

# 나노 임프린트 리소그래피에 의한 마스터 복제 공정

정명영<sup>†</sup>

## Fabrication of Master Replication by Nanoimprint Lithography

Myung Yung Jeong

**Key Words :** Hot embossing, Master replication, Photonic Bandgap device

### Abstract

A feasibility study for the fabrication of master replication with nanostructures by Nanoimprint Lithography (NIL) was investigated for application of polymer Photonic Bandgap (PBG) devices used in photonic IC. Large area gratings of  $9 \times 15$  (mm<sup>2</sup>) with  $p = 400$  nm was successfully embossed on PMMA on silicon wafer and the embossing parameters (temperature, pressure, time) were established. A precise control of O<sub>2</sub> plasma Reactive Ion Etching (RIE) process time allowed window opening over the whole area despite the presence of wafer bending. Master replication with aspect ratio 1 was successfully fabricated, but master replication with aspect ratio 3 needs to optimize parameters. All replications were done in a NIL process.

### 1. 서론

핫 엠보싱(hot embossing)을 이용한 나노 임프린트 기법은 Chou, S.Y. 등에 의해서 처음 도입되었다.<sup>(1)</sup> 이 기법은 기판상에 코팅된 열가소성 수지의 박막층을 이용한다. 마스터(master)와 시료가 고분자의 유리 전이 온도 이상이 될 때까지 가열된다. 그 후, 서로 접촉되어 약 120 기압까지의 압력이 고분자 층을 엠보싱하기 위하여 작용된다. 마스터와 기판 표면 사이의 접촉이 이루어지지 않으므로 잔류 층은 반응성 이온 식각으로 제거된다. 마스터와 시료의 분리는 형성된 소성 변형이 유지되도록 적어도 유리 전이 온도까지 냉각된 후에 행해진다. 이러한 기법을 이용하여, 선폭 6nm의 구조물까지 형성되었음이 보고되고 있다.<sup>(2)</sup> 또한, 나노 임프린트 기법으로 100nm 이하의 구조물에 대해서 대면적 패터닝도 좋은 정밀도를 가지고 구현될 수 있음이 보고되었다.<sup>(3)</sup>

광자 결정 구조는 향후 광통신용 광소자의 집적화에 핵심요소로서 현재 기초 연구가 활발하게 진

행되고 있다. 광자 결정은 유전체의 주기적인 배열을 의미하며, 적절하게 설계된 광자 결정은 특정한 파장의 광자가 존재할 수 없는 영역을 형성하며, 이를 이용하여 광자의 제어가 가능하므로 광도파로로 활용될 수 있음이 알려져 있다.<sup>(4)</sup>

나노 임프린트 공정을 이용한 광자결정 광소자에 대한 연구는 저가격으로 광집적회로의 구현을 가능케 하여 향후 대용량 정보통신의 수준을 획기적으로 진전시킬 수 있을 것으로 기대되며, 이를 위한 기초 연구가 현재 활발하게 진행되고 있다. 폴리 스티렌을 이용한 광자 결정 구조에 대하여 손실 20dB/cm 수준의 광도파로가 최근에 보고되었다.<sup>(5)</sup>

본 연구는 광자 결정 광도파로를 나노 임프린트 공정으로 구현하기 위한 첫 단계로서, 마스터 복제를 위하여 200nm 선폭의 패턴을 핫 엠보싱으로 구현한 결과에 관한 내용을 기술한 것이다.

### 2. 나노 임프린트 리소그래피 공정

나노 임프린트 리소그래피 공정은 마스터의 기계적 성질과 성형 재료 사이의 차이를 이용한다. 점성을 가지는 성형 재료는 견고한 마스터로 누르거나(엠보싱, 임프린팅), 캐비티(cavity)에 채우거나(캐스팅, 사출 성형)하여 성형된다. 적절한 공정 시간과 수율을 얻기 위해서는 압력을 사용하며,

<sup>†</sup> 회원, 한국전자통신연구원 광집속모듈팀  
E-mail : myjeong@etri.re.kr  
TEL : (042)860-5589 FAX : (042)860-6248

상대적으로 낮은 점도를 가지는 재료를 사용한다. 나노 임프린트 리소그래피 공정에서는, 기계적 성질이 단순한 온도 변화로 고체와 점성 유체로 반복적이고 가역적으로 변할 수 있는 PMMA(polydimethyl siloxane) 같은 열가소성 재료를 주로 사용한다.

