

< 논문 >

EPS(Elementwise Patterned Stamp)를 이용한 UV 나노임프린트 공정에서 웨이퍼 변형에 따른 잔류층 분석

김기돈* · 심영석* · 정준호† · 손현기** · 이응숙* · 이상찬*** · 방영매***

(2004년 12월 3일 접수, 2005년 8월 17일 심사완료)

Analysis of Nonuniformity of Residual Layer Thickness on UV-Nanoimprint Using an EPS(Elementwise Patterned Stamp)

Ki-Don Kim, Young-Suk Sim, Jun-Ho Jeong, Hyonkee Sohn, Eung-Sug Lee, Sang-Chan Lee and Lingmei Fang

Key Words : UV-Nanoimprint(UV 나노임프린트), Elementwise Patterned Stamp(EPS), Wafer Deformation(웨이퍼 변형), Residual Layer(잔류층)

Abstract

Imprint lithography is a promising method for high-resolution and high-throughput lithography using low-cost equipment. In particular, ultraviolet-nanoimprint lithography (UV-NIL) is applicable to large area imprint easily. We have proposed a new UV-NIL process using an elementwise patterned stamp (EPS), which consists of a number of elements, each of which is separated by channel. Experiments on UV-NIL are performed on an EVG620-NIL using the EPS with 3 mm channel width. The replication of uniform sub 70 nm lines using the EPS is demonstrated. We investigate the nonuniformity of residual layer caused by wafer deformation in experiment with varying wafer thickness. Severely deformed wafer works as an obstacle in spreading of dropped resin, which causes nonuniformity of thickness of residual layer. Numerical simulations are conducted to analyze aforementioned phenomenon. Wafer deformation in the process is simulated by using a simplified model, which is a good agreement with experiments.

1. 서론

나노임프린트(nanoimprint lithography, NIL) 공정 기술은 나노 스케일의 패턴을 경제적으로 대량 생산할 수 있는 장점을 가진 기술로 6 nm 크기의 나노구조물도 임프린트가 가능하다는 결과들이 발표된 바가 있다.⁽¹⁾ 일반적으로 이와 같은 나노임프린트 공정은 크게 가열에 의한 방식(thermal-type NIL)^(1,2)과 광경화 방식(UV-NIL)^(3,5,7)으로 나누어진다. 가열에 의한 방식은 열가소성수지를 고온으로

가열 후 압력이 가해진 스탬프(stamp)로 나노 구조물을 제작하는 방법이다. 하지만, 높은 압력과 열 영향으로 몰드의 내구성 및 몰드의 변형에 의한 위치 제어에 취약하며, 집적도를 높이기 위한 다층의 제조 방법에 제약이 따른다.⁽⁴⁾ 이에 반하여, 본 논문에서 사용하는 광경화 수지를 이용한 나노 임프린트공정은 저압과 상온에서 공정 수행이 가능하여 다층 구조 제작에 유리하며, 공정의 안정성 유지가 용이하다.

UV-나노임프린트 공정은 나노크기의 패턴(pattern)을 갖는 투명한 스탬프를 사용하여 박막 수지층 또는 수지 액적을 가압한 상태에서 스탬프를 통과하여 조사된 자외선으로 수지를 경화시켜 Fig. 1 과 같이 웨이퍼(wafer)에 패턴을 전사한다.

대기압환경하에서 UV-나노임프린트공정을 대면적 웨이퍼 임프린트에 적용할 때 공기 함입 결합

† 책임저자, 회원, 한국기계연구원 지능형정밀기계연구부
E-mail : jhjeong@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7604 FAX : (042)868-7123

