한국정밀공학회지 제 22 권 제 2 호 (2005 년 2 월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 22, No. 2, February 2005.

◆특집◆ 차세대 패턴닝 공정기술

상온저압 나노임프린트 리소그래피 기술

정준호*, 이응숙**

Room-temperature and low-pressure nanoimprint lithography technology

Jun-ho Jeong* and Eung-sug Lee**

Key Words : Nanoimprint lithography(나노임프린트 리소그래피), Nanofabrication(나노제작), Nanostructure(나노구조물), Nanomanufacturing (나노생산)

1. 서론

나노임프린트 리소그래피(Nanoimprint lithography, NIL) 기술은 경제적이고도 효과적으로 나노구조물을 제작할 수 있는 기술로, 나노구조물(nanostructute)이 각인된 스탬프(stamp)를 기재(substrate) 위에 스핀코팅(spin-coating) 또는 디스펜싱(dispensing)된 레지스트(resist)의 표면에 눌러 나노구조물을 전사하는 기술이다. 2003 년 international technology roadmap for semiconductors (ITRS)에는 NIL 기술이 신규로 추가되었는데 이는 extreme ultraviolet lithography (EUV), mask-less lithography (ML2)와 더불어 차세대 리소그래피로서의 가능성을 인정 받았음을 의미한다.

NIL 공정은 1995 년 프린스턴대학의 Chou 교수[1-2]가 최초로 제안했다. Chou 교수가 제안한 NIL 에서는 나노크기의 패턴이 부조(요철)형태로 형성된 스탬프로 poly(methylmethacrylate) (PMMA) 재질의 레지스트가 코팅되어 있는 기판 표면을 유리전이 온도이상의 고온조건인 140-180°C 에서 고압으로 누른 후 100°C 이하로 냉각시켜 분리하게 된다. 이에 따라 레지스트에는 스탬프의 나노패턴이 반대형상으로 전사되고, 이방성 에칭작업을 거쳐 레지스트 표면에서 눌려진 부분 즉, 잔여층(residual layer)을 제거한다. 이어, Ti 와 Au 를 기재 전체 면적에 고르게 증착한 후 리프트 오프(lift-off)공정을 통해 PMMA 와 PMMA 위에 증착된 Ti 와 Au 층을 제거한다. Chou 교수는 이 공정을 사용하여 10 nm 지름의 원형 금속 점 배열을 구현하는데 성공했다.

NIL 기술은 크게 가열식 (thermal-type) NIL 과 자외선 (ultraviolet, UV) NIL 로 나눌 수가 있는데, 앞에서 언급한 Chou 교수가 개발한 NIL 은 가열식-NIL 에 속한다고 할 수 있다. 이 가열식-NIL 기술은 다양한 기능성 레지스트를 사용할 수 있으나, 다층화작업이 필수적인 반도체 디바이스 제작에 있어 열변형으로 인하여 다층정렬이 어렵다는 단점을 갖고 있다. 그리고 고점도 레지스트를 임프린트하기 위해서는 고압(10-30 bar 정도)이 필요하기 때문에 기 제작된 하단의 나노구조물을 파손시킬 소지가 있고, 불투명한 스탬프는 다층화 정렬작업에 불리하게 작용한다.

이에 반하여, UV-NIL 은 1996 년 Haisma 등[3]에 의하여 최초로 제안되었는데, PMMA 와 같은 열가소성 재질을 사용하는 가열식-NIL 과 달리 저점성 광경화성 수지와 이를 경화하기 위해 자외선을 사용하는 것이 특징이다. 따라서 UV-NIL 은 상온 저압공정이 가능하여 다층화공정 및 대량생산에 적

* 한국기계연구원 지능형정밀기계연구부
Tel. 042-868-7604, Fax. 042-868-7721
Email jhjeong@kimm.re.kr
나노메카트로닉스 및 나노생산 특히, 나노임프린트공정, 나노가공 분야에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.
** 한국기계연구원 지능형정밀기계연구부

합하다. 본 논문에서는 UV-NIL 기술의 기본 원리 및 최근의 연구동향에 대해 살펴보도록 하겠다.

2. 본론

2.1 몰드-어시스티드 리소그래피 (Mold-Assisted Lithography, MAL)

앞에서도 언급한 바와 같이 MAL 은 1996 년 Haisma 등[3]에 의하여 제안되었으며 그의 기본 원

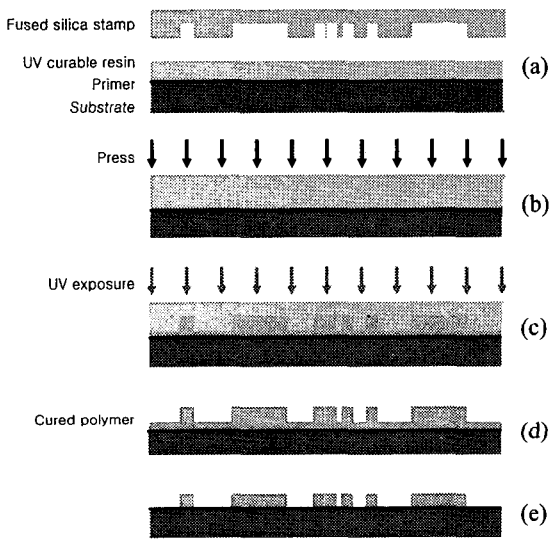


Fig. 1 Schematic of mold-assisted lithography. Transparent stamp prepared with a release layer and substrate with a primer and a UV curable resin (a). The resin fills on stamp grooves under vacuum contact and is then cured by UV exposure (c). After release, the residual layer remains between the patterns (d). The residual layer is removed by anisotropic etching (d).

