

나노리소그래피 (Nanolithography)

한국에너지기술연구원

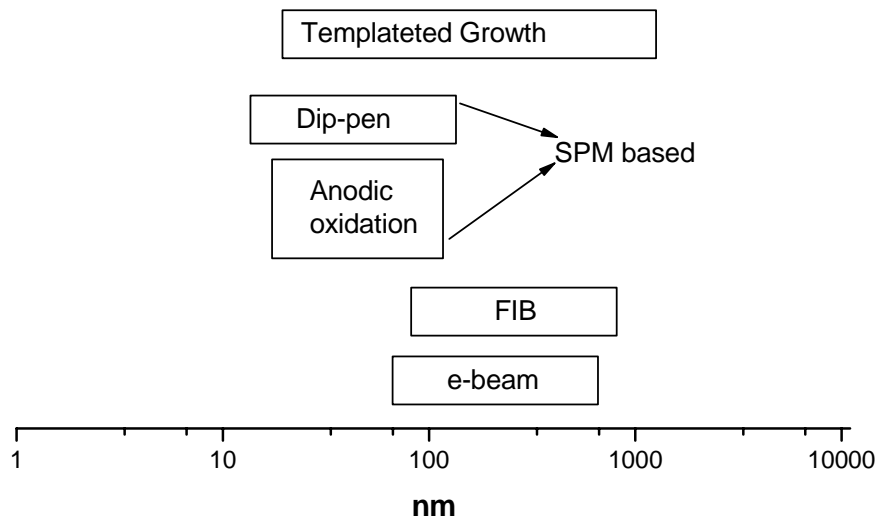
이승재

Nanolithography and nanomanipulation [1]

“리소그래피 (lithography)”라는 말은 일반적으로 마이크로 전자학에서 Si나 GaAs와 같은 반도체 기판에 구조물을 형성하기 위해 사용되고 있다. 그러나 이 같은 리소그래피의 정의는 top-down 방식의 접근법에 의한 것으로 나노 구조물의 제작에 있어서는 bottom-up 방식을 통한 나노 구조물이나 나노 구조물이 배열된 형태를 합성할 수 있는 범위까지 정의의 폭을 보다 확대할 필요가 있다. 이러한 리소그래피의 방식에서는 성장 공정을 거치거나 성장이 수나 노미터에서 수십 나노미터로 제한되어 일어나도록 함으로써 패턴을 생성한다. 또한 나노리소그래피는 기존의 리소그래피에서와 같이 건식이나 습식 식각을 위해 마스크를 사용한다. 나노 스케일에서 다루어지는 조작법(nanomanipulation)들은 나노리소그래피와 깊은 관계가 있다. 이를 통해 나노 크기의 입자나 튜브, 와이어 등을 배열하고 조작할 수 있게 된다.

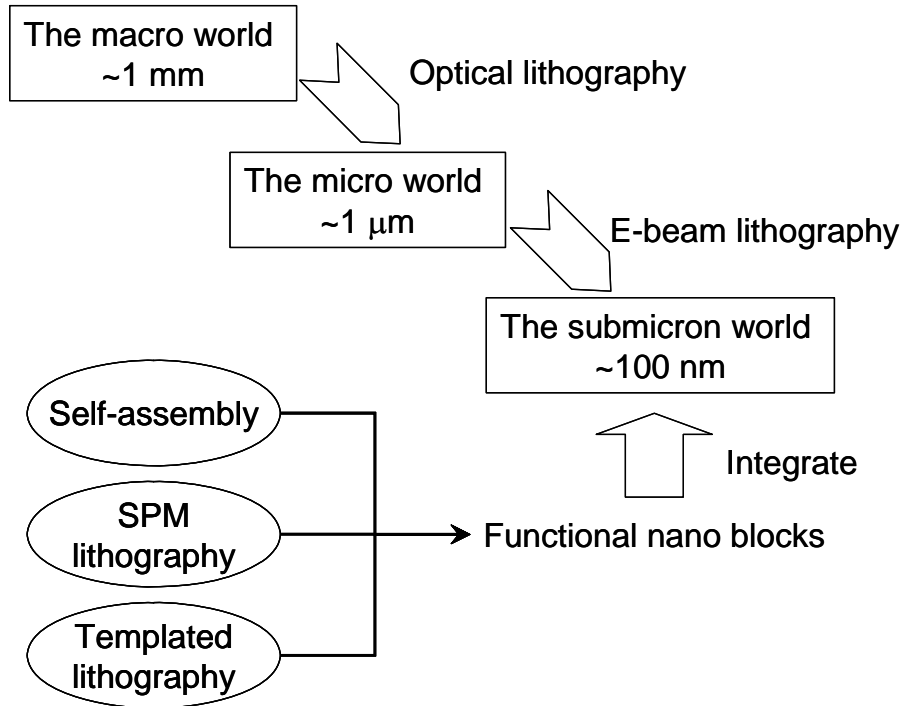
지난 5년간 나노리소그래피 분야는 광범위하게 성장하여, 나노제조의 분야에서 혁신적인 응용성을 나타내고 있다. 나노리소그래피의 분야는 마이크로리소그래피가 멈춘 스케일에서 시작된다. 새로운 나노리소그래피 분야를 올바르게 이해하기 위해서는 마이크로리소그래피 분야에 대한 약간의 지식이 필요하다.