* 회원, 한국기계연구원 지능형정밀기계연구부

** 회원, 한국기계연구원 첨단산업기술연구부

*** 회원, 목포대학교 기계-해양시스템 공학부

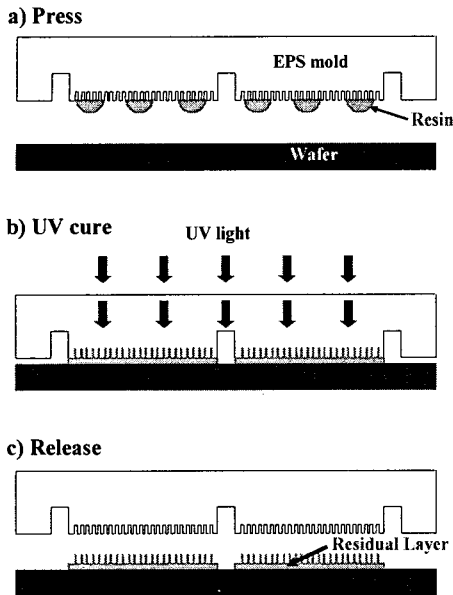


Fig. 1 Schematic imprint process of UV-NIL using EPS

을 해결하기 위해 Jeong⁽⁷⁾ 등은 EPS(elementwise patterned stamp)를 제안하였다. EPS는 패턴이 새겨진 단위 요소와 단위 요소 사이에 채널(channel)이 존재하여 임프린트 시 요소 내부에 있던 공기의 원활한 배출을 가능케 한다. EPS를 사용하여 100 nm 이하의 패턴을 성공적으로 전사하였으나, 임프린트 조건이 최적화 되어 있지 못한 상태에서는 웨이퍼에 새겨진 채널로 인하여 압력을 받은 웨이퍼가 과도하게 변형하여 잔류층 두께가 불균일하게 되거나 단위 요소가 완전히 충전되지 못하는 현상이 발생하였다. 잔류층은 임프린트시 남는 수지층을 의미하는데, 에칭(etching) 공정을 거쳐 패턴이 전사되는 것이 임프린트의 최종 목적이므로 얇고 균일한 잔류층을 얻는 것이 필요하다. 특히, 이와 같은 미충전 및 불균일한 잔류층의 분포는 대면적 임프린트 공정에 치명적인 문제⁽⁸⁾로 작용하기 때문에 공정 변수에 따른 분석이 필요하다.

본 논문에서는 EPS를 사용한 광경화 나노임프린트 공정에서 발생하는 웨이퍼의 미소 변형에 의한 결함 분석을 위하여 임프린트 실험 및 구조해석 프로그램을 이용한 수치 해석을 수행하여 결함을 확인하고자 한다.

2. 본 론

2.1 UV-나노임프린트 실험

나노 임프린트 실험에 사용된 장비는 EVG-620 NIL로서 반도체 공정의 정렬(align) 과정에 사용되

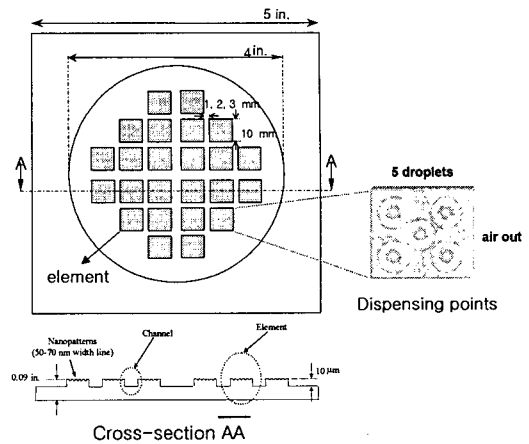


Fig. 2 Schematic diagram of EPS mold and dispensing point on the unit field

는 장비에 UV 광을 조사할 수 있는 장비를 추가하여 UV 임프린트가 가능하도록한 장비이며 최대 4 인치 크기의 웨이퍼를 정렬하여 임프린트 할 수 있고, -930 mbar의 압력으로 스탬프를 웨이퍼에 접촉시킬 수 있다. 930 mbar의 가압력과 2 min의 가압 시간, 14.4 mW/cm²에서 90 sec의 노광 시간을 기본 공정 조건으로 하였다. 본 절에서는 실험에 사용된 EPS의 제작 과정과 EPS를 이용한 웨이퍼의 두께에 따른 웨이퍼의 변형에 관한 실험 결과에 대하여 설명한다.