3.1 나노 임프린트 리소그래피의 주요 법칙

나노 임프린트 리소그래피(핫 엠보싱 리소그래피 라고도 함)에서는 RIE 가 연속한 형상 전이 공정용 레지스트에서 기판 윈도우를 열기 위하여 사용된다. 그래서, 레지스트 형상의 기저에서 고분자의 잔류 높이는, RIE 가 단일 구조물의 토폴로지와 형상을 크게 변화시키지 않는 수준으로 감소되어야 한다. 잘 아는 바와 같이, 고분자 층의 두께를 줄이는 것은 엠보싱 공정에 소요되는 시간의 증가와 직접 연계되어 있다. 30 분 이상의 공정 시간은 대량 생산에 허용되지 않으며, 수 초로 줄이는 것이 바람직하다. 최적화를 위한 여러 영역은 다음과 같다.

3.1.1 초기 막 두께

얇은 고분자 층을 성형하는 공정 시간은 단지 높은 초기 층 두께를 사용하여 수 초로 감소시킬 수 있다. 막 두께가 두꺼울 수록, 압착된 고분자는 경계에서의 마찰에 의한 영향을 거의 받지 않고, 막의 중앙 면에 더 자유롭게 흘러갈 수 있다. 핫 엠보싱 리소그래피에서 높은 초기 층 두께는 보통 허용되지 않는 잔류 두께를 조래하여, 너무 오랜 형 전이를 유발하므로 주의해야 한다.

3.1.2 성형 온도

높은 성형 온도는 고분자 점도를 낮추어서 마스터 캐비티를 채우는 시간을 줄일 수 있다. 그러나, 상대적으로 높은 열 용량과 낮은 가열 및 냉각 속도는 종종 엠보싱 시간에 제약을 가한다. 이것은, 기판과 프레스의 가열판 뿐만 아니라, 마스터와 고분자의 적층이 가열 및 냉각되기 때문이다. 더구나, 원하지 않는 온도 영향은 아래 놓여진 기판이나 마스터의 전자, 화학 또는 기계적 성질의 변화나 고분자의 분해에서 발생할 수도 있다. 좋은 복제 신뢰성을 위하여, 종종 공정들은 모든 적층 요소가 온도 주기 중에 열적으로 평형한 상태가 유지되게 선택되며, 이것은 오랜 공정 시간을 요구한다. 결론적으로, 엠보싱 시간을 줄이기 위해서는 시스템의 열용량을 낮추고, 유효한 가열/냉각 소자를 사용하고, 고분자가 단지 국부적으로 가열되는 공정을 택하고, 높은 온도나 낮은 분자량의 고분자를 사용하여 고분자 점도를 낮추어야 한다.

3.1.3 마스터 형상

고분자 유동의 수평 거리는 가능한 한 작아야 한다. 마스터 캐비티와 돌출량은 전 마스터에 걸쳐서 균일하게 분포되어, 충진율이 각 구조물 근

처의 고분자의 변위를 제한하도록 일정하여야 한다. 이것은 불완전한 충진 및 전면적에 대하여 잔류 층 두께의 변화를 줄인다. 종종 PDMS(polydimethyl siloxane)와 같은 얇은 실리콘 매트릭스의 평형 기구가 프레스 장치나 몰드의 두께 변화에 기인하는 압력 불균일을 평형화시키기 위하여 사용된다.

3.1.4 이형

마스터에 있는 어떠한 구조물도 충분한 열과 압력과 시간으로 성형될 수 있을 것처럼 보인다. 높은 형상비 구조물에서는, 이형이 복제 공정에서 핵심 단계가 된다. 고 형상비 구조물은 수직벽을 가지는 마스터를 사용하여 이루어질 수 있다. 여기서 마스터, 고분자 및 기판의 다른 열팽창에 기인하는 수평 변형과 연계하여, 접착, 벽과 조도의 불완전이 이형중에 높은 마찰이나 상호 얽매임을 야기한다. 마스터의 반접착층이 마찰력을 줄이지만, 캐비티가 매우 작고 단지 몇 개의 고분자 연결고리만이 캐비티로부터 추출되어야 할 때는 덜 효과적이 된다.

