

## 나노 임프린트를 위한 스탬프 개발 기술

이진우, 주병권 / 고려대학교 전기전자전파공학부

### 1. 서론

차세대 NEMS(Nano Electro Mechanical System) 기술 중 거의 유일하게 상용화된 나노 임프린트 기술은 다음의 3가지 개별적인 기술로 구성되어 있다. 임프린트 장비 기술, 임프린트 스탬프 기술, 그리고 패턴 전사를 위한 레진(resin) 개발 기술이다. 물론 가장 중요한 기술은 장비 기술이지만, 지금부터 언급할 스탬프 개발 기술도 그에 못지않게 중요하다. 왜냐하면 결국 최종적으로 획득하게 되는 나노 스케일의 패턴은 스탬프의 패턴이 그대로 옮겨지는 것이기 때문이다. 따라서 최종 패턴의 완성도는 전적으로 스탬프의 완성도에 달렸다고 해도 과언이 아니다.

현재까지 가장 좋은 방법은 전자빔을 사용하는 것이다. 전자빔을 사용하면 패턴 하나하나를 직접 그리는 것이기 때문에 그 어느 방법보다도 정교한 패턴을 개발할 수 있다. 그러나 패턴 하나 만드는데 며칠이 요구되고, 그만큼 엄청난 비용이 필요하다. 따라서 매우 복잡한 형태의 패턴을 개발하는 경우가 아니라면, 동일한 크기의 패턴 개발에 대하여, 완성도의 손실 없이도 최대한 저렴한 패턴을 개발할 수 있는 기술이 요구된다. 본 지면에서는 이와 같이 저렴하면서도 쉽게 패턴을 형성할 수 있는 대체 기술에 대하여 설명하고자 한다.

### 2. 본론

우선 패턴 자체에 대하여 생각해보자. 임프린트 기술을 1회 적용하여 개발할 수 있는 패턴은 2차원이다. 2회 이상 적용하면 3차원 패턴의 개발이 가능하다. 그렇다면 2차원 패턴이란 무엇인가. 2차원 패턴은 형태(shape), 크기(scale), 간격(interval), 높이(height)의 4 요소가 하나의 스펙(specification)을 구성한다. 이 중 높이는 반응성 이온 식각(Reactive ion etching)이라는 반도체 공정을 통하여 제어가 되고, 어떤 패턴 개발 방법의 경우에도 대체로 동일하다. 따라서 나노크기의 패턴의 개발 방법이란 형태, 크기, 간격을 제어하는 방법을 말하는 것이다. 전자빔을 사용할 경우 이 세 가지 요소가 개별적으로 제어될 수 있으나, 다른 개발 방법의 경우 크기와 간격 사이에 대체로 상관관계가 있다. 즉, 원하는 크기와 간격의 획득이 쉽지 않다는 뜻이다.

마이크로 크기에서는 패턴의 제어가 어렵지 않았다. 예를 들면, 실리콘 기판위에 놓여있는 마이크로 크기의 황소를 본적이 있을 것이다. 마이크로 크기의 틱니 바퀴가 맞물려 있는 사진도 본적이 있을 것이다. 이 경우는 모두 마이크로 크기이기 때문에 어떤 모양을 만들어도 비용이 많이 소요되지 않는다. 그런데 나노 규모에서는 그렇지 않다. 우선 다양하게 만들지 못하고, 기술적으로 매우 어렵다. 간격의 제어조차도 마이크로

수준과는 비교가 안되게 어렵다. 기계적으로 만들어지는 나노 패턴은 대부분 정사각형이나 원형과 같은 매우 단순한 모양이 일정한 간격으로 배열되어 있는 형태이다. 그런데 이렇게 단순한 패턴이 실제로는 매우 유용하다. 특히 단백질, DNA, 효소등을 다루는 바이오 관련 분야에서 매우 다양한 응용 분야가 제시되고 있다.