아래의 그림은 나노리소그래피 방법에 따른 나노 스케일의 영역을 간단히 나타내고 있다. 비교를 위해서 40-50 nm크기의 제작을 위해 보편적으로 많이 사용되는 전자빔 리소그래피와 집속이온빔 (FIB) 리소그래피의 두가지 방법이 포함된다. 나노리소그래피와 나노 스케일에서의 조작법들은 각 기술의 효과를 증가시키기 위해 적절히 결합되어 사용되어야 한다.



[그림 1] 나노리소그래피의 영역

원칙적으로 나노 스케일에서의 조작법들은 자기조립의 힘이나 다른 화학적 힘을 사용하는 조작법과 광학적 집계를 이용하는 조작법을 모두 포함해야 한다. 그러나 종종 “나노 스케일에서의 조작법 (nanomanipulation)”은 나노 물질을 조작하기 위한 SPM (scanning probe microscopy) 팁이 사용되는 경우로 제한된다.



[그림 2] The lithographic steps for nanodevice fabrication

광과 전자빔 리소그래피의 결합으로 매크로 세계 (~mm)에서 수십-수백 나노 미터의 스케일까지 내려갈 수 있게 되었다. 나노리소그래피에 의해 제조된 100 nm 이하 스케일의 물질이 전자빔에 의해 생성된 전극에 접촉되도록 조작할 수 있다. 나노리소그래피와 나노 스케일에서의 조작법들을 이용하면, 단순히 나노 구조물을 만들 뿐만 아니라 기존에 존재하는 리소그래피 기술들을 이용하여 측정장치나 유용한 장치들을 만들 수 있다. 한 예로 서로 다른 수준의 리소그래피를 이용하여 여러 스케일의 구조를 형성할 수 있다. 전자빔을 이용하여 500 nm 폭의 선에 100 nm의 틈을 형성함으로써 나노 입자와 나노 와이어가 틈에 위치하도록 조작하여 전극을 형성할 수 있다. 나노리소그래피와 나노 스케일에서의 조작법들은 광학과 전자빔 리소그래피의 세계를 연결할 수 있는 기초적인 기술들이 될 수 있다.

나노유체 구조를 위한 리소그래피 [2]

임의의 패턴을 가지는 평판위에 박막을 형성하기 위해서는 대개 광리소그래피가 이용된다. 여기에서는 빛에 민감한 고분자 층위에 반투명의 마스크를 이용하여 이미지화한다. 전체

조건으로 리소그래피 장치의 해상도 (R) 값이 생성될 패턴의 최소 크기 값과 같거나 커야 한다. 해상도는 두개의 구별 가능한 형태사이의 최소 거리로 정의 되며, 노출시 사용되는 파장 (λ)로부터 계산될 수 있다.