리는 Fig. 1 과 같다. 먼저 나노구조물이 각인된 투명재질의 용융 실리카(fused silica) 스탬프를 제작하고 점착방지막을 처리한다. 그리고 프라이머(primer)층을 형성하고 광경화 수지를 기재 위에 도포한 후 제작한 스탬프를 누르면서 300 – 400 nm 파장의 자외선을 조사하여 광경화수지를 경화시키게 된다. 최종적으로 임프린트된 고분자 박막에 RIE(Reactive Ion Etching)공정을 거쳐 나노구조물이 기재에 전사된다. 실제 실험에서는 나노구조물이 각인된 용융 실리카 스탬프를 사용하지 않고 실리콘 (silicon) 스탬프와 용융 실리카 기재를 사용하여 실험을 하였으며 진공 가압 프린터 (vacuum contact printer)를 사용하여 가압력은 0.1 bar, 가압시간은 25 s 조건에서 실험을 하였다. 본 연구에서 지적한 MAL 의 문제점은 잔여층(residual layer) 두께의 불균일성이었다. 4 in. 웨이퍼를 사용했을 때 500 nm 이상의 잔여층 불균일도(non-uniformity)를 보였고, 이를 해결하기 위하여 3 cm 크기의 스탬프를 사용했을 경우는 50 nm 보다 작은 불균일도를 보였다고 밝혔다. 따라서, 작은 스탬프를 사용하여 반복적으로 임프린트를 수행하는 공정 즉 스텝-앤-리피트(step-and-repeat)가 대면적 공정에서 불균일도를 감소시킬 수 있는 방안이라고 제시한 바 있다.

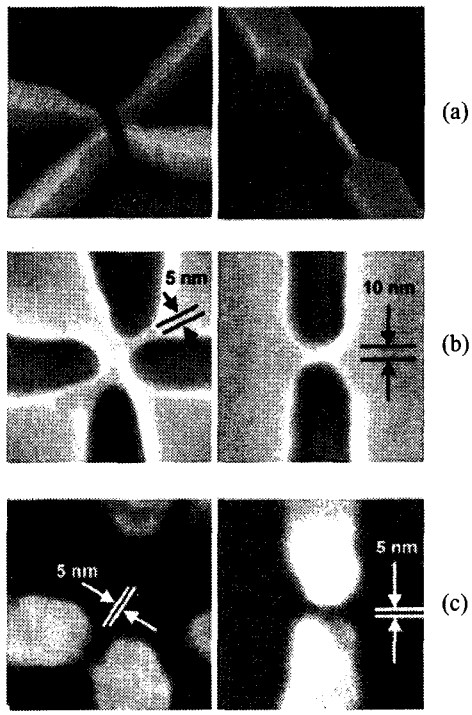


Fig. 2 Demonstration of photocurable nanoimprint lithography with application for single-molecule contacts. Silicon oxide mold (a). Imprinted resist (b). Au contacts after evaporation of metal and lift-off of the resist (c).

유럽에서 UV-NIL 에 대한 연구는 주로 Bender

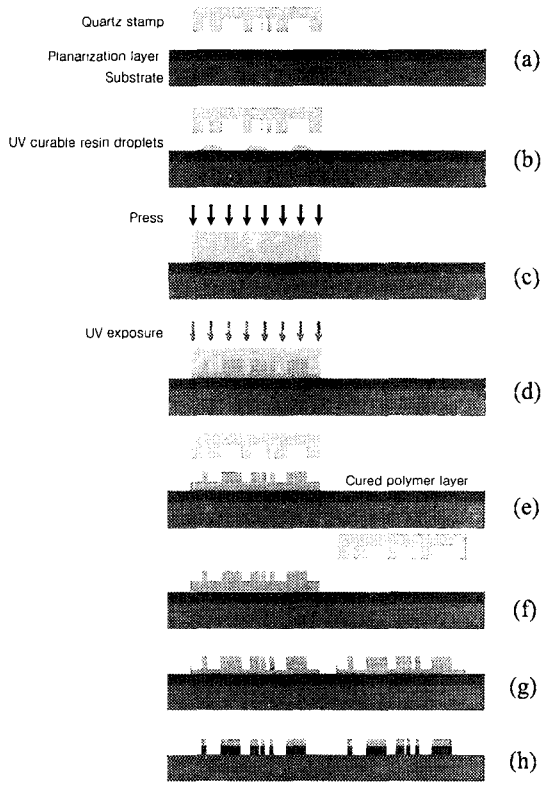


Fig. 3 Schematic of step-and-flash lithography. Transparent stamp prepared with a release layer and substrate with a planarization layer (a). UV curable resin droplets are dispensed on the substrate (b). The droplets are pressed with the stamp (c). The resin is then exposed to UV light (d). The stamp is separated from the polymer layer (e). The stamp is moved to a second position over the substrate (f). The subsequent stepping procedure is repeated until all the required fields are imprinted (g). Pattern transfer using anisotropic etching to remove residual layer (h).