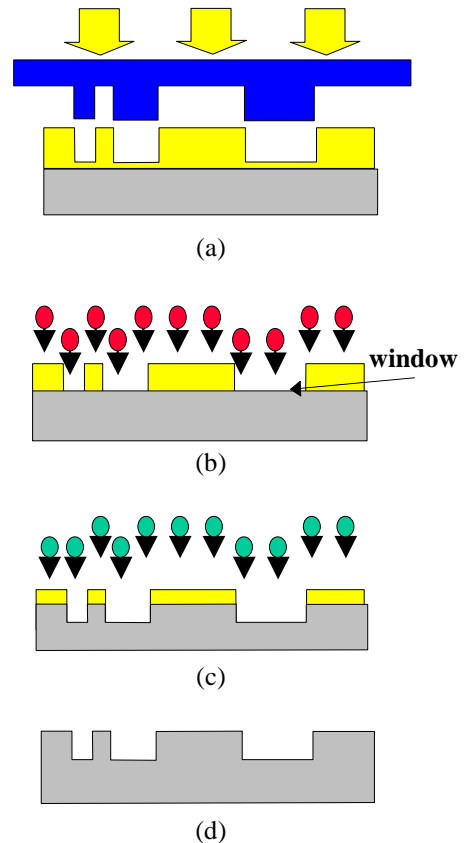


Fig. 1 Replication process of Si master (a) hot embossing (b) O<sub>2</sub> RIE (c) RIE (d) Master

Fig.1 은 나노 임프린트 리소그래피 공정을 이용한 나노 마스터 제조 공정을 나타내었으며, 제작된 마스터를 이용하여 건식 식각 공정으로 마

스터를 복제하는 과정을 도기한 것이다.

### 3. 마스터 복제 공정 실험

Fig. 1 의 나노 임프린트 리소 그래피에 의한 마스터 복제 공정은 E-beam 리소그래피로 제작된 원형 마스터의 손상을 방지하기 위하여 마스터 복제를 핫 엠보싱 공정으로 수행하는 것으로서, 사용장비는 E-beam 시스템, 핫 엠보싱 장치, 고배율 현미경, 알파 스텝, 반응성 이온 식각(RIE: reactive ion etching) 장비 등이 사용된다.

원형 마스터는 실란(silane) 코팅으로 10nm 이하의 표면 조도를 가지며, 원형 마스터를 이용한 핫 엠보싱 공정은 정밀도, 안정성 등을 유지하기 위하여 Fig.2 의 적층으로 준비된다. 복잡한 적층은 대면적 성형시 발생하는 마스터의 휨 문제를 해결하기 위하여 도입된 것이다. PDMS(polydimethyl siloxane)의 탄성 및 실리콘 기판이 평편도를 보장해 주는 수단으로 사용된다. 실리콘 기판 상의 PMMA(polymethyl methacrylate)는 스핀 코팅에 의하여, 두께는 공정 변수를 조절하여 약 330nm 수준으로 제어하였다.