2.1.1 EPS의 제작

실험에 사용한 EPS는 일반적인 반도체 공정에 사용하는 마스크용 수정 스탬프로써 5 인치 크기이다. 전자빔(e-beam) 공정과 에칭 공정을 통해서 10 mm²의 단위 요소 위에 나노 크기의 패턴을 형성하였다. 나노 패턴의 전사를 위한 하드 마스크로 크롬층을 수정 스탬프에 사용하였고, 수정 스탬프의 식각 깊이는 200 nm이다. 스탬프에 10 μm의 돌출된 단위 요소의 형성을 위해 THMR-IP3600 레지스트(resist)를 코팅하고 Etec core2564 레이저 장치에서 노광시켰다.^(7,8) 수정을 위한 식각은 SF₆/O₂/He 분위기와 5 mTorr의 압력에서 Unaxis VLR 시스템을 사용하였다. 잔류 레지스트를 제거하여 Fig. 2와 같은 형태의 EPS를 제작하였다. 다만 그림에서와 같이 단위 요소와 요소 사이에 원활한 공기의 흐름을 위한 채널이 존재한다.

2.1.2 웨이퍼 두께에 따른 변형 실험

제작된 EPS는 Trichloro(1H, 1H, 2H-perfluorootyl)silane(97%, Aldrich)을 이용하여 10 분간 처리되고

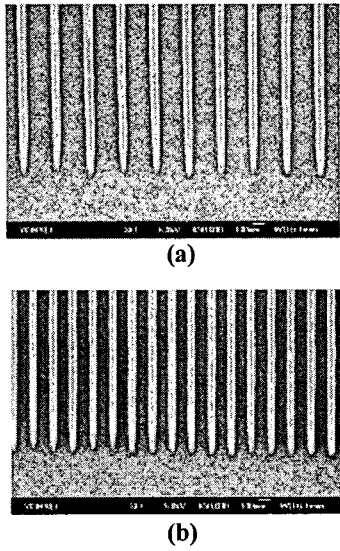


Fig. 3 SEM images of imprinted line patterns; (a) 70 nm width and (b) 50 nm width

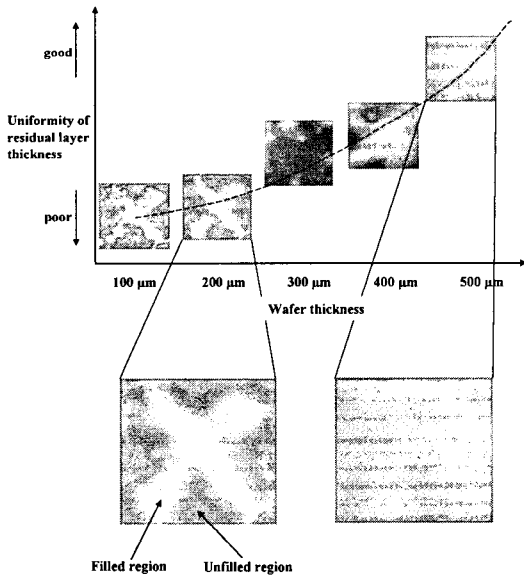


Fig. 4 The distribution of residual layer thickness with respect to wafer thickness

표면 에너지와 접촉각의 증가를 위해 CF_3 성분의 SAM(self-assembles monolayer)처리를 하였다.

4 인치 웨이퍼는 일반적인 세척 방법을 통하여 처리한 후 평탄층 형성과 임프린트 후에 경화된 수지가 스탬프가 아닌 웨이퍼 쪽에 남아있도록 하는 재료(Brewer Science DUV30J)를 사용하여 코팅하였다. 가압에 의하여 패턴이 생성될 광경화 수지는 공기 흡입 현상을 최소화 할 수 있도록 스펀

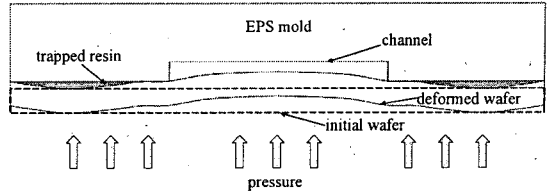


Fig. 5 Schematic of the effect of wafer deformation to spread resin into the unit field