나노 패턴을 저렴하게 만드는 방법은 여러 가지가 있지만, 그 중 다음의 3가지에 연구가 집중되고 있다. 레이저 빔의 간섭(Laser interference)을 이용한 스탬프, 양극 산화 알루미늄(Anodic aluminum oxide) 스탬프, 그리고 블록공중합체(Block copolymer) 스탬프이다. 첫 번째 방법은 패턴의 개발이 물리적인 방법이고, 뒤의 두 가지 방법은 화학적인 방법이다. 레이저 빔의 간섭을 이용한 스탬프의 패턴은 사각형, 삼각형, 원형 등을 만들 수 있으나, 양극 산화 알루미늄으로 개발된 스탬프는 원형이다. 반면 블록공중합체 스탬프의 나노 패턴은 다양하다. 이제 이 3가지 방법에 대하여 간략하게 알아보자.

### 2-1. 레이저 빔의 간섭을 이용한 스탬프 개발(Laser interference assisted stamp fabrication)

일정한 고유의 파장과 진동수를 가진 두 개의 빛이 진행할 때, 두 빛의 방향이 같다면 혼합된 빛은 그대로 진행파가 될 것이다. 그러나 그림 1.과 같이 두 개의 빛의 진행방향이 서로 다르다면 간섭 현상이 발생한다.

즉, 벽에 줄을 매어놓고 손으로 줄을 잡고 흔들면, 손에서 벽으로 진행되는 파장과 벽에 부딪힌 후 다시 손으로 진행되는 반사된 파장이 충돌하게 된다. 이 때, 두 파장이 만나 파장의 꼭지와 꼭지가 만나고, 골과 골이 만나게 되면, 즉, 두 파장이 중첩이 되면 파장의 에너지가 서로 더해지거나 혹은 소멸하는 간섭(Interference) 현상이 발생한다. 동시에 중첩된 파장에 일정한 간격을 두고 맥놀이(beating) 하는 정상파(standing wave)가 형성된다. 만약에 진행되는 파장이 빛이라면, 에너지를 갖게 되고, 간섭을 통하여 정상파가 된 빛은 맥놀이 현상에 의하여 에너지가 일정한 간격으로 배열되게 된다.

레이저 빔의 간섭을 이용한 스탬프의 개발은 이 원리를 이용한 것이다. 정상파에서 꼭지점과 골은 보강 간섭에 의하여 에너지가 증폭되고, 맥놀이의 노드(node)는 에너지가 낮게 된다. 따라서 이렇게 혼합된 빛을 레진이 도포된 기판위에 노출시키면 레진은 일정한 간격으로 높은 에너지를 받게 되어 레진위에 빛이 많이 노출된 부분과 노출되지 않은 부분을 형성하여 1차원의 선형 패턴이 형성된다. 1차원 패턴이 형성되면 2차원 패턴의 형성은 더욱 수월하다. 2차원 패턴은 1차원 패턴이 형성된 레진을 90° 회전시키고, 다시 한번 빛에 노출시키면 된다. 그러면 1차 노광시에 빛에 노출되지 않았던 부분에 국부적으로 추가 노출이 있게 되고, 사각형, 혹은 둥근 형태의 2차원 패턴이 형성된