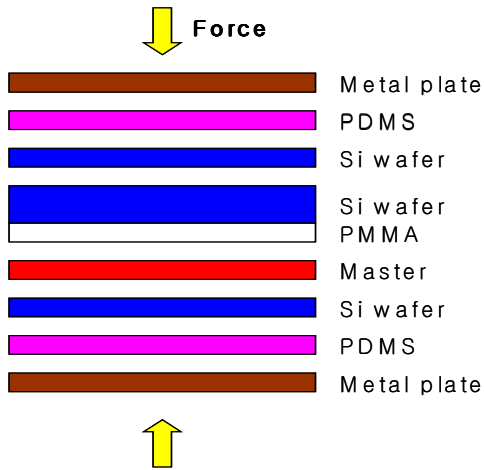


Fig. 2 Stacked structure for compensating parallelity

Fig. 3 은 핫 엠보싱 공정도이다. 온도의 균일성이 가장 중요한 변수이며, 성형 및 냉각 온도는 재료의 유리전이 온도로부터 결정된다. 전체 면적에 대한 온도의 균일성을 수 ℃ 이내로 제어하기 위하여 가열시에 유지시간을 충분하게 두어, 마스터 및 피성형체의 온도를 균일하게 하여야 한다. 적절한 균일도가 확보된 후 하중이 인가되어야 하며, 인가 하중은 약 20 기압이다. 이형을 위해서는 가압 상태로 약 70℃까지 냉각하였으며, 냉각 후 압력을 제거하여 이형하였다.

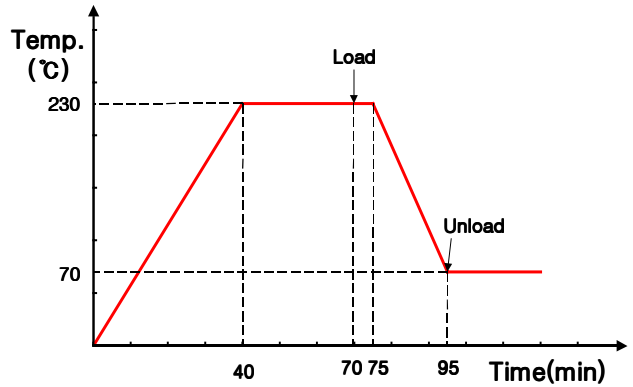


Fig. 3 Time-Temperature plot of embossing process

Fig. 4 는 피성형체 및 성형 후의 형상도를 나타낸 것으로서, 형상비가 약 1로 성형되며, 선폭 200nm, 피치 400nm 의 격자가 형성된다. PMMA 는 산소 분위기에서 식각되며, 크롬은 염소 및 이산화 탄소의 혼합 분위기에서 식각된다. 이렇게 하여 윈도우(window)가 열린 후에는 CHF<sub>3</sub> 를 이용하여 실리콘 식각을 통하여 복제 마스터가 완성된다.

엠보싱 이전의 PMMA 두께, 마스터의 깊이 및 넓이가 주어질 경우, 비압축성 용융고분자는 연속 방정식에 의하여 막 두께가 결정될 수 있다.

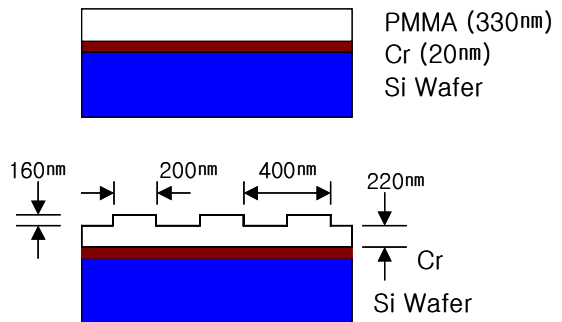


Fig. 4 Original and embossed structures

### 4. 실험결과 및 고찰

핫 엠보싱에서 PMMA 가 코팅된 기판은 유리 전이 온도 이상의 온도로 가열되어 이 온도에서 일정시간 동안 유지된다. 나노 형상을 가진 마스터가 기판상에 놓여지고 엠보싱 공정 중에 일정한 힘이 가해진다. 점성 유체는 마스터의 캐비티(cavity) 속으로 흘러 들어서, 마스터의 표면에 형상에 정확하게 따른다. 용융 PMMA 가 마스터의 캐비티에 채워져서 마스터의 미세형상을 형성할 때, 유리 전이온도 이하의 이형 온도로 냉각되어 엠보싱 하중이 제거된다. 그리고 난 후에, 엠보싱된 시료는 마스터 형상으로 부터 이형된다.

