비전통적인 방법에 의한 고분자 패터닝

- 나노임프린트 리소그라피 (Nanoimprint lithography)

1. 서론

미래의 집적회로는 나노 미터 크기의 소자를 만들기 위한 신뢰성 있는 패터닝 기술을 필요로 한다. 현재까지 사용되어 왔고 가까운 미래까지 주요 기술로 사용될 노광공정(photolithography)은 해상도 면에 있어서 100nm정도의 한계를 가지고 있다. 이는 100nm이하의 크기에서 일어나는 빛의 간섭문제 때문인데 90년대 중반부터 이러한 노광공정을 대체하기 위해 많은 노력이 있었다. 경제적인 문제만 없다면 100nm이하의 해상도를 갖는 리소그라피 방법은 벌써 개발되어 있는 상황이며, 예를 들어 전자빔 리소그라피(electron-beam lithography), 엑스선 리소그라피(X-ray lithography), 주사 탐침 리소그라피(scanning probe lithography) 등이 그러한 방법의 예이다 [1,2].

이 외의 비전통적인 고분자 패터닝 방법으로는 나노임프린트 리소그라피(nanoimprint lithography, NIL)[3], 모세관 리소그라피(capillary force lithography, CFL)[4], 마이크로 접촉 인쇄(microcontact printing)[5], 전기유도에 의한 구조형성(electrically induced structure formation)[6] 등이 있으며 이번 장에서는 먼저 나노임프린트 리소그라피에 대해서 알아보고자 한다.

2. 기술 개요

나노임프린트 리소그라피는 누르고자 하는 고분자 층에 빛을 조사하여 화학구조를 변형시키는 노광공정과는 달리 열적으로 고분자 층을 유동성 있게 만든 다음 패턴이 있는 주형을 접촉시키고 물리적으로 눌러서 고분자 층에 원하는 패턴을 만들어 내는 방법이다 [3].

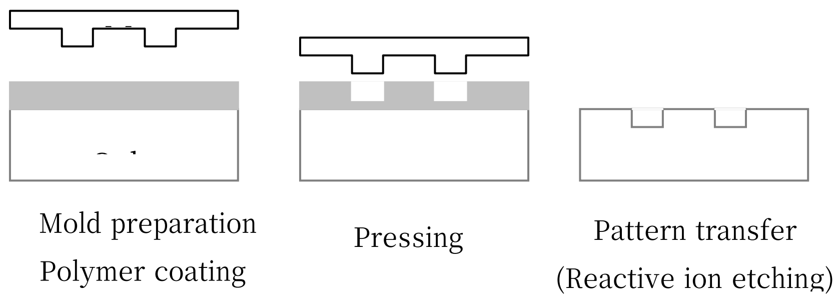


그림 1. 나노임프린트 공정의 개략도

보통 누르기 전에 고분자의 유리전이온도 이상으로 가열하여 패턴을 형성하고

냉각시킨 후 주형을 제거한다. 이 후, RIE(reactive ion etching)같은 비등방성 에칭공정을 통해 눌린 영역에 남아있는 고분자 층을 제거할 수 있다. 그런데, 이러한 고온 공정에서는 고분자 층으로부터 주형을 깨끗하게 떼어내는 것은 매우 중요한 요구사항 인데 보통은 불소를 포함하는 자기조립분자(self-assembled monolayers)가 접착방지제(adhesion agent)로 사용되어 왔다. 또한 가열과 그 이후의 식힘 과정이 반복되면서 생기는 주형과 주형으로 인해 눌린 고분자 층의 왜곡현상도 극복해야 할 문제이다 [3].

