patterning," Proc. SPIE, Vol. 3676, pp. 379-389, 1999.
- [4] Sreenivasan, S.V., "Nanoimprint lithography using UV curable liquids," in ASME International Conference on Integrated Nanosystems, Berkeley, CA, September 18-20, 2002.
- [5] Bender, M., Otto, M., Hadam, B., Spangenberg, B., and Kurz H., "Multiple imprinting in UV-based nanoimprint lithography related material issues," Microelectronics Eng., Vol. 61-62, pp. 407-413, 2002.
- [6] Taniguchi, J., Kawasaki, T., Tokano, Y., Kogo, Y., Miyamoto, I., Komuro, M., Hiroshima, H., Sakai, N., and Tada, K., "Measurement of adhesive force between mold and photocurable resin in imprint technology," Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 41, pp. 4194-4197, 2002.
- [7] Hiroshima, H., Inoue, S., Kasahara, N., Taniguchi, J., Miyamoto, I. and Komuro, M., "Uniformity in patterns imprinted using photo-curable liquid polymer," Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 41, pp. 4173-4177, 2002.
- [8] Bailey, T.C., Resnick, D.J., Mancini, D., Nordquist, K.J., Dauksher, W.J., Ainley, E., Talin, A., Gehoski, K.,

Baker, J.H., Choi, B.J., Johnson, S., Colburn, M., Meissl, M., Sreenivasan, S.V., Ekerdt, J.G., and Willson, C.G., "Template fabrication schemes for step and flash imprint lithography," *Microelectronics Eng.*, Vol. 61-62, pp. 461-467, 2002.

[9] Otto, H., Bender, M., Hadam, B., Richter, F., Spangenberg, B., and Kurz, H., "Step and repeat UV-Nanoimprint Lithography: Material Issues," in the First Conference on Nanoimprint and Nanoprint Technology, San Francisco, CA, December 11-13, 2002.



정 준 호

- 한국기계연구원 지능형 정밀기계연구부 선임연구원
- 관심분야 : 나노임프린트 공정, 나노생산기술
- E-mail : jhjeong@kimm.re.kr



심 영 석

- 한국기계연구원 지능형 정밀기계연구부 연구원
- 관심분야 : 반도체 나노구조의 특성분석 및 응용
- E-mail : simsimhe@kimm.re.kr



손 현 기

- 한국기계연구원 첨단산업기술연구부 선임연구원
- 관심분야 : 금속 캐속조형공정(Direct metal solid freeform fabrication), 나노임프린트 리소그래피(UV nanoimprint lithography)
- E-mail : hsohn@kimm.re.kr



신 영 재

- 지능형 정밀기계연구부 선임연구원
- 관심분야 : 초정밀 연마기술
- E-mail : hjjeong@kimm.re.kr



이 응 숙

- 한국기계연구원 지능형 정밀기계연구부 책임연구원
- 관심분야 : 초정밀연마기술, 나노메카트로닉스 기술 분야
- E-mail : les648@kimm.re.kr