이 공정에서, 온도가 낮을수록 충전에 필요한 시간은 많이 소요된다. 일반적으로, 2 분간의 엠보싱에 일치하는 최적 온도로부터 20℃의 온도 강하는 완전한 충진을 위하여 10 분의 엠보싱 시간이 증가되며, 고분자의 두께 감소는 요구되는 엠보싱 온도의 증가를 초래하고, 적절한 범위에서 하중을 두 배 증가는 요구되는 엠보싱 온도의 20℃ 감소 효과를 유발한다.<sup>(6)</sup> 본 실험에서는 각각의 조건에 대한 실험으로 성형 및 이형 온도, 공정 시간 및 공정 압력을 최적화 하였으며, Fig. 3의 성형도에 의하여 성형된 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 측정 결과, 구조물이 완전하게 성형되었음을 확인하였다.

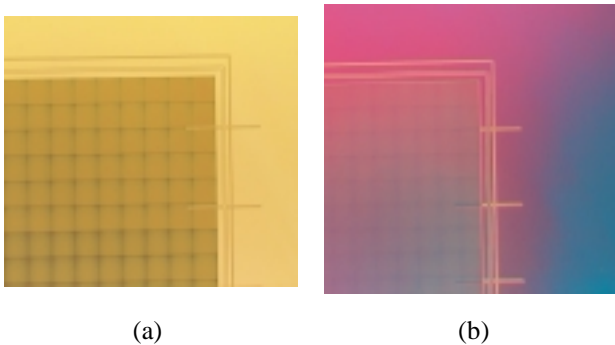


Fig. 5. (a) Original master and (b) Nanoimprinted pattern.

Fig. 6은 Fig. 5(b)의 구조물을 이용하여 복제된 Si 마스터의 형상을 나타낸 것이다. Fig. 6(a)는 깊이 150nm로 식각한 것이고, Fig. 6(b)는 깊이 500nm로 식각한 결과이다. 동일한 식각 조건을 이용하여 식각한 결과, 엠보싱 공정에서 발생하는 유동 현상의 복잡함으로 말미암아 발생하는 실리콘 기판의 굽힘(bending) 문제에도 불구하고, 깊이 150nm의 식각시에는 완전한 복제가 이루어졌으나, 깊이 500nm의 경우에는 수직 방향으로의 언더컷(undercut)이 발생하여 공정 변수의 최적화가 필요함을 보여 주고 있다.

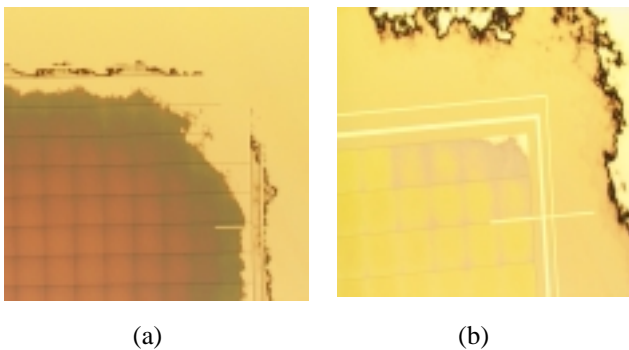


Fig. 6 Replicated Si master (a) depth=150nm and (b) depth=500nm

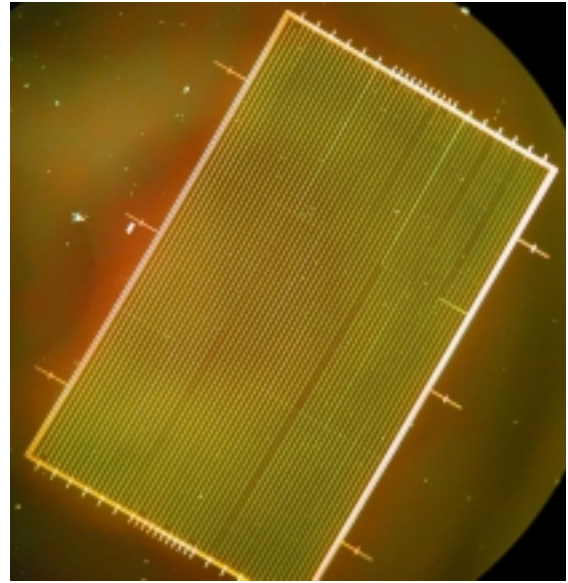


Fig. 7. Nanoimprinted pattern by hot embossing Lithography

Fig. 7은 나노 레올로지 문제를 살펴보기 위하여 나타낸 나노 복제된 패턴 형상의 확대도이다.