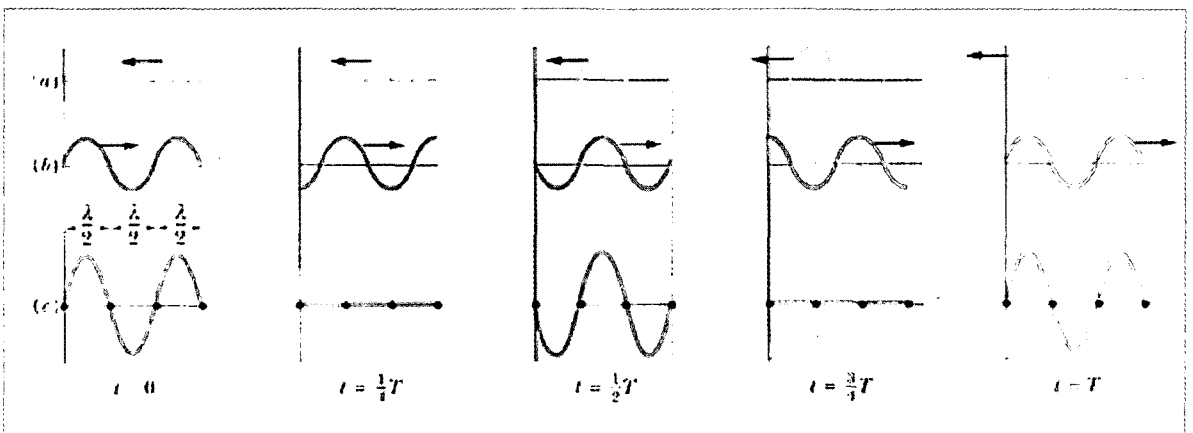


그림 1 반대방향으로 진행되는 두 파장의 간섭에 의하여 정상파가 발생하는 원리

다. 다른 형태의 패턴은 레진을 1차 노광에 대하여 어느 정도의 각도로 회전하여 추가 노광하는가에 달려있다. 노광 각도에 따라서 마름모 형태도 가능하고, 바늘 형태도 가능하다. 따라서 상대적으로 다양한 2차원 패턴이 가능하다. 또한 파장의 크기를 조절하고, 간섭되는 빛의 강도를 제어하면 패턴 사이의 간격도 제어가 가능하다. 그림 2.는 레이저 빛의 간섭을 이용하여 개발한 나노 Dot 패턴이다.

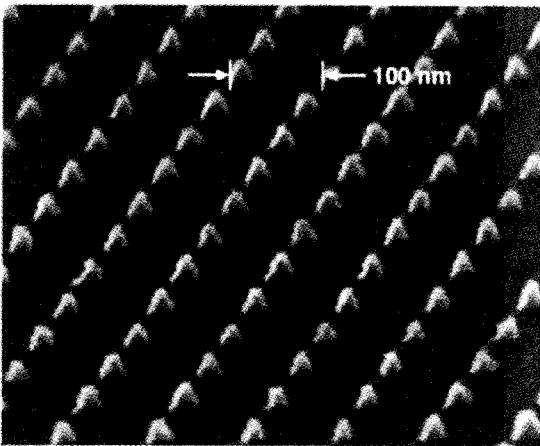


그림 2 레이저 빛의 간섭을 이용하여 개발한 나노 Dot 패턴

### 2-2. 양극 산화 알루미늄 스탬프 개발(Anodic aluminium stamp fabrication)

그림 3. 과 같이 알루미늄을 양극(Anode)으로 하여 산화 용액속에서 전류를 흘려주면 표면에 산소가 흡착되어 산화막이 형성되면서 매우 작은 나노 기공이 형성된다. 양극 산화 알루미늄 스탬프는 이 현상을 스탬프의 개발에 적용한 것이다. 알루미늄의 산화 및 기공 형성에 사용되는 산은 다음의 표 1.과 같이 일반적으로 3가지가 사용되고, 각각에 대하여 다른 크기의 나노 패턴이 형성된다.

레이저 빛의 간섭을 이용한 패턴의 경우 간섭하는 빛에 대한 레진의 방향과 입사되는 빛의 강도에 따라

표 1 양극 산화 알루미늄 기술의 일반적인 공정 조건

산화 용액	화학식	인가 전압	패턴 크기
Sulphuric 산	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	25 V	63 nm
Oxalic 산	H <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	40 V	100 nm
Phosphoric 산	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	195 V	500 nm

