

# 마이크로 / 나노 구조물의 비전통적인 물성

나노구조물이 스스로 원하는 형태를 형성하는 자기조립현상은 최근 차세대 미세공정 기술로서 많은 관심을 끌고 있다. 현재 자기조립현상을 야기하는 다양한 메커니즘들을 체계화하기 위한 여러 해석 연구들이 진행되고 있으며, 이는 효율적인 제어 기술 개발을 유도하여 자기조립현상의 성공적인 활용성을 보장할 것이다.

김동철 서강대학교 기계공학과, 교수

e-mail : dckim@sogang.ac.kr

## 미세공정의 기술 동향 및 자기조립현상의 가능성

최근 반도체, 인쇄직접회로(Printed Integrated Circuits), 발광다이오드(LED), 생물의학 디바이스들과 같은 고도로 발달된 디바이스들의 직접도와 소형화를 향상시키기 위한 많은 노력이 기울어져 왔다. 현재 이러한 디바이스들의 성능을 더욱 향상시키기 위해 새로운 미세공정 기술의 개발이 시급히 요구되고 있다. 그러나 기존의 전통적인 공정 기술들은 일반적으로 개선에 있어 높은 비용을 필요로 하고 또한 개선 후의 해상도도 불충분하다는 한계를 가지고 있다. 게다가 에칭을 이용한 기판 노출방법이나, 자외선을 이용한 방법, 높은 온도를 이용하는 방법들은 유약한 유기재료에 적용하기에는 많은 문제점을 나타낸다. 이에 따라 미래의

초소형 디바이스 산업에 있어 나노스케일의 정밀도, 생산속도 향상을 위한 단순한 공정 프로세스, 복잡한 환경에서의 패터닝 기술, 다양한 타입의 기판(substrate), 넓은 영역에 걸친 3차원의 패터닝 기술, 그리고 이 모든 것을 낮은 가격으로 수행할 수 있는 가격 경쟁력 등을 갖춘 새로운 미세공정 기술 개발이 핵심적인 요구 사항이 될 것이다.

현재 사용되고 있는 대표적인 미세공정 기술의 특성 및 한계를 나타낸 표 1에서 보듯이 높은 생산성과, 해상도 그리고 저비용 공정을 수행하기 위해서는 기존의 공정기술은 대부분 상당한 투자자금을 요구한다. 반면, 나노스케일의 구조물 제작에 있어 원자 스스로 요구하는 패턴을 형성하는 자기조립(self-assembly)현상은 높은 해상도와 용이한 공정 프로세스로 인해 최근 매우 큰 주목을 받고 있다. 이 방법은 매우 작은 크기에 대

표 1 현재 제조 공정 기술의 특징

공정기술	해상도	공정	한계점
Photolithography	80 nm	병렬(Parallel)	고비용, 정밀도
Scanning beam lithography	10 nm	직렬(Serial)	저속 공정, 정밀도
Soft lithography	2 nm	병렬(Parallel)	변형
Scanning probe lithography	1 nm	직렬(Serial)	저속 공정
Edge lithography	16 nm	병렬(Parallel)	제작가능 구조물의 한계
자기조립(Self-assembly)	1 nm	병렬(Parallel)	공정 제어

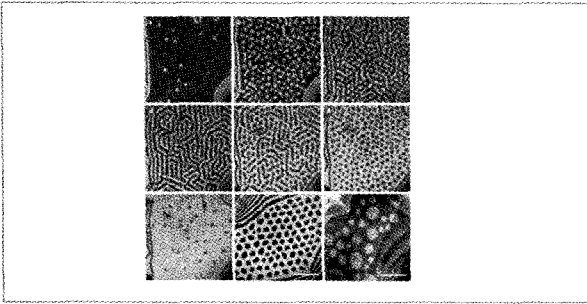


그림 1 자기 조립된 Pb와 Cu(111)의 표면 패턴

해 패턴이 가능하고 패턴화된 넓은 영역에 대해 높은 신뢰성을 보여준다. 그러나 이러한 자기조립 방법 역시 큰 스케일의 공정에 있어서는 기술적 어려움을 포함하고 있다. 무엇보다도 자기조립현상은 다양한 물리적, 화학적 메커니즘들이 복합적으로 작용하는 현상으로, 이를 구체적으로 체계화하는 데 있어 상당한 수준의 지적 도전을 수반하고 있다. 최근 자기조립현상을 이용한 미세공정 기술 개발을 위해 메커니즘을 이해하고 프로세스를 컨트롤하기 위한 다양한 학제적 연구가 수행되고 있다. 이러한 연구들은 나노스케일의 구조물 제작에 있어 저비용, 고정밀의 새로운 방법으로서의 전환을 이끌며 후에 있을 새로운 산업혁명을 기약한다.