핫 엠보싱 공정은 나노 크기에서 구조물의 병렬 복제를 위한 저가격의 빠른 방법이다. 하나의 마스터로 동일한 구조물이 대면적에 대하여 원하는 대로 생산될 수 있다. 고분자의 거동에 대한 이해를 통하여 공정 조건과 마스터 설계의 최적화가 가능하며, 나노 소자의 제조를 위한 우수한 복제 신뢰성이 보장될 수 있다. 얇은 고분자 막이 마스터와 기판 사이에서 압축될 경우 압착 유동을 겪는다. 대면적의 주기적인 구조물은 캐비티 사이의 간격이나 구조물 밀도에 의하여 충진이 제한된다. 본 실험과 같이, 나노 구조물 영역이 구조물이 형성되어 있지 않은 주위에 의하여 에워 싸여 있을 때는, 고분자는 경계면으로부터 유동이 발생하여 순차적으로 충전되며, 캐비티 사이 영역에서의 압착 유동은 무시될 수 있어서, 유효 마스터 면적은 구조물 형성 중단과 마스터 끝 사이의 면적이다. 이러한 경우의 유동은 엠보싱 이전에 캐비티 영역에 있던 고분자는 경계영역으로부터 유입되는 고분자와 혼합되지 않고 밀려 들어 간다. 이것은 중앙부의 압축을 발생시켜서 불룩한 형상을 가진다. 이러한 이유로, 나노 크기에서는 미충진이나 이형 중의 파단으로 국소적인 불연속이 발생할 수 있다. 그러나, 본 실험에서는 공정 변수를 최적화하여 Fig.7과 같은 완벽한 복제물을 제작하였다.

## 5. 결 론

나노 광소자용 구조물 제작용 마스터 복제를 나노 임프린트 리소그래피 공정을 이용하여 제작하기 위하여  $9 \times 15$  (mm<sup>2</sup>)의 대면적을 격자 피치  $p = 400$  nm로 PMMA 로 성형하여 마스터 복제를 수행하였다. 성형온도 및 냉각온도, 압력 및 성형시간의 성형 공정 조건이 각각 230°C 및 70°C, 20 기압, 5 분으로 설정되었다. 이러한 조건으로 제작된 피 성형체를 식각하여 복제 마스터를 제작하였으며, 복제 마스터의 경우 형상비가 1 일 때는 성공적으로 제작되었으나, 형상비 3 의 경우는 Undercut 이 발생하였으며, 공정 최적화를 위한 추가 연구가 필요하다.

## 후 기

본 연구는 21 세기 프린터 연구개발 사업 중 나노 메카트로닉스 기술개발의 세부 과제인 나노 패턴 성형 기술 개발의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Pavesi, L., and Buzaneva, E., 2000, *Frontiers of Nano-Optoelectronic Systems*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- (2) Chou, S.Y., Krauss, P.R., Zhang, W., Guo, L., and Zhuang, L., 1997, "Sub-10 nm lithography and applications," *J. Vac. Sci. Technol.*, Vol. B15, pp. 2897~2904
- (3) Lebib, A., Chen, Y., Bourneix, J., Carcenac, F., Cambil, E., Couraud, L., and Launois, H., 1999, "Nanoimprint lithography for a large area pattern replication," *Microelectronic Engineering*, Vol. 46, pp. 319~322.
- (4) Joannopoulos, J. D., Meade, R. D., and Winn, J. N., 1995, *Photonic Crystals*, Princeton University Press
- (5) Seekamp, J., Zankovych, S., Helfer, A.H., Maury, P., Sotomayor Torres, C.M., Bottger, G., Liguda, C., Eich, M., Heidari, B., Montelius, L., and Ahopelto, J., 2002, "Nanoimprinted passive optical devices," *Nanotechnology*, Vol. 13, pp. 581~586.
- (6) Schiff, H., Heyderman, L. J., Auf der Maur, M., Gobrecht, J., 2001, "Pattern formation in hot embossing of thin polymer films," *Nanotechnology*, Vol. 12, pp. 173~177