$$R = k \frac{\lambda}{NA}$$

여기서 k는 공정 변수로 설명되는 경험적 계수로 일반적으로 0.4-1의 값을 가진다. 그리고 NA는 광학 시스템의 렌즈 구경이다. 그 결과 패턴의 해상도를 높이기 위해서는 짧은 파장의 광원이 필요하다. 365 nm의 자외선 (UV) 램프가 대부분의 실험실에서 사용되고 있지만, 193 nm에서의 ArF 엑시머 레이저가 산업 생산용 리소그래피 장치로 이미 사용되고 있다. 반사 광학 시스템을 이용하여 13 nm 이하의 최첨단 UV 리소그래피가 벌써 개발 중에 있다. 게다가 광학 근접 보정 (optical proximity correction)과 진보된 상전이 마스크 등은 정확히 계산된 회절과 반사 효과로 인하여, 193 nm용 장치를 이용하여 65 nm 아래의 리소그래피 해상도를 얻을 수 있도록 한다.

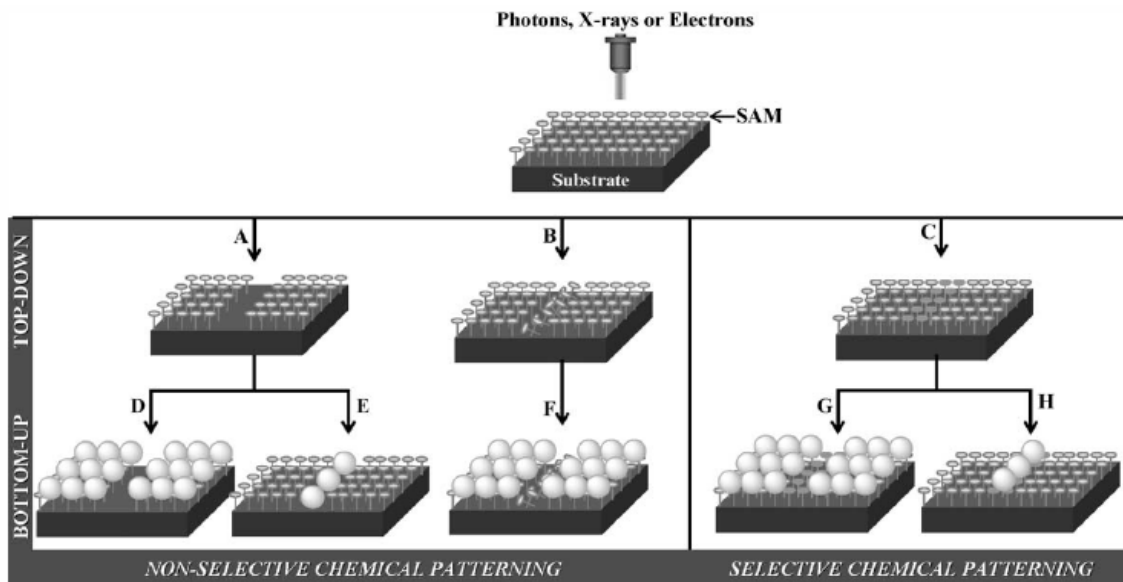
그러나 마스크를 만드는 비용 때문에 대부분의 실험실에서 사용하기 어려워, 투사 리소그래피 (projection lithography)는 나노미터의 구조물을 만드는데 많이 쓰이지 않는다. 다른 방법으로 직접 쓰기 기술 (direct writing techniques)을 이용하면, 광학 마스크의 필요 없이도 광경화성 수지가 코팅된 기판에 나노 패턴을 형성할 수 있다. 순차적인 쓰기 공정이 느림에도 불구하고, 전환 시간이 빨라 연구용으로 사용하기에 이점이 있다. 기존의 리소그래피에서는 광자를 이용하는 반면, 직접 쓰기에 이용되는 입자 빔 리소그래피에서는 하전된 입자의 높은 에너지를 이용하여 광경화성 수지에 패턴을 형성한다. UV 리소그래피용 크롬 마스크에 폭넓게 사용되는 전자와 이온 빔 패턴 생성 장치를 이용하면, 전자빔을 10 nm 정도의 작은 점으로 초점을 맞출 수 있다. 이러한 장치들은 리소그래피를 위해 훌륭한 도구들이 될 수 있으며, 나노 유체 시스템을 제작하는데 폭넓게 응용될 수 있다.