와 Otto 등[4]에 의하여 이루어졌으며, 2004 년에는 4 인치 웨이퍼 위에 수지를 대략 200 nm 두께로 스핀코팅한 후 스텝-앤-리피트 방식을 사용해서 임프린트한 결과를 발표했다.[5] 이 연구에서는 마이크로 크기의 패턴이 각인된 1×1 cm^2 스탬프를 사용했으며 4 인치 웨이퍼에 대해 37 번의 임프린트를 수행하여 50 nm 급 잔류두께를 얻었는데 성공했다.

Chou 교수는 주로 가열식 NIL 개발에 주력하여 오다가 최근 들어 photocurable nanoimprint lithography (P-NIL)을 제안하였다.[6] 이 P-NIL 의 특징은 100 cp 정도의 광경화 수지를 100 nm 두께로 스핀코팅한 후 molecular-beam epitaxy (MBE)로 제작한 GaAs 와 SiO_2 재질의 스탬프와 수정 기재를 사용하여 임프린트를 수행했으며 전달층으로 PMMA 를 사용했다는 것이다. 이 연구에서 Chou 교수는 Fig. 2 에서와 같이 5 nm 의 나노구조물을 임프린트하는데 성공하였는데, 이는 UV-NIL 기술이 sub-10 nm 구조물 제작에 활용될 수 있음을 확인시켜주는 결과라고 판단된다.

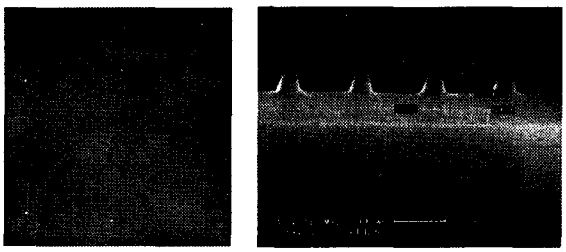
2.2 스텝-앤-플래시 임프린트 리소그래피 (Step-and-Flash Imprint Lithography, SFIL)

텍사스 오스틴 대학의 Sreenivasan 교수 등은 1999 년에 Step & Flash Imprint Lithography (SFIL) 공정기술을 제안했다.[7-8] 초기에 제안한 SFIL 공정에서는 먼저 전달층(transfer layer)이 실리콘 기판 위에 스핀코팅 된다. 이어 UV 투과성 스탬프가 전달층과 일정간격이 유지된 상태에서 저 점성 UV 경화수지를 표면장력에 의하여 안으로 충전되도록 한다. 충전이 완료된 시점에서 스탬프를 가압하고 UV 를 조사하여 경화시킨 후, 스탬프를 분리하게 된다. 이러한 작업을 반복하여 웨이퍼 전체에 대해 임프린트를 완료한 후 에칭과정과 리프트 오프(lift-off)과정을 거쳐 나노구조물을 기판에 전사한다. 현재는 Fig. 3 에서와 같이 전달층과 스탬프사이에 다수의 미소 UV 경화수지 액적을 떨어뜨린 후 스탬프로 가압하는 방식으로 수정되었다.

SFIL 는 1-4 cp 정도의 저 점도(viscosity) 수지를 사용하고 있기 때문에 1 인치 영역에 대해 20 N 정도의 저압으로 임프린트가 가능하다. 또한, 임프린트된 레지스트층과 평탄화층에 대한 2 단계 에칭과정을 통하여 잔여층 불균일에 의한 에칭결함을 상당히 감소시킬 수 있다. SFIL 용 스탬프는 포토마스크용 수정 원판으로 제작하며 6 인치 원판으로부터 4 개의 스탬프를 제작할 수 있다. 대기압 분위기에 이루어지는 SFIL 은 초기 액적의 위치를 최적화하여 임프린트 후 내부에 공기가 함입되지 않도록 한다. 이에 따라 초기에 액적형태였던 수지가 퍼져 sub-100 nm 의 잔여 박막을 형성하는데 150 s 정도의 가압과정이 필요하다.

Fig. 4 는 SFIL 공정 장비인 IMPRIO100

(Molecular Imprint Inc.)를 사용하여 임프린트한 결과를 보여주고 있다. IMPRIO100 은 8 인치 웨이퍼에 대한 SFIL 공정과 다층화를 위한 정렬작업이 가능한 장비이다. Fig. 4(a)는 IMPRIO100 으로 임프린트된 영역을 보여주고 있으며 Fig. 4(b)는 임프린트된 sub-50 nm 선폭 구조물이다. 현재 IMPRIO100 로 구현이 되는 전형적인 잔여층 두께는 60 - 70 nm 이며 균일도는 8 인치 웨이퍼 면적에 대해 250 nm (3σ)정도이다.



(a) (b)

Fig. 4 Imprint results obtained by SFIL process. 1 in. × 1 in. imprinted field (a). SEM cross-section image of 50 nm lines (b).