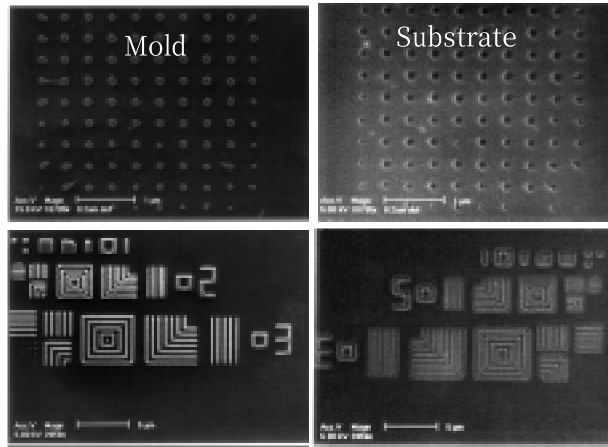


그림 2. 나노임프린트 공정의 대표적인 결과

그림 2는 나노임프린트 공정을 통해서 얻을 수 있는 결과를 보여준다. 그림에 나와있듯이 원판 실리콘 몰드와 기판의 고분자 구조물은 서로 상보적인 관계에 있으며 좌우가 서로 뒤바뀌게 됨을 쉽게 이해할 수 있다. 현재까지 나노임프린트를 이용해서 형성한 가장 작은 크기는 프린스턴 대학의 Steven Chou 교수가 발표했던 7나노 정도의 dot structure 이며 이론적으로는 이보다 작은 크기도 가능하다. 하지만 보통 원판 몰드를 만드는 과정이 전자빔 리소그라피를 이용하는 매우 까다로운 과정이므로 패턴의 크기나 기하학적인 구조는 보통 전자빔 리소그라피의 성능에 따라 좌우되는 경우가 많다.

최근 NIL 공정의 화두로 떠오르는 것은 크게 세가지가 있는데 첫째는 대면적 공정이고 두번째는 고분자의 잔여층을 최소화하는 것이며 세번째는 어라인먼트이다. 이외에도 공정상에 어떻게 하면 몰드를 깨끗이 떼어낼 수 있는 가와 사용하는 압력, 온도를 좀더 낮은 압력, 낮은 온도로 낮추려는 노력이 있으나 이에 대한 자세한 내용은 관련 논문을 찾아보면 될 것이다.

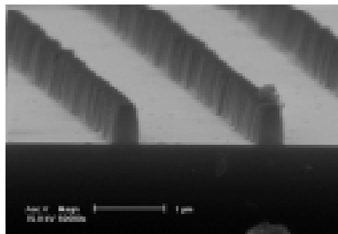
먼저 대면적 공정에 관해서는 4인치 정도의 공정은 defect가 거의 없이 성공적으로 진행될 수 있음이 많이 보고되었으며 [7] 그 이상의 사이즈에 대해서는 아직 wafer를 한 번의 공정으로 전면적으로 패턴 이송한 결과가 발표되지 않고 있다. 그 이유는 그렇게 큰 면적에 고른 압력을 가하기가 매우 어려운 문제도

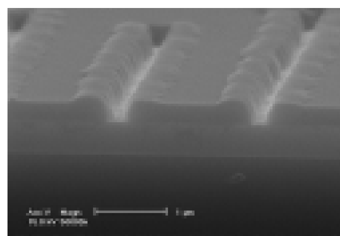
있으며 몰드 자체의 단가가 매우 고가여서 경제적이지 못하다는 단점 때문이다. 따라서 최근에는 작은 크기의 몰드를 여러 번 반복해서 찍어내는 step and repeat 방법이 널리 사용되며 이 경우 이론적으로는 8인치 이상의 대면적 웨이퍼에도 무리없이 공정이 적용 가능하다.

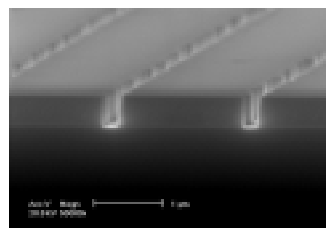
두번째로 잔여층의 문제는 임프린트 공정이 가지고 있는 큰 약점으로 보이며 이는 몰딩 공정의 전반적인 문제이기도 하다. 즉, 몰드로 고분자를 누른 후 기판에는 항상 일정 두께 이상의 고분자 잔여층이 남기 때문에 이를 제거하는 고분자 에칭 공정을 포함하여 항상 2단계의 건식 식각이 이루어져야 하는 문제가 있다. 이는 100나노 이상의 극심한 영역에서 특히 문제가 될 것으로 보이며 이를 줄이기 위한 공정상의 노력이 현재에도 활발히 진행중이다.