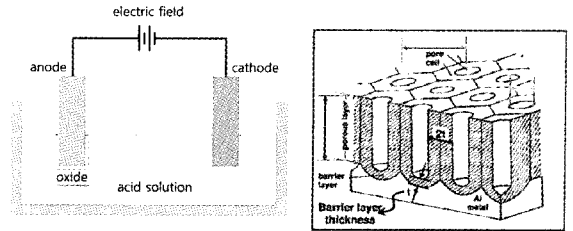


그림 3 양극 산화 알루미늄 기술 개략도 및 기공의 구조

다양한 패턴의 형태와 간격의 제어가 가능하였다. 반면에 양극 산화 알루미늄을 이용한 스탬프의 경우, 패턴과 패턴 간격의 크기의 다양성은 오직 알루미늄 산화막의 식각에 사용되는 산(acid)의 종류에 의존한다. 즉, 하나의 식각 용액이 정해지면, 패턴의 크기와 간격의 합도 결정된다. 만약 패턴의 크기가 커지면, 상대적으로 간격은 감소하고, 패턴이 작으면 패턴사이의 간격은 증가한다. 따라서 패턴의 다양성은 얼마나 다양한 식각 용액을 개발하거나 찾아내느냐에 달렸다. 그리고 레이저 빛의 간섭을 이용한 패턴 개발 방법에 비하여 양극 산화 알루미늄에 의한 패턴이 가지는 형태는 거의 대부분 원형이고, 6각형으로 배열되어 있다. 이 정도면 이 방법으로 만들 수 있는 패턴의 스펙(specification)은 매우 제한적이라고 할 수 있다. 그러나 레이저 빛 간섭법에 의한 패턴이 수 백 nm 크기의 패턴 개발에 제한된 반면 양극 산화 알루미늄 법은 100 nm 이하의 패턴도 만들 수 있고, 레이저 빛 간섭법 보

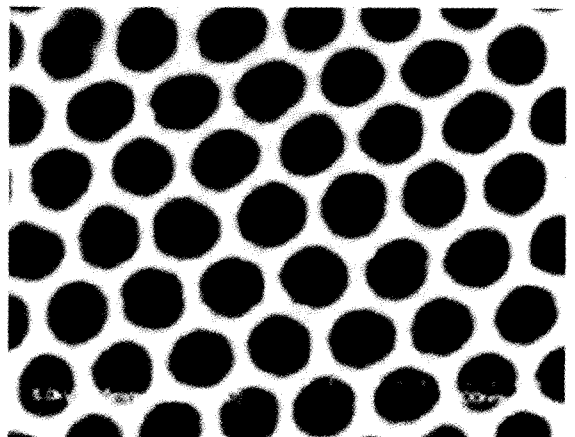


그림 4 양극 산화 알루미늄 기술을 이용하여 개발된 100 nm 크기의 패턴

다 촘촘한 패턴을 개발할 수 있다. 그림. 4는 이와 같은 양극 산화 알루미늄 기술을 이용하여 개발된 패턴의 전자현미경 사진이다.

### 2-3. 블록공중합체 스탬프 개발(Block copolymer stamp fabrication)

블록공중합체는 서로 다른 두 개 이상의 고분자가 자기 조립(self assembly)이라는 특성에 의하여 서로 상 분리(phase separation)되어 있으면서, 동시에 서로 공유결합에 의하여 연결되어 있는 상태의 소재이다. 공중합체는 두 고분자, 즉 두 중합체가 공존한다는 의미이고, 블록은 반복되는 구조체를 형성한다는 의미이다. 두 개의 (혹은 그 이상의) 소재가 서로 섞이지 않고 분리되어 있다는 사실과 블록을 형성한다는 것은 둘 중의 어느 하나를 선택적으로 제거하면, 남은 하나가 패턴을 형성하게 된다는 것을 의미한다. 그림 5.에는 두 개의 중합체 소재가 서로 혼합되어 있을 때, 혼합비에 따라서 상의 형태가 바뀌는 것을 나타낸 것이다.