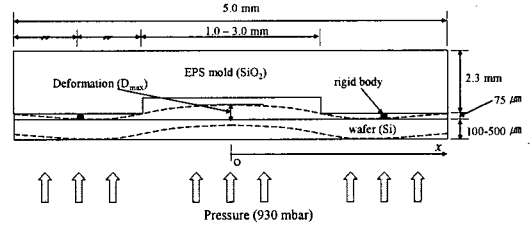


Fig. 6 Simplified model for numerical simulation of UV-NIL process using EPS

코팅 방법이 아닌 2 nl의 방울을 스탬프에 떨어뜨렸다. 하나의 단위 요소에 5개의 수지 방울을 Fig. 2와 같이 요소의 중심과 대각선 위의 꼭지점으로부터 대각선 길이의 1/4 되는 지점에 떨어뜨려 임프린트를 진행하였다. 사용된 토출 시스템은 제팅 방식으로 분해능이 30 pl이다. 실험에 사용된 광경화 수지는 Tripropylene Glycol Diacrylate (TPGDA) 화합물로 7-8 mPas의 점성을 나타낸다. 3 mm의 채널 간격을 갖는 EPS는 10 mm² 단위 요소 위에 50 nm에서 200 nm의 다양한 선폭과 간격을 갖는 패턴이 존재한다.

Fig. 3은 본 공정을 통하여 70 nm와 50 nm의 선폭을 갖는 나노 패턴을 웨이퍼 위에 성공적으로 전사한 결과를 나타낸다. 70 nm의 선폭을 갖는 패턴의 경우 후속 식각 공정에 중요한 요소인 평탄층과 잔여층의 두께의 합이 약 130 nm이다.

웨이퍼의 변형에 의한 잔류층의 불균일 현상을 확인하기 위해 500 μm 두께의 표준 웨이퍼를 가공하여 100-400 μm 두께의 웨이퍼를 임프린트에 사용하였다. Fig. 4는 각 두께의 웨이퍼에 광경화 수지를 임프린트한 단위 요소의 사진으로 100, 200 μm의 경우 도포 됐던 수지가 단위 요소 내로 전체적으로 퍼지지 못하고 도포되었던 자리에서 일부만 퍼졌음을 확인할 수 있다. 이와 같은 현상은 웨이퍼의 두께가 400 μm인 경우에도 일부 나타나지만, 두께가 500 μm인 경우에는 수지가 단위 요소 내로 완전하게 잘 퍼짐으로써 균일한 두께 분포를 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 이와 같은 현상은 웨이퍼의 두께가 얇아 지면서 가해지는

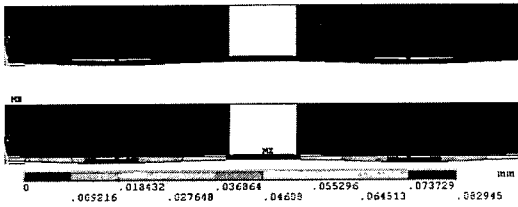


Fig. 7 The typical simulation of wafer deformation using a commercial code, ANSYS

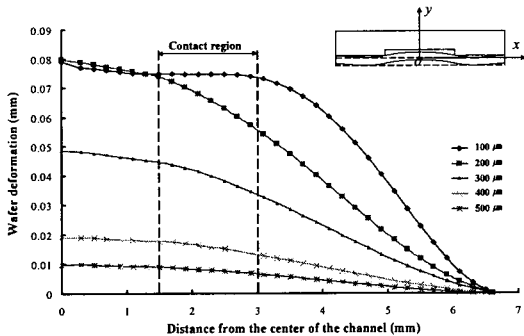


Fig. 8 The variation of wafer deformation with respect to wafer thickness

압력에 의한 웨이퍼의 과도한 변형으로 Fig. 5와 같이 수지가 단위 요소로 완전히 퍼지기 이전에 단위 요소의 끝단 부분에 변형된 웨이퍼가 접촉해서 수지의 퍼짐을 방해하기 때문이다. 공기의 원활한 흐름으로 공기가 함입되는 현상을 방지하던 EPS가 웨이퍼의 변형을 야기시켜 수지의 흐름을 방해하였다.