### 자기조립현상 해석 연구 사례

최근 다양한 외부장(external field)을 통해 나노구조물의 자기조립현상을 컨트롤하기 위한 다채로운 연구가 수행되고 있다. 특히 다중의 에너지와 물리적 현상을 고려한 전산 모델링 연구가 다수 수행되었으며 이는 수치적 해석과 물리적 분석을 기반으로 하여 나노구조물의 제작과정을 컨트롤할 수 있는 효과적인 방법들을 제안하고 있다. 자기조립현상을 이용한 나노스케일의 시스템 개발은 시스템의 내부적, 외부적 상호작용을 모두 고려해야 한다. 내부적인 시스템을 구성하는 입자

간의 상호작용은 일반적으로 수소결합(hydrogen bonding), Van der Waals 결합, 정전기적(electrostatic) 힘, 소수성(hydrophobic interaction)과 같은 화학작용에 의해 컨트롤 된다. 또한 외부에서 작용하는 힘이나 형상 구속조건들 역시 자기조립 과정을 통해 최종적으로 구성된 구조물에 크게 영향을 미칠 수 있으며 이는 자기조립 과정을 컨트롤할 수 있는 추가적인 자유도를 제공하게 된다. 외부적으로 가한 힘은 일반적으로 원자 거리보다 큰 스케일을 가지기 때문에 내부적 상호작용에 비해 자기조립 과정을 컨트롤하는 데 있어 용이한 적용이 가능하며, 정전기적, 전기적, 유체역학적 상호작용과 같은 다양한 물리적 방법을 고려하는 것이 가능하다. 이러한 연구 사례들은 다음과 같다.

#### 표면의 화학처리를 통한 나노구조물의 자기조립 공정

그림 1과 같이 최근 실험을 통해 탄성의 기판 위의 이상의(two-phase) 단층박막(monolayer)이 나노스케일로 자기조립하는 현상이 밝혀졌다. 이러한 현상에 대한 보다 명확한 물리적 이해와 이를 바탕으로 한 컨트롤 방법을 제안하기 위해 해석연구가 진행되었다. 그림 2에서 보는 바와 같이 탄성장(elastic field) 위에서의 이상 단층박막의 자기조립현상이 효과적으로 시뮬레이션되었다. 두 상의 경계에서의 표면에너지는 상들을 성장(coarsen)하게 하는 경향이 있으며 반면 표면 응력은 상들을 조밀(refine)하게 만들려는 경향을 가지고 있다. 이러한 두 메커니즘간의 상호 작용은 각 성분의 상의 크기 및 배열을 결정하게 된다. 그림 2는 모델의 개략도와 특정 시간 후에 박막의 변화 양상을 보여준다. 각 그림의 외쪽 하단에 위치한 작은 박스는 적용된 화학적 포텐셜(chemical potential)의 분포를 보여준다. 이러한 시뮬레이션은 기판 표면의 화학적 처리를 통

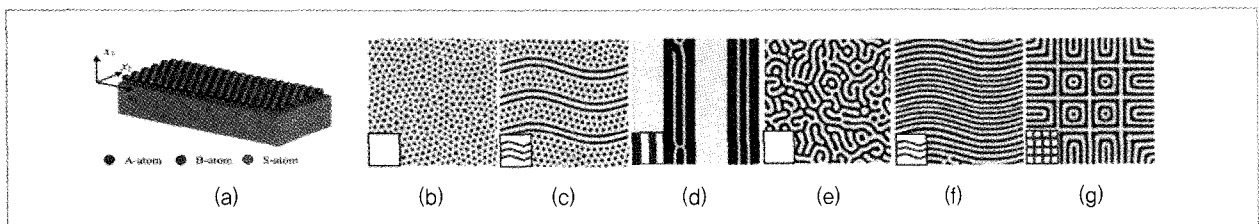


그림 2 (a) 모델의 개략도, 평균 농도(the average concentration)는 (b)~(d) 0.4, (e)~(g) 0.5

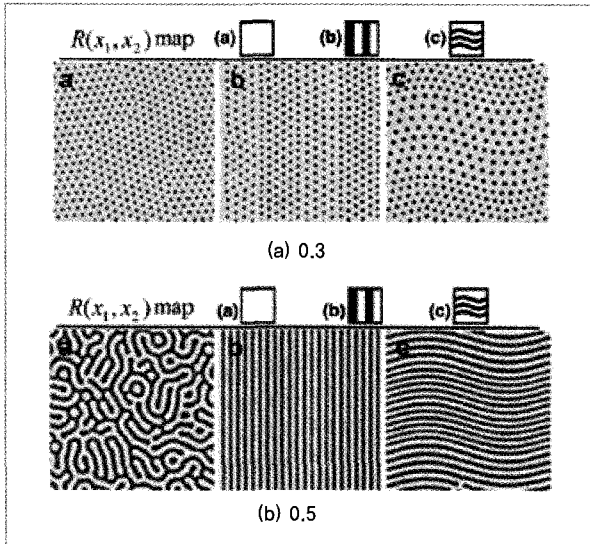


그림 3 평균농도

해 자기조립 과정을 컨트롤하여 원하는 패턴을 얻을 수 있는 가능성을 제시한다.