마지막으로 어라인먼트 문제가 있다. 노광공정은 비접촉 공정 방식이기 때문에 어라인먼트가 상대적으로 자유로우며 특히 곡면이나 다층 구조에 적용할 때 큰 위력을 발휘한다. 나노임프린트 공정에 있어 이렇게 곡면이다 다층 구조에 적용할 때는 패턴 전송이 실패할 확률이 높고 또한 접촉식으로 어라인을 해야 하므로 그 횟수에 제한을 받기 쉽다. 현재 어라인 마커를 이용한 정확도는 수백 나노 정도로 알려져 있고 앞으로 보다 정확한 어라인먼트를 위해 많은 해결 과제가 남아 있다.

Mold







Imprinted Reactive-ion-etched

그림 3. 나노임프린트 공정 후 건식 식각을 통한 패턴 전송

그림 3에서는 나노임프린트 공정을 통해 고분자 패턴을 형성한 후 RIE 등과 같은 건식 식각을 통해 패턴을 전송한 예이다. 200 나노 정도의 라인 구조가 훌륭하게 전사되었음을 보여주며 건식 식각을 통해 상당히 비등방성의 구조가 형성될 수 있음을 보여준다. 이런 예를 통해 나노임프린트 리소그라피가 반도체

공정에 사용되는 노광공정을 어느 정도 대체할 수 있으리라는 청사진을 보여주지만 아직까지 defect에 대한 완전한 조절 및 잔여층, 어라인먼트 등에 관한 문제점으로 인해 단시간에 반도체 공정에 적용되기는 어려울 전망이다. 하지만 최근 일본의 반도체 로드맵 및 MIT에서 선정하는 세계를 변화시킬 10대 기술에 나노임프린트 기술이 선정됨으로써 앞으로 이 분야에 대한 연구는 계속될 전망이다.

지금까지 설명한 방식은 주로 고분자를 열적으로 가열하여 유동성을 일으키고 이를 이용해 패턴 이송을 한 방식이다. 따라서 혹자는 이를 Hot embossing 혹은 Thermal imprint lithography라고 부르기도 한다. 그런데 이렇게 열을 가하면서 강한 압력을 누르게 되면 장치가 복잡해고 따라서 공정의 경제성에 흠이 된다. 또한 강한 압력으로 인한 대면적 공정의 어려움 및 기판이 깨지기 쉬운 문제 등 여러가지 공정상의 문제점이 대두된다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해 최근에는 UV로 경화되는 고분자를 이용한 UV-assisted imprint lithography가 소개되었다 [8].