2.3 EPS 활용 UV-나노임프린트 리소그래피 (UV-nanoimprint lithography using an elementwise patterned stamp (EPS))

UV-NIL 공정에서 생선성을 확보하기 위한 가장 효과적인 방법은 스탬프를 대면적화 하는 것이다. 대기환경에서 대면적 스탬프를 사용하면 공기포획 결함이 발생하게 되는데 이를 제거하기 위해서는 MAL 과 같이 진공환경을 만들어야 한다. 그러나, 이러한 진공분위기를 위해서는 반드시 진공장치가 필요하고 진공환경에 적합한 수지를 사용해야만 한다. 이러한 문제점을 해결하고자 KIMM 에서는 저진공 환경 또는 대기압 환경에서 사용할 수 있는 대면적 EPS (Elementwise Patterned Stamp)를 사용한 UV-NIL 공정기술을 제안하였다.[9-10] 이 EPS 는 나노패턴이 각인되어 있는 단위요소(element)들 간에 채널 (channel)이 존재하여 임프린트 시 요소영역에 있던 공기가 요소영역 밖으로 밀려 나갈 수가 있다. 따라서, 대기압 및 저진공 환경에서 대면적 스탬프를 사용할 시 발생하는 공기포획 결함을 방지할 수 있다. 또한, EPS 는 스탬프와 임프린트된 고분자 박막간의 분리를 용이하게 해주는 장점을 갖고 있다. 다음에서 EPS 의 제작 및 UV-NIL 공정 결과에 대해 살펴 보도록 하겠다.

2.3.1 EPS 제작

4 in. 웨이퍼에 대한 UV-NIL 을 수행하기 위해 포토마스크용 수정기판을 사용하여 $5 \times 5 \times 0.09$ in.^{3}

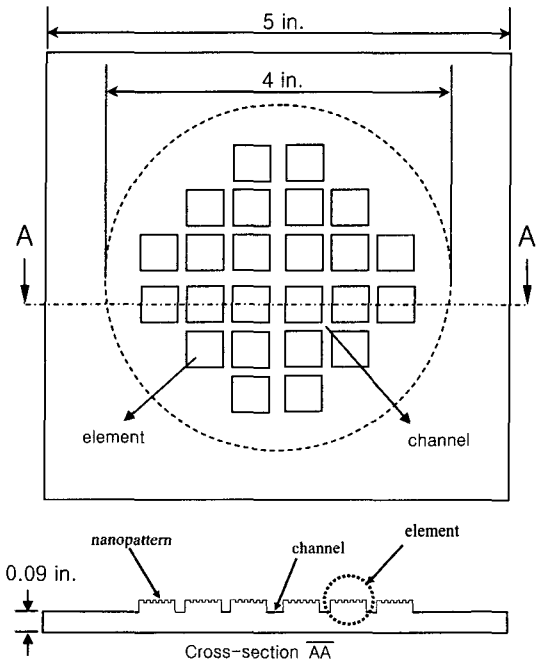


Fig. 5 The geometry of the EPS.

EPS 를 제작했다. 스탬프는 13×13 mm^2 단위요소를 갖는 스탬프와 10×10 mm^2 의 단위요소를 갖는 스탬프를 제작하였다. Fig. 5 는 제작한 스탬프의 기본설계치수를 보여 주고 있다. 13×13 mm^2 단위요소의 경우 제작상의 편의를 위하여 단위요소의 전체 영역에 나노구조물을 제작하지 않고 4 개의 모서리와 가운데에 500×500 μm^2 영역에만 나노구조물을 설계 제작하였다. 설계된 패턴을 구성하는 선의 폭은 100 nm - 1 μm 이며, 깊이는 200 nm 이다

Fig. 6 은 크롬 층을 하드마스크로 사용한 에칭 방법에 의해 스탬프를 제작하는 과정을 보여주고 있다. 이빔 레지스트와 크롬이 도포된 마스크에 이빔을 사용해서 패턴을 전사한다. 이어 이빔 레지스트를 현상하고 크롬 층을 에칭한 후 잔여 레

지스트를 제거하게 된다. 이 단계까지는 기존의 포토마스크 제조방법과 동일하며 수정층에 나노구조물을 전사하기 위해서는 크롬을 하드마스크로 사용한 에칭작업과 최종적인 크롬 제거작업이 추가된다.

본 스탬프 제작에 사용된 수정 기판은 일본 HOYA 사의 EHQ-5009-2C-ZEP7000 으로 도포된 크롬과 레지스트의 두께는 각각 100 nm 와 400 nm 이다. [Fig. 6(a)] 초기의 패턴 형성을 위한 이빔 리소그래피를 위해 HITACHI HL800M 50 keV vector scan 이빔 장비를 사용하였고, dose 양은 25 $\mu C/cm^2$ 로 고정하였다. [Fig. 6(b)] 패턴을 형성한 후에 FAIRCHILD spin spray 를 이용하여 레지스트를 현상했고, 패턴에 남아있는 잔여 레지스트 제거와 크롬 에칭에 의한 패턴 형성을 위해 UNAXIS VLR-700 ICP 를 사용하였다. 잔여 레지스트 제거 시 사용된 가스는 O_2 이며 전체 유량은 30 sccm, 작업 진공도는 10 mTorr 를 유지하였다. 크롬 에칭 시에는 $Cl/O_2/He$ 가스를 혼합하여 사용하였으며, 전체유량은 62 sccm 이고, 작업 진공도는 6 mTorr 를 유지하였다. [Fig. 6(c)] 크롬 패턴을 형성한 후에 SUCCEED wet brench 를 사용하여 레지스트를 스트립 (strip)하고, [Fig. 6(d)] 수정 에칭을 위하여 UNAXIS VLR-700 ICP 를 사용했으며, 200 nm 깊이를 갖는 수정 패턴을 형성하였다. 패턴 형성 시 공정조건은 $SF_6/O_2/He$ 가스를 혼합하여 사용하였고, 전체유량은 50 sccm, 작업진공도는 5 mTorr 로 진행하였다. [Fig. 6(e)] 크롬 층을 제거하고 THMR-IP3000 레지스트를 코팅한 후 Etec core2564 laser tool 로 패턴을 형성한 다음 이방성 에칭으로 1 ㎛ 두께의 채널을 형성하였다. [Fig. 6(f-g)]