**탄성장을 이용한 나노구조물의 자기조립 공정**

기판에 가해진 탄성장은 이성분 단층박막(binary monolayer)의 자기조립 과정에 대한 또 다른 접근을 가능케 한다. 기판에 가해진 힘은 기판에 탄성장을 야기하고 기판 표면에 변형장(strain field)을 형성한다. 기판 표면의 균일하지 않은 변형장은 자기조립 과정에서 형성된 패턴의 크기와 모양 그리고 위치에 큰 영향을 끼친다. 그림 3은 특정 시간 후 박막의 다양한 패턴을 보여준다. 무차원화된 변수,  $R(x_1, x_2)$ 는 외부하중의 크기를 나타낸다. 아무런 외력이 없을 시에는 균일한 상크기로 이루어진 대칭의 패턴을 형성하지만 하중에 의해 구성된 기판 표면의 변형장을 통해 패턴의 크기가 특정 위치에서 변화하거나 비대칭 패턴의 유도가 가능하게 된다. 해석을 통해 자기조립 과정에 의해 형성되는

패턴은 변형 구배 방향(strain gradient direction)에 수직한 방향으로 형성되며 적용된 하중은 기판과 연계되어 자기조립된 패턴의 위치를 결정할 수 있음이 밝혀졌다. 이러한 연구는 기판에 외력을 가하여 나노스케일의 다양한 단층박막 패턴을 형성하는 효과적인 방법을 제시한다.

**다상의 에피층에서의 자기조립 현상**

위에서 언급한 이성분의 에피층 모델(binary epilayer model)은 그림 4의 (a)에서 보여주듯이 삼원성분의 에피층 모델(ternary epilayer model)로 확장될 수 있다.  $C_1$ 과  $C_2$ 는 각각 구성성분 A와 B의 원자비율(atomic fraction)이다. 자유에너지(free energy)는 상분리를 야기하며 상의 경계 에너지(phase boundary energy)는 상들의 성장을 유도하고 표면 응력은 상들을 조밀하게 한다. 그림 4의 (b)와 (c)는  $C_1$ 과  $C_2$ 의 각각의 시뮬레이션 결과를 보여준다. (d)와 (e)는 박스 바깥 부분에서  $C_1$ 과  $C_2$ 에 할당된 평형 농도 값에 의해 형성된 pre-pattern을 통한 구속을 고려한 결과이다. 이러한 시뮬레이션은 삼원성분 에피층의 자기조립 과정을 구체적으로 설명한다. 이는 또한 제 3의 성분을 이용한 나노스케일의 자기조립 과정의 컨트롤 가능성을 제시한다.

**정전기장을 이용한 박막 필름의 자기조립 현상**

최근 실험을 통해 폴리머 박막에 정전기장을 가했을 때 박막 표면의 안정성을 유지하지 못하고 박막 표면으로부터 균일한 크기의 기둥들이 형성되는 것이 확인되었다. 이러한 현상을 해석하기 위해 프로세스를 유도하는 메커니즘인 확산(diffusion), 점성 유동(viscous flow) 그리고 유전효과(dielectric effect)를 모두 고려한 3차원 동적모델이 개발되었다. 그림 5는 모델의 개략

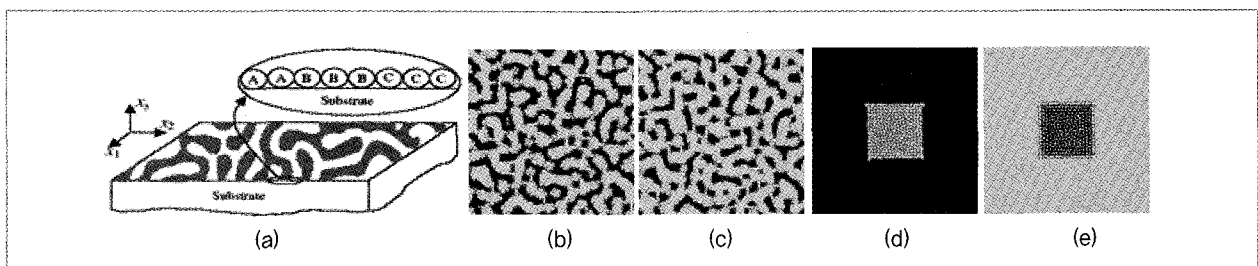


그림 4 (a) 모델의 개략도. 평균농도는 (b)  $C_1=0.4$  (c)  $C_2=0.35$  (d)  $C_1=0.35$  (e)  $C_2=0.35$