특정 응용을 위해서는, scanning tunneling microscope을 이용하여 국소의 표면을 조절하는 나노리소그래피나 주기적인 형태의 패턴을 형성하기 위한 레이저 간섭 리소그래피 등의 수많은 부가적인 리소그래피 기술이 이용될 수 있다.

Lithographic radiative technique for patterning SAMs (self-assembled monolayers) [3]

초고해상도의 패턴을 얻기 위해서는 나노미터의 해상도를 가지는 리소그래피 기술 이외에도 물리적/화학적 성질을 조절할 수 있는 물질이 필요하다. 예를 들어, 형태의 크기들이 마이크로 미터 이하의 수준으로 내려감에 따라 기존의 고분자 박막 형태의 광경화성 수지 시스템에 대한 해상 능력이 크게 요구되고 있다. 따라서 새로운 수지 시스템에 대한 개발이 필요하다.

이런 요구에 따라, 유기 초박막 형태의 자기조립된 단분자층 (SAMs)을 이용하여 상당히 다양한 기판에 고해상도의 패턴을 형성할 수 있다. SAMs는 기판에 대해 특정 친화력을 지니는 그룹을 가지는 유화제를 이용하여 순간적으로 형성되는 분자층이다. 초박막 수지로서의 이들 시스템은 초점 거리를 제거하고 투과성을 높이며, 나노스케일 물질의 부착력을 높이기 위해 여러 형태의 화학적 기능성 그룹을 만들 수 있는 장점이 있다. SAMs를 패턴화하는 데는 1) soft lithography, 2) scanning probe microscopy (SPM)-based techniques, 3) lithographic radiative techniques 등이 있다. [그림 3]은 radiative source를 이용한 리소그래피 기술에 의한 비선택적, 선택적 화학 패턴화 기술에 대한 개략도이다. 공정 A에 나타난 ‘비선택적 화학 패턴화 (non-selective chemical patterning)’는 SAMs의 일부가 제거되는 공정이며, radiative sources의 조사에 따라 새로운 화학적 기능성 그룹의 형성 없이 가교되거나 손상을 입는 공정이 공정 B에 해당한다. 한편 ‘선택적 화학 패턴화 (selective chemical patterning)’공정에서는 막은 그대로 유지된 채로 원래의 SAMs가 가지고 있는 물리적/화학적 성질과는 판이하게 다른 형태의 내부적/말단의 기능성 그룹이 변화된다 (공정 C). 이러한 시스템들은 부차적으로 템플레이트로 사용되어 3차원의 나노 구조를 가지는 표면을 형성하는데 사용될 수 있다. 이 과정에서 공정 E와 H에서처럼 radiative sources가 조사된 부위에 나노 스케일의 물질들이 형성될 수도 있으며, 공정 D, F, G에서와 같이 radiative sources가 조사되지 않은 영역에 나노 스케일의 물질들이 형성될 수도 있다.



[그림 3] Schematic diagram illustrating a non-selective or selective chemical patterning by either UV/visible, X-rays, or e-beam irradiation.

참고문헌

- [1] A.K. Raychaudhuri, *Nanolithography and Nanomanipulation* in “The Chemistry of Nanomaterials Vol.2” eds. C.N.R. Rao, A. Müller and A.K. Cheetham, Germany, Wiley-VCH, 2004.
- [2] J. Lichtengberg and H. Baltes, *Nanofluidics-Structures and Devices* in “Enabling Technology for MEMS and Nanodevices” eds. Baltes, Brand, Fedder, Hierold, Korvink and Tabata, Germany, Wiley-VCH, 2004.
- [3] P.M. Mendes and J.A. Preece, *Precision chemical engineering: integrating nanolithography and nanoassembly*, *Current Opinion in Colloid & Interface Science* 9 (2004) 236-248.