2.2 웨이퍼 변형의 수치 해석

임프린트 과정에서 웨이퍼의 변형에 의해 수지가 단위 요소 전체에 고르게 분포하지 못하는 현상의 수치적 해석을 위해서 Fig. 6과 같은 단순화된 모델을 사용하였다. Fig. 2에서와 같이 단위 요소 위에 5개의 액적을 떨어뜨려 임프린트하는 공정에 대하여 중심부에 대한 해석만을 위해 2차원 단순화를 적용하였다. 본 문제는 웨이퍼의 변형인 고체 변형뿐만 아니라, 웨이퍼의 변형에 의해서 수지가 이동하는 현상을 동시에 해석해야 한다. 또한, 수지의 이동은 표면 장력을 고려한 자유 표면을 갖는 유체 유동으로, 앞선 고체의 변형과 함께 해석이 진행되어야 한다. 하지만, 해석상의 어려움으로 본 논문에서는 액적을 변형이 없는 강체로 가정하여 해석을 수행하였다. 이와 같은 가정은 유체의 두께가 얇아지면, 그 유체의 두께를 줄이기 위해 필요한 압력이 기하급수적으로 증가하는 현상에 기인하며, 임프린트 과정에서 발생하는

웨이퍼의 변형에 의한 문제점의 분석에 적합하다고 판단된다. 본 절에서는 웨이퍼 두께에 따른 변형의 정도와 EPS의 채널 폭에 따른 웨이퍼의 변형 특성을 수치 해석을 통하여 분석한다.

2.2.1 웨이퍼 두께에 따른 해석

Fig. 6에서와 같이 강체로 가정한 액적의 지름은 $75\ \mu\text{m}$ 이며, 웨이퍼의 아래 부분에 $930\ \text{mbar}$ 의 압력이 부가될 때 두께 변화에 따른 웨이퍼의 변형을 해석하였다. 제시한 단순화 모델의 해석을 위하여 구조 해석 프로그램인 ANSYS를 사용하였고, $100\ \mu\text{m}$ 두께를 갖는 웨이퍼에 대한 해석 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 채널의 폭이 $3\ \text{mm}$ 인 경우에 대하여 웨이퍼의 두께를 $100\ \mu\text{m}$ 에서 $500\ \mu\text{m}$ 까지 변화시키며 변형량의 변화에 대한 결과를 Fig. 8과 같이 얻었다.

$500\ \mu\text{m}$ 두께의 웨이퍼의 경우 굽힘에 의한 변형으로 웨이퍼가 약 $9.75\ \mu\text{m}$ 정도 변형하였으나, $100\ \mu\text{m}$ 두께의 웨이퍼는 액적으로 가정했던 강체의 지름인 $75\ \mu\text{m}$ 까지 변형을 하여 EPS의 단위 요소와 접촉하였고 채널 부분에서는 최대 $78\ \mu\text{m}$ 까지 변형되었다. $300\ \mu\text{m}$ 이상의 두께를 갖는 웨이퍼들은 단위 요소의 끝부분과의 접촉 없이 완만한 변형을 나타내지만, $200\ \mu\text{m}$ 이하의 웨이퍼는 급격한 변형 후 단위 요소와 접촉을 이루고 있다. $100\ \mu\text{m}$ 웨이퍼는 단위 요소의 끝부분인, 채널 중심으로부터 $1.5\ \text{mm}$ 떨어진 부분부터 변형 후 접촉하여 $3\ \text{mm}$ 지점 부분까지 접촉을 이루고 있다. 이와 같은 해석 결과는 앞선 실험의 결과에서 웨이퍼의 변형에 의한 수지 흐름의 방해 현상과 비슷한 경향을 보임을 알 수 있다. Fig. 4에서 $200\ \mu\text{m}$ 이하의 두께를 갖는 웨이퍼들이 수지가 퍼지지 못하고 포포되었던 위치에서 크게 벗어나지 않은 현상은 Fig. 8의 해석 결과에서와 같이 $200\ \mu\text{m}$ 이하 두께의 웨이퍼가 과도한 변형에 의해 스탬프와 접촉한 것으로 분석될 수 있다. 웨이퍼에 가해주는 압력에 대하여 $300\ \mu\text{m}$ 두께 이상의 웨이퍼는 수지가 퍼질 수 있는 충분한 공간을 확보하여 Fig. 4와 같이 균일한 두께의 잔류층을 갖는 완전히 충전된 단위 요소 결과를 얻었다. Fig. 8의 결과에서도 $300\ \mu\text{m}$ 이상의 두께를 갖는 웨이퍼의 경우 스탬프와의 접촉없이 완만한 변형이 발생하였다. 이와 같은 결과는 제안된 단순화 모델이 실험 결과를 보충할 수 있는 유용성이 있음을 나타낸다.