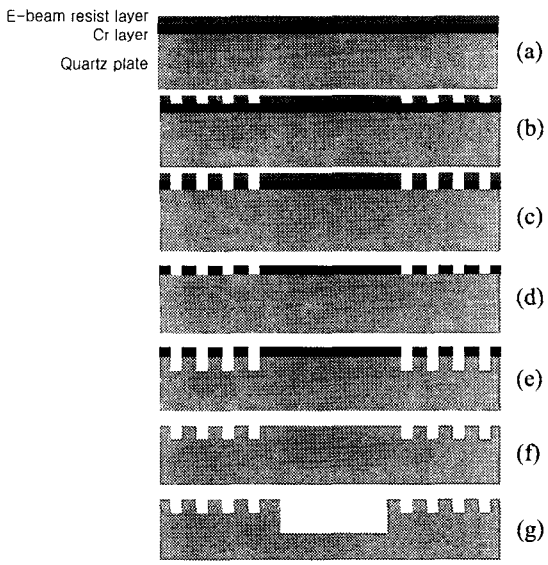


Fig. 6 Schematic of EPS fabrication process. Quartz mask with e-beam resist layer and Cr layer (a). The e-beam resist is patterned (b). Cr layer is etched (c). The remaining resist is stripped away (d). Quartz plate is etched (e). The remaining Cr is stripped away (f). Channels of EPS is finally fabricated (g).

설계된 스탬프의 선 두께 및 선간의 간격은 100 nm - 1 μ m 이었으나, 최종 제작된 스탬프의 SEM 측정결과 380 nm - 1 μ m 로 나타났다. 400 nm 이상의 패턴에서는 2% 이하 치수 오차로 설계수치에 부합하는 패턴이 형성 되었음을 확인할 수 있었고, 그 이하에서는 설계수치를 상회하는 값이 측정 되었다. 설계치 선폭이 100 nm 의 경우에 380 nm 로 각인된 것으로 측정되었는데, 이는 이빔 패턴닝 오차와 크롬과 수정층의 과도 에칭에 의하여 발생한 것으로 판단되었다.

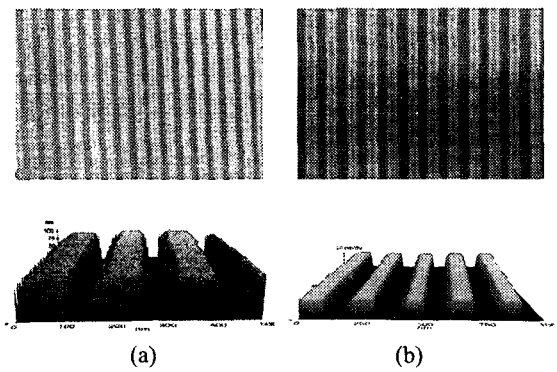


Fig. 7 CD SEM and AFM images of (a) 50 nm grooves and (b) 100 nm grooves with an interval of 100 nm, formed on an element of the EPS.

이러한 문제점들을 해결하고자 10 × 10 mm^2 의 단위요소를 갖는 스탬프를 제작할 때는 크롬은 종전과 같은 100 nm 두께를 사용했으나, 이빔 레지스트는 100 nm 작은 300 nm 두께의 ZEP520 박막을 사용했으며 Elionix ELS-7000 100 KeV e-beam system 으로 이빔 패턴을 형성하였다. 그리고 크롬과 수정층의 에칭은 CP6000-U system 으로 수행하였다.

Fig. 7 은 EPS 상에 성공적으로 각인된 50 nm 선과 100 nm 간격을 갖는 패턴의 CD SEM 과 AFM 으로 측정한 결과를 보여주고 있는데 초기 설계치와 비교하여 2% 이내의 치수 정밀도를 보였다.

EPS 제작을 마친 후에는 표면에 점착방지를 위한 단분자막 처리해야 한다. 이는 임프린트한 후 경화된 고분자 박막이 스탬프로부터 용이하게 분리될 수 있도록 하는 역할을 하게 된다. 단분자막 형성을 위하여 사용한 시약은 Trichloro(1H, 1H, 2H, 2H-perfluorootyl)silane (97%, Aldrich)이다. 초기 수정기판의 접촉각은 27° 였는데 시약을 반응시킨 후 5 분 경과하였을 때 100° 로 증가하였고 1 분 이후에는 105° 로 거의 일정하였다. 따라서 silanization 반응은 5 분에서 10 분 사이에 거의 반응이 완결되는 것으로 판단된다. 이러한 점착방지 막처리를 통하여 표면상태가 친수 (hydrophilic) 상태에서 소수 (hydrophobic) 상태로 변함과 동시에 표면에너지가 감소되어, 임프린팅 시에 레지스트가 스탬프 표면에 점착되는 것을 방지하게 된다.