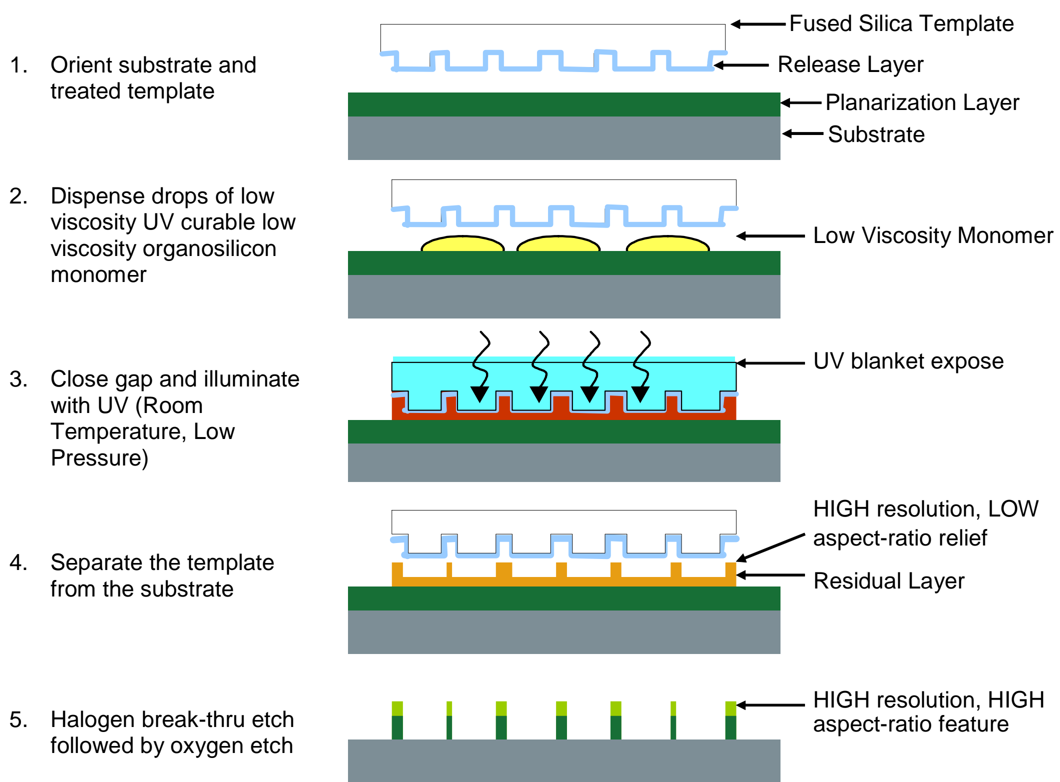


그림 4. UV-assisted nanoimprint lithography

Texas 대학의 C. G. Willson 및 S. V. Sreenivasan 교수가 제안한 이 방법은 대체적으로 기존의 hot embossing 방법과 일치하나 UV 를 통해 경화시키기

때문에 거의 물과 같은 점도를 가지고 있는 액체를 누르는 방식이며 따라서 누르는 압력이 상압 이하로도 떨어질 수 있다. 또한 UV 를 통해 경화시켜야 하므로 사용하는 몰드는 quartz 계통의 투명한 몰드가 사용되어야 함은 주지의 사실이다. 이 방법은 공정상으로 볼 때 기존의 임프린트 방법보다 많은 장점이 있는 것은 사실이나 quartz 몰드에 나노패턴을 새기는 작업이 여간 어려운 일이 아니며 따라서 몰드 제작 비용이 천문학적으로 증가하게 된다. 또한 몰드를 접촉시킬 때 기포가 갇히게 되어 defect 가 많이 생기게 되므로 이에 대한 조절이 문제가 된다. 현재 이 두가지 임프린트 방법이 세계적으로 양분화되어 사용되고 있으며 각각이 장단점을 가지고 있어 앞으로 어떻게 발전할지는 예측하기 어렵다. UV 방식에도 기존에 임프린트가 가지고 있었던 대면적 공정, 잔여층, 어라인먼트 문제가 동일하게 존재함은 물론이다.

3. 참고문헌

[1] G. M. Wallraff and W. D. Hinsberg, *Chem. Rev.*, 99, 1801 (1999).

[2] Y. Xia, J. A. Rogers, K. E. Paul, and G. M. Whitesides, *Chem. Rev.,* 99, 1823 (1999).

[3] S. Y. Chou, P. R. Krauss, and P. J. Renstrom, *Science*, 272, 85 (1996).

[4] K. Y. Suh, Y. S. Kim, and H. H. Lee, *Adv. Mater.*, 13, 1386 (2001).

[5] Y. Xia and G. M. Whitesides, *J. Am. Chem. Soc.*, 117, 3274 (1995).

[6] E. Schaffer, T. Thurn-Albrecht, T. P. Russell, and U. Steiner, *Nature*, 403, 874 (2000).

[7] D. Y. Khang and H. H. Lee, *Appl. Phys. Lett., 75, 2599 (1999).*

[8] http://willson.cm.utexas.edu/Research/Sub_Files/SFIL/