웨이퍼의 최대 변형량을 Fig. 9에 나타내었다. 두께가 얇아지면서 최대 변형량이 증가했으나, 웨이퍼 두께가 $100\ \mu\text{m}$ 인 경우 $78\ \mu\text{m}$ 의 최대 변형이,

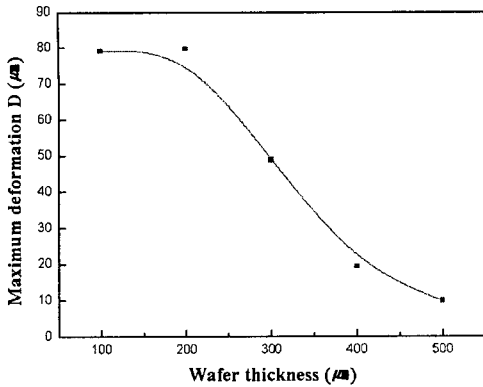


Fig. 9 The maximum deformation with respect to wafer thickness

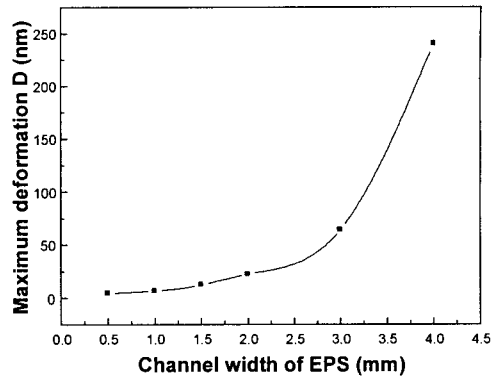


Fig. 11 Maximum deformation of wafer with 500 μm thickness which contact with EPS directly

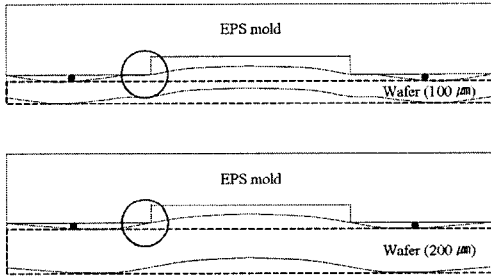


Fig. 10 The difference of bending mode between 100 μm thickness and 200 μm thickness of wafers

200 μm의 경우 80 μm의 최대 변형이 발생하였다. 이와 같은 현상은 Fig. 10 과 같이 100 μm 두께의 웨이퍼는 EPS의 단위 요소와 넓은 부분의 접촉을 하면서 두 개의 굽힘 모드가 발생하여 채널 중심부에서의 변형에 제약을 받으며 200 μm의 경우 단위 요소의 끝 부분과의 접촉만이 발생하여 굽힘 모드의 변화 없이 연속적인 굽힘이 발생한다. 수지의 흐름을 제약하는 변형인 75 μm 까지 변형하는 웨이퍼의 두께는 220 μm 정도로 예측할 수 있다. 이와 같은 수치는 액적을 강체로 해석하였기 때문에 정확할 수는 없다. 하지만, 실제 액적을 유체로 모델링하여 해석을 하여도 비슷한 경향으로 얇은 두께의 웨이퍼는 과도한 변형으로 수지의 흐름을 방해할 것으로 예상된다.

2.2.2 채널 폭의 영향

채널의 폭에 따른 웨이퍼의 변형을 알아보기 위해 500 μm 두께의 웨이퍼에 대하여 채널 폭을 0.5 mm에서 4.0 mm까지 변화시켜가며 해석을 수행하였다. 본 해석에서는 편의를 위해 액적이 없다고 가정하고, 웨이퍼와 단위요소가 직접적으로

접촉한 상태에서 해석을 수행하였다.