그림에서 가로축의  $f_A$ 는 혼합물에서의 A라는 물질의 분율이고, 세로축의  $\chi N$ 는 Flory-Huggins 상호작용 인자,

그리고  $N$ 은 두 중합체의 중합도를 나타낸다. 그림에서 보는바와 같이 A물질의 분율이 높아질수록 점의 형태에서 선형으로, 다시 얇힌 형태로, 그리고 면의 중첩의 형태로 형태가 변형된다. 이것은 결국 0차원에서 1차원으로 다시 2차원으로 형태가 변화하는 것을 나타낸다. 따라서 두 중합체 중 하나를 제거하면 다른 하나의 중합체가 나노 패턴을 갖게 되고 이 패턴을 마스크로 이용하여 스탬프를 개발하게 되는 것이다. 이 때 Flory-Huggins 상호작용 인자를 증가시키면 10 nm 이하의 패턴도 얻을 수 있다고 보고되었다. 이 수치는 전자빔을 이용한 패턴 개발의 수준(~ 30 nm)을 훨씬 상회하는 것이다. 그림 6A.에는 블록공중합체를 이용한 나노 패턴의 개발 공정을 나타내었다. 그림에서 PS는 Polystyrene, PI는 Polyisoprene 이다. 이 두 중합체가 SiN 위에 코팅되어 있다. 그리고 두 중합체를 코팅하게 되면 그림과 같이 PS Matrix에 PI가 박혀있는 형태가 된다. 이제 O<sub>3</sub>를 이용하여 PI를 선택적으로 제거하고 반응성이온식각법을 이용하여 그림과 같이 기판위에 금속의 Dot을 만들 수 있다. 그림 6B. 는 이와 같은 공정으로 개발한 금속 Dot의 전자현미경 사진이다.