2.3.2 임프린트 공정 및 결과

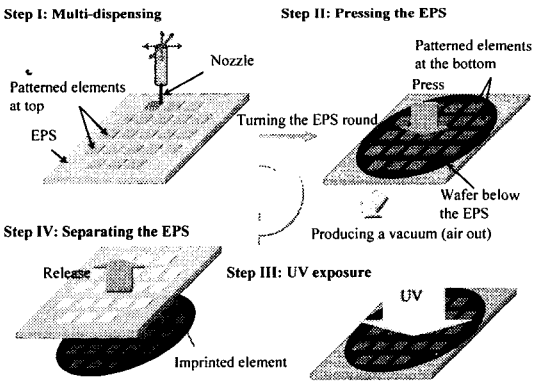


Fig. 8 Schematic of the UV-NIL process using an EPS.

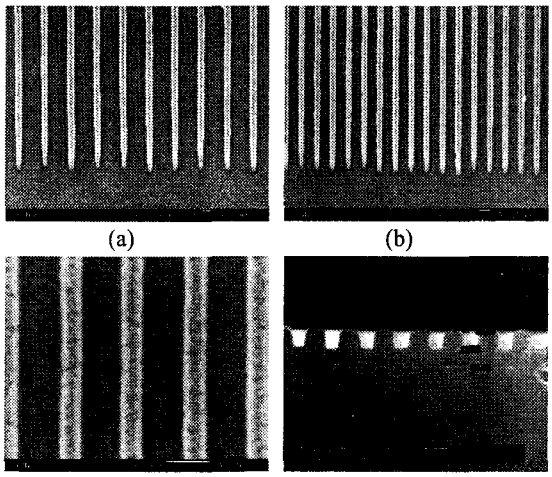
임프린트 전 웨이퍼 평탄화층을 형성하기 위한 소재로는 ARC (Anti-reflective coating)용 DUV30J (Brewer Science)를 사용했다. 이 박막은 평탄층 역할과 함께 임프린트된 고분자박막과 웨이퍼 표면과의 점착성을 증가시키는 역할을 하게 되는데, 주로 60 nm 두께의 박막을 스핀코팅으로 형성하여 사용하였다. 임프린트용 광경화수지는 tripropylene glycol diacrylate (TPGDA)가 주성분인 PAK01 을 사용했으며[3] 점도는 7 cp 로 측정되었다.

앞에서 언급한 타 공정들은 웨이퍼 위에 적당량의 수지를 도포하거나 액적을 디스펜싱하게 되는데 EPS 를 사용하는 UV-NIL 공정에서는 Fig. 8 에서와 같이 액적들을 EPS 의 각 단위요소에 디스펜싱하게 된다. 점착박지막이 형성되어 있어 소수성 성질을 보이는 EPS 표면은 친수성 표면을 갖는 웨이퍼에 비하여 액적의 접촉각이 매우 크게 된다. 따라서 디스펜싱 대상의 표면상태나 미세진동에 의하여 디스펜싱한 액적이 초기 위치에서 흐르거나 이동하는 것을 방지할 수 있다. 1 인치 정도의 작은 영역을 반복적으로 디스펜싱하고 임프린트하는 SFIL 방법에 비하여, 한번에 스탬프 전 영역을 디스펜싱해야 하는 본 기법에서 웨이퍼에 디스펜싱할 경우, 액적이 움직일 가능성은 더욱 높아진다고 할 수 있다

Musashi 사의 shot-mini-model 로 EPS 상에 디스펜싱했으며, 각 액적의 부피는 1-3 *nl* 였다. 13 × 13 mm^2 단위요소에는 총 33 개의 위치에 액적을 디스펜싱했으며 10 × 10 mm^2 단위요소에는 5 개의 위치에 디스펜싱했다.

EPS 를 사용한 임프린트를 위하여 EVGroup 사의 EVG620-NIL 을 사용했다. 이 장치는 기존의 EVG620 정렬장치 (aligner)를 임프린트용으로 부분 개조한 장치로 최대 상대 진공압은 930 mbar 이다. 기존의 정렬장치에 비하여 EVG620-NIL 의 특징은 정렬작업 시 스탬프와 웨이퍼의 직접 접촉을 방지하기 위한 스페이서 (spacer) 가 웨이퍼 척에 장착되어 있다는 점이다. 디스펜싱된 EPS 를 180° 돌려 EVG620-NI 에 장착하고 평탄화층이 코팅된 웨이퍼를 척 위에 올려 놓은 후 900 mbar 정도의 저진공분위기가 형성됨과 동시에 EPS 와 웨이퍼가 가압된다. 수지가 충분히 퍼지기 위하여 일정시간 압력을 유지한 다음 UV 를 조사 하여 경화시키고 EPS 를 분리하게 된다.