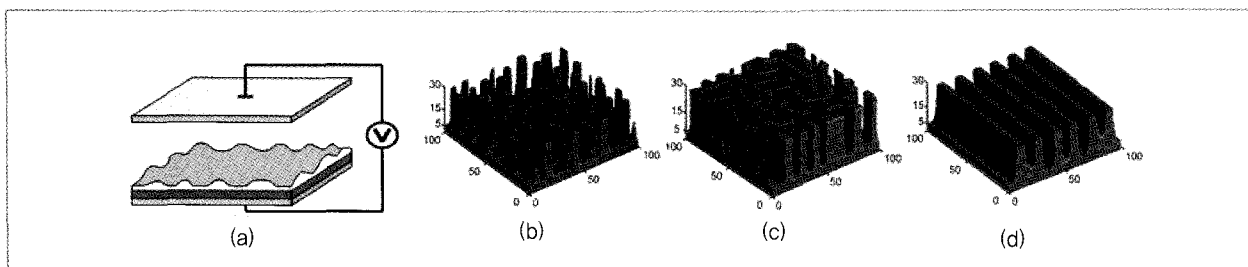


그림 5 (a) 모델의 개략도. 평균농도는 (b) 5.5 (c) 10.5 (d) 10.5.

도와 특정시간 후의 해석 결과를 보여준다. 기판과 박막 사이의 경계에너지에 의한 동적 구속은 기둥형태의 구조적 동일성에 있어 중요한 역할을 한다. 또한 필름의 두께는 기둥의 크기를 결정하는 과정에 있어 큰 영향을 주지 않지만 기둥 사이의 거리나 기둥의 성장률에 있어서는 중요한 영향을 미친다. 그림 5의 (d)는 6개의 특정 형태로 디자인된 전극을 이용한 경우의 시뮬레이션 결과를 보여주며 전극의 형태를 따라 배열된 원형이 아닌 줄무늬 형태의 기둥을 확인할 수 있다. 이러한 연구는 특정 전기장을 제작함으로써 폴리머 박막의 자기조립 과정을 효과적으로 컨트롤하여 구조적 형태를 설계할 수 있는 가능성을 제시한다.

### 맺음말

현재까지 자기조립현상은 나노스케일의 전자 디바이스, 메모리, 광학 디바이스와 같은 초소형 디바이스 제작을 위한 새로운 미세공정 기술로서 연구되어왔고 가시화된 결과물도 제시되었다. 그러나 이들 중 대부분은 단순히 연구실에 한정된 연구 주제로서의 역할이 컸

던 것이 사실이다. 자기조립현상의 활용과 관련한 현재 문제점들의 해결은 결국 단순한 연구소에 한정된 연구 주제로서의 역할에서 벗어나 실제로 활용 가능한 기술로의 발전을 이끌 것이다. 이를 보다 효과적으로 가능케 하기 위해 미세 스케일에서의 구체적인 메커니즘을 체계화하여 물리적 분석 능력을 향상시킬 필요가 있다. 이를 성취하기 위해서는 실험적인 접근만으로는 불가능하며 반드시 전산적인 접근(computational approach) 방법이 동반되어야 한다. 특히 매우 정밀하게 제어된 모델링 기술을 필요로 하고 있다. 다양한 메커니즘을 유기적으로 고려하는 다중물리모델(multi-physics model) 개발뿐만 아니라, 나노구조물의 모델링에 있어 원자 스케일에서 메조스케일(mesosopic) 혹은 매크로스케일(macrosopic)을 넘나드는 다중스케일 모델링과 같은 기법 개발은 자기조립현상을 이용한 나노구조물에 관한 과학기술의 거대한 잠재력을 자각하는 데 있어 절대적으로 필요하다 할 수 있다. 이를 위한 광범위한 학제적 참여를 기대하고 있으며 자기조립 현상이 미래 미세공정에 있어 매우 중요한 접근법이 될 것을 믿어 의심치 않는다.

### 기계용어해설

#### 스칼롭(Scallop)

용적이음이 한 곳에 집중되거나 근접하면 용접에 의한 잔류응력이 커지거나 용접속이 여러 번 용접열을 받게 되어 열화하는 것을 막기 위하여 용접선이 교차하지 않도록 설계하는 부채꼴 노치.

#### 주사(Scanning; 走査)

영상신호를 만들거나 영상신호를 재현시킬 경우에 전자 빔에 의하여 생기는 광점이 상 위를 좌우로 주행하면서 위에서 아래로 이동해 가는 것.