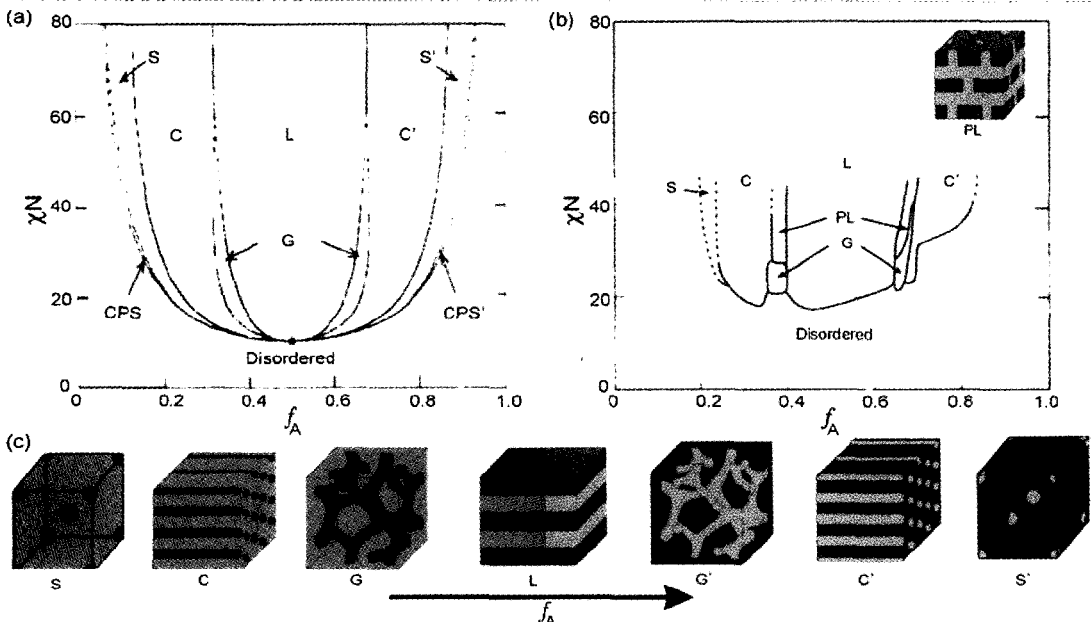


그림 5 중합체 A와 B가 상분리를 통하여 형성하는 형태의 변화

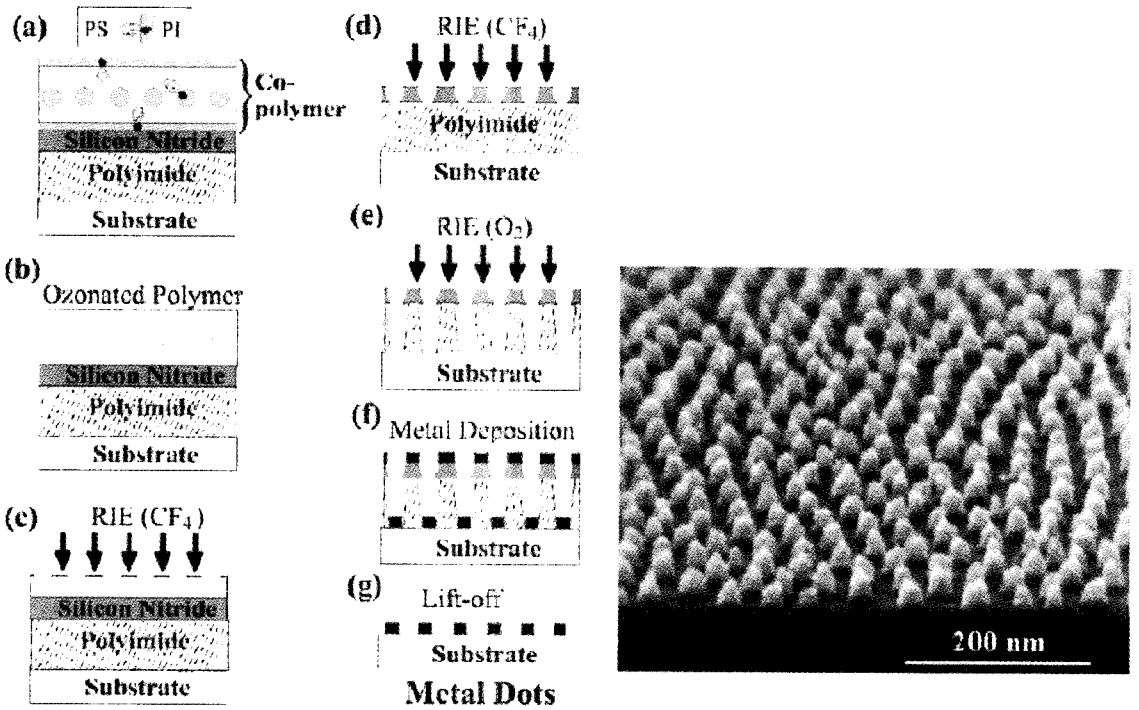


그림 6 (A) 블록공중합체 기술을 이용한 금속 Dot 나노패턴의 개발 (A) 개발 공정. (B) 금속 Dot의 전자현미경 사진

### 3. 결 론

지금까지 전자빔을 사용하지 않고 나노 패턴을 개발하는 3가지 방법에 대하여 알아보았다. 저렴한 비용으로 나노 패턴을 개발하려니 공정이 물리, 화학적으로 매우 복잡하고, 많은 공정 변수로 인하여 최적의 조건을 정하기가 쉽지는 않다. 그러나 개발된 패턴의 완성도는 소요된 비용에 비하여 상대적으로 매우 높다. 물론 복잡한 패턴의 개발은 여전히 쉽지 않다. 그러나 상기 기술한 3가지 방법은 전자빔 기술을 대체할 수 있는 기술로서 전자빔과 같이 충분히 상용화가 가능하고, 저렴한 비용으로 인하여 폭넓게 공급될 수 있는 대체 기술로서 다양한 응용 분야에의 적용이 기대된다. 이상으로 나노 임프린트용 스탬프 개발 기술에 대하여 간략하게 알아보았다.

### 감사의 글

본 내용은 과학기술부 2007 국가지정연구실 사업 (R0A-2007-000-20111-0)의 지원하에 작성되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. D. Halliday et al, Fundamentals of Physics (6th ed.) (2001).
2. S. W. Ahn, Nanotechnology, vol. 16, pp. 1874 (2005).
3. T. A. Savas, J. Appl. Phys. vol. 85, pp. 6160 (1999).
4. W. Lee et al, Nature Materials, vol. 5, pp. 741 (2006).
5. M. Park et al, Science, vol. 276, pp. 1401 (1997).
6. R. A. Segalman, Mater. Sci. Eng. R, vol. 48, pp.