Fig. 9 는 임프린트된 50 nm 선과 70 nm 선을 보여 주고 있다. 임프린트 실험에 사용된 조건으로 UV 조사량 (exposure dose) 은 14.4 mW/cm^2 , 조사시간 (exposure time)은 60 s, 진공압은 800 mbar, 가압시간은 40 s 이다. SEM 으로 측정한 임프린트된 나노구조물의 높이는 76 nm, 평탄층의 두께는 63 nm, 잔여층은 76 nm 였다. 앞서 설명한 Fig. 7 에서



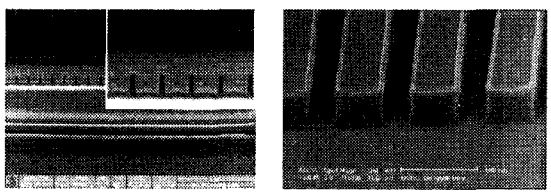
(a) (b)

(c) (d)

Fig. 9 SEM images of the imprinted lines with (a) a width of 70 nm and (b-c) a width of 50 nm, and (d) the cross section of 70 nm lines.

스탬프에 각인된 50 nm 구조물 형상과 비교할 때, 상당히 정확하게 스탬프의 50 nm 구조물이 레지스트에 전사 되었음을 확인할 수 있었다.

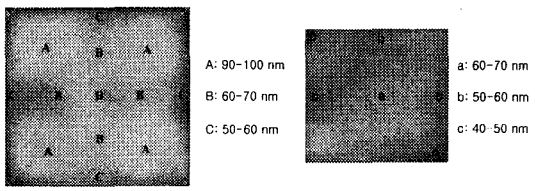
Fig. 10(a)는 EPS 상의 패턴 일부를 이온빔 (Focused Ion Beam, FIB)가공한 단면을 보여주고 있다. 이온빔 가공 시 가공부 주위의 구조물이 손상되는 것을 방지하기 위하여 백금을 먼저 코팅한 후 이온빔 가공을 수행하였다. Fig.10(a) 에



(a) (b)

Fig. 10 SEM images of (a) cross-section of grooves of the EPS and (b) the patterns imprinted using the stamp.

서 나타난 바와 같이 380 nm 선폭 구조물의 경우 에치 트렌칭 (etch-trenching) 효과에 의해 구조물의 양쪽 측면에 홈이 존재하는 것을 볼 수 있다. Fig. 10(b)는 임프린트된 나노구조물을 보여 주고 있는데, 이는 수지가 스탬프의 음각구조물에 하단양쪽 측면의 50 nm 크기의 홈까지 완전히 충전했음을 보여주는 결과라고 할 수 있다. 일반적으로 SEM 이나 AFM 으로 측정한 스탬프의 음각



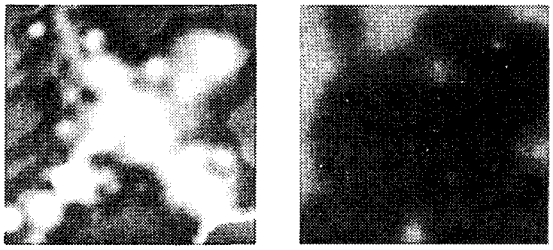
(a) (b)

Fig. 11 The effect of element size on residual layer thickness uniformity. The distributions of residual layer thicknesses of (a) a 13 × 13 mm^2 imprinted element and (b) a 10 × 10 mm^2

구조물 깊이 값과 임프린트된 양각 구조물 높이 값의 단순 비교만으로는 스탬프의 음각 구조물에 수지가 완벽하게 충전되어 임프린트가 되었는지 확인하는 것이 용이하지 않았다.

Fig. 11 은 13 × 13 mm^2 단위요소와 10 × 10 mm^2 단위요소를 사용하여 임프린트한 후의 잔여층 두께 분포를 보여주고 있다. 13 × 13 mm^2 단위요소의 경우 공기합임을 방지하고 잔여층의 두께를 감소시키기 위하여 33 개의 액적을 사용한 것에 반하여 10 × 10 mm^2 단위요소의 경우는 단지 5 개의 액적만을 사용하였다. Fig. 11 에 나타난 바와 같이 13 × 13 mm^2 의 경우는 단위요소의 외각을 따라 50 nm 이하의 과도하게 얇은 잔여층이 존재한 것과는 달리, 10 × 10 mm^2 의 경우는 외각부분에도 50 - 60 nm 정도의 양호한 잔여층 두께 분포를 나타내었다. 이는 단위요소의 크기가 작아질수록 잔여층 두께 분포 개선이 보다 용이함을 보여 주는 결과이다.

대면적 웨이퍼와 스탬프의 전면 접촉을 위해서는 웨이퍼의 미소 변형이 반드시 요구된다 하겠다. Fig. 12 는 이러한 미소 변형이 임프린트에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 10 × 10 mm^2 의 단위요소와 3 ㎜의 채널을 갖는 EPS 를 사용하고 웨이퍼 두께의 변화를 주면서 임프린트를 수행한 결과를 보여주고 있다. Fig. 11(b)와 같은 결과를 보여주는 500 ㎛ 두께 웨이퍼 상에서 이루어진 임프린트 공정조건과 동일한 조건하에서, 100 ㎛와 300 ㎛ 두께 웨이퍼에 대해 임프린트를 수행했다.



(a) (b)

ig. 12 The effect of wafer thickness on residual layer thickness uniformity. The distributions of residual layer thicknesses of elements imprinted on wafers with a thickness of (a) 100 μm and (b) 300 μm.