Fig. 11에서와 같이, 채널의 폭이 3 mm보다 커지면서 변형량이 급격히 증가함을 알 수 있다. 즉, 2.5 mm 이하 크기의 채널을 갖는 경우 공정 중에 발생하는 공기의 함입 현상을 최대한 억제함과 동시에 웨이퍼의 변형을 제약하여 균일한 분포의 잔류층 두께를 얻을 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 UV-NIL 공정에서 공기의 함입 결함을 해소하려 제안되었던 EPS로 인하여 발생하는 웨이퍼의 변형에 관한 실험과 수치 모사를 통한 분석을 수행하였다. 3 mm의 채널 폭을 갖는 EPS를 이용하여 100 μm에서 500 μm 두께의 웨이퍼에 임프린트 후 잔류층의 두께 분포 경향과 그 원인에 대한 분석을 하였다. EPS의 채널에 의한 웨이퍼의 변형은 수지의 퍼짐을 방해하여 단위 요소의 미충전 및 잔류층의 불균일한 두께 분포를 발생시켰다. 이와 같은 웨이퍼의 변형을 단순화된 수치 모델을 통하여 두께에 따른 웨이퍼의 변형과 채널의 폭에 따른 웨이퍼의 최대 변형량을 해석하였다. 200 μm 이하 두께의 웨이퍼들은 실험에서와 같이, 과도한 변형으로 단위 요소의 끝부분과 접촉되어 수지의 흐름을 방해하였다. 액적이 없는 상태에서의 해석을 통하여 채널의 폭에 따른 웨이퍼의 변형을 알아보았다. 수치 모사를 통하여 500 μm 두께의 웨이퍼의 경우 2.5 mm 이하의 채널에서는 웨이퍼의 과도한 변형을 방지할 수 있었음을 알 수 있었다. 본 연구는 4인치 웨이퍼에 대한 결과이며, 생산성을 높이기 위해 단위 요소의 크기가 증가하고 웨이퍼가 6 또는 8 인치로 증가할 경우 이와 같은 문제점에 대한 분석이 필요할 것으

로 예상된다. 또한, 일반적인 실리콘 웨이퍼가 아닌 실리콘에 비하여 강성이 약하여 쉽게 변형되는 물질의 기판(substrate)에 임프린트를 수행할 경우 또는 평탄도가 균일하지 않은 기판이 사용될 경우는 앞서 설명한 웨이퍼나 기판의 변형은 임프린트 패턴과 잔류층의 형성에 중요한 문제로 작용할 것이다. 다양한 기판에 임프린트들 적용할 때, 스탬프 설계에 제시한 단순화된 모델을 적용함으로써 효율적인 EPS의 제작이 가능할 것이다.

후 기

본 연구는 21세기 프론티어 연구 개발 사업인 나노메카트로닉스 기술 개발 사업단의 연구비지원(M102KN01001)에 의해 수행되었다.

참고문헌

- (1) Chou, S. Y., Krauss, P. R. and Renstrom, P. J., 1996, "Nanoimprint Lithography," *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 14, No. 6 pp. 4129~4133.
- (2) Chou, S. Y., Krauss, P. R. and Renstrom, P. J., 1995, "Imprint of Sub-25 nm Vias and Trenches in Polymers," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 67, Issue 21, pp. 3114~3116.
- (3) Otto, M., Bender, M., Hadman, B., Spangenberg, B. and Kurz, H., 2001, "Characterization and Application of a UV-based Imprint Technique," *Microelectron. Eng.*, Vol. 57-58, pp. 361~366.
- (4) Schaper, C. D., Chen, B.-D. and Pease, R. F. W., 2004, "Induced Thermal Stress Fields for Three-Dimensional Distortion Control of Si Wafer Topography," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 75, No. 6, pp. 1997~2002.
- (5) Hiroshima, H., Inoue, S., Kasahara, N., Taniguchi, J., Miyamoto, I. and Komuro, M., 2002, "Uniformity in Patterns Imprinted Using Photo-Curable Liquid Polymer," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 41, pp. 4173~4177.
- (6) Deguchi, K., Takeuchi, N. and Shimizu, A., 2002, "Evaluation of Pressure Uniformity Using a Pressure-Sensitive Film and Calculation of Wafer Distortions Caused by Mold Press in Imprint Lithography," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 41, pp. 4178~4181.
- (7) Jeong, J. H., Sim, Y. S., Sohn, H. and Lee, E. S., 2004, "UV-nanoimprint Lithography Using an Elementwise Patterned Stamp," *Microelectron. Eng.*, Vol. 75, pp. 165~171.
- (8) Sim, S. Y., Jeong, J. H., Sohn, H. K., Shin, Y. J., Choi, S. W. and Kim, J. H., 2004, "Nano-Patterning Technology Using an UV-NIL Method," *J. K. Vac. Sci.*, Vol. 13, No. 1, pp. 39~45.