그러나, 500 ㎛의 경우와는 달리 100 ㎛와 300 ㎛ 두께의 웨이퍼에서는 국부적 변형에 의한 단위 요소의 불균일한 충전이 확연히 보여 지고 있다. 100 ㎛와 300 ㎛ 두께의 웨이퍼에서는 Fig. 12 에서와 같이 압력이 가해지는 순간, 레지스트가 단위요소 전체적으로 퍼지기 전에 웨이퍼의 과도변형에 의하여 EPS 와 웨이퍼 사이 간격이 극도로 작아져 유동저항이 크게 증가했기 때문으로 판단된다. 그리고 이러한 경향은 두께가 작아질수록 더 심하게 나타나는 것을 확인 할 수 있었다.

이러한 결과는 광경화 수지의 점도 및 가압조건에 따라 최적의 웨이퍼 두께가 존재 할 수 있음을 보여주는 결과라고 할 수 있다. 즉, 웨이퍼의 두께가 너무 작으면 국소 변형에 의하여 잔여층 두께 분포에 악영향을 주며 너무 두꺼운 경우는 EPS 와 웨이퍼의 전면 접촉을 위하여 큰 가압력이 필요하기 때문이다.

3. 결론

NIL 기술이 2003 년도 ITRS 에 차세대 리소그래피 기술 중에 하나로 추가된 것은, NIL 이 10 nm 급 선폭을 용이하게 구현할 수 있으면서도 EUV 를 포함한 다른 차세대 리소그래피들에 비하여 공정 및 장비에 소요되는 비용을 획기적으로 줄일 수 있기 때문이다. 현재 국내외 다수의 대학과 연구기관들이 경쟁적으로 NIL 기술을 연구하고 있으며, 2 년 전부터 몇몇 회사들은 독특한 NIL 공정 및 장비를 개발하여 판매하고 있다. 지금까지 개발된 UV-NIL 장비로는 오스트리아 EVGroup 사의 EVG620-NIL, Chou 교수가 관여하는 Nanonex 사의 model 2000, 3000, 그리고 스웨덴의 Suss Microtec 장비, Sreenivasan 교수가 개발한 SFIL 공정을 장비화한 MI 사의 IMPRIO 50, 100 등이 있다. 또한, 2003 년에는 국내에도 NIL 장비회사인 NND 사가 설립되어 독자적으로 장비를 개발하여 판매하고 있다.

UV-NIL 기술은 초고속 나노급 Metal-Semiconductor Field-Effect Transistors (MESFETs), 고밀도 자기저장장치, 고밀도 Compact Disk (CD), 나노급 Metal-Semiconductor-Metal photodetectors (MSM PDs)와 light emitter, 초고속 Single-electron transistor memory, RF 소자, 바이오센서 등에 적용될 것으로 기대되고 있으며 현재 적용기술 관련 연구가 활발히 진행되고 있다.

지금까지 개발된 NIL 공정 및 장비들이 양산에 적용되기 위해서는 극복되어야 할 여러 기술적 한계가 존재하나, 새롭고 다양한 시도가 꾸준히 이루어진다면 근시일 내에 대표 나노제조공정으로 폭넓게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 21 세기 프론티어연구개발 사업인 나노메카트로닉스 기술개발사업단의 연구비지원 (M102KN01001)에 의해 수행되었다.

참고문헌

1. Chou, S.Y., Krauss, P.R. and Renstrom, P.J., "Imprint of sub-25 nm vias and trenches in polymers," Appl. Phys. Lett. Vol.67, No.21, pp.3114-3116 ,1995.
2. Chou, S.Y., Krauss, P.R. and Renstrom, P.J., "Nanoimprint lithography," J. Vac. Sci. Technol. B Vol. 14(6), pp. 4129-4133, 1996.
3. 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.
4. 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.
5. Otto, M., Bender, M., Richter, F., Hadam, B., Kliem, T., Jede, R., Spangenberg, B. And Kurz, H., "Reproducibility and homegeneity in step and repeat UV-nanoimprint lithography", Microelectronics Eng., in press, 2004.
6. Austin, M.D., Ge H., Wu W., Li M., Yu Z., Wasserman D., Lyon S.A., and Chou S.Y., "Fabrication of 5 nm linewidth and 14 nm pitch features by nanoimprint lithography," Appl. Phys. Lett. Vol.84, No.26, pp.5299-5301, 2004.
7. 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., in SPIE's 24th International Symposium on Microlithography: Emerging Lithographic Technologies III, Santa Clara, CA, Vol. 3676(I), pp.379-390, 1999.
8. Sreenivasan, S.V., "Nanoimprint lithography using UV curable liquids," in ASME International Conference on Integrated Nanosystems, Berkeley, CA, September 18-20, 2002.
9. Jeong, J.H., Sim, Y.S., Sohn, H.K. and Lee, E.S., "UV-nanoimprint lithography using an elementwise patterned stamp,",Microelectron. Eng., Vol. 75, No. 2, pp.165-171, 2004.
10. Sim Y.S., Jeong, J.H., Sohn, H.K. Shin, Y.J., Lee, E.S., Choi, S.W. and Kim, J.H., "Nano-patterning technology using an UV-NIL method," Journal of the Korean Vacuum Society, Vol.13, No.1 pp.39-45, 2004.