

전자빔 리소그래피 기반 3차원 나노구조 및 하이브리드 2차원 나노구조 가공

김 인 기 포항공과대학교 기계공학과 석박사 통합과정 | e-mail : inki93@postech.ac.kr
 노 준 석 포항공과대학교 기계공학과/화학공학과 조교수 | e-mail : jsrho@postech.ac.kr

이 글에서는 전자빔 리소그래피 오버레이 공정과 이를 이용해 제작된 3차원 나노구조 및 하이브리드 2차원 나노구조에 대해서 소개하고자 한다.

고에너지 전자빔 리소그래피의 응용

다양한 나노구조와 관련된 연구들, 나노재료, 나노광학, 에너지 기술 등이 발전됨에 따라 좀더 정교하고 복잡한 형상의 나노구조를 제작하고자 하는 필요들이 생겨났고, 더 나아가 이러한 나노구조를 대면적으로 제작하고자 하는 연구들도 계속 진행되고 있다. 이러한 연구들은 나노생산공학(Nanoscale Manufacturing)이라는 새로운 연구 분야로 명명되기도 한다. 나노생산공학에서는 전자빔, 이온빔, 고출력 레이저빔을 아우르는 고에너지 빔을 이용한 나노공정기술과 미세 구조 패턴을 기계적 방식으로 전사하는 나노임프린트 공정 및 롤투롤 나노공정기술이 많은 관심을 받고 있다. 이 글에서는 이러한 나노공정기술 가운데 고에너지 전자빔을 이용한 초정밀 전자빔 리소그래피 기술과 이를 통해 제작된 3차원 나노구조 및 2차원 하이브리드 나노구조에 대해서 소개하고자 한다.

전자빔 리소그래피는 고에너지 전자빔을 집속하여 원하는 기관 위에 디자인 된 미세한 나노구조 패턴을 직접 그리는 방식으로 패턴닝을 진행하게 된다. 전자빔 리소그래피의 최소 분해능은 빔의 가속 전압과 전류 등에 의해 결정되게 되는데, 100kV의 가속 전압을

가지는 전자빔 리소그래피의 경우 10nm 크기의 선 폭을 정교하게 그릴 수 있게 된다. 또한 CAD로 디자인 된 나노구조 패턴을 그대로 그리기 때문에, 복잡한 2차원의 나노구조 형상도 전자빔 리소그래피를 통해 만들 수 있게 된다. 이러한 장점 때문에 전자빔 리소그래피를 이용한 2차원 나노구조 패턴닝을 이용한 연구들이 매우 많이 진행되어 왔고, 그 가운데 많은 연구자들이 관심이 있는 메타물질 분야에서 전자빔 리소그래피의 활약은 두드러지고 있다.

메타물질이란 인공적으로 제작된 원자들로 이루어진 물질로 자연계에서 나타나지 않는 특이한 광학적 특징을 나타내는 물질을 의미한다. 메타물질은 우리가 통상 알고 있는 자연계에 존재하고 있는 물질과 동일하게 원자(메타원자)들로 구성되고, 이러한 원자는 메타물질이 작동하는 파장보다 매우 작은 크기로 되어 있다. 메타원자를 잘 디자인하게 된다면 자연계에서는 얻을 수 없는 특이한 광학적인 특성들을 얻을 수 있게 된다. 일례로 음수의 굴절률을 갖는 음굴절 물질(Negative Index Materials) (*Phys. Rev. Lett.* **85**, 3966, 2010), 공상과학 영화에서만 다루어졌던 투명망토(Invisibility Cloaking) (*Science* **349**, 1310, 2015), 빛의 회절 한계를 넘어서는 초고분해능 이미징(Super-resolution Imaging) (*Science* **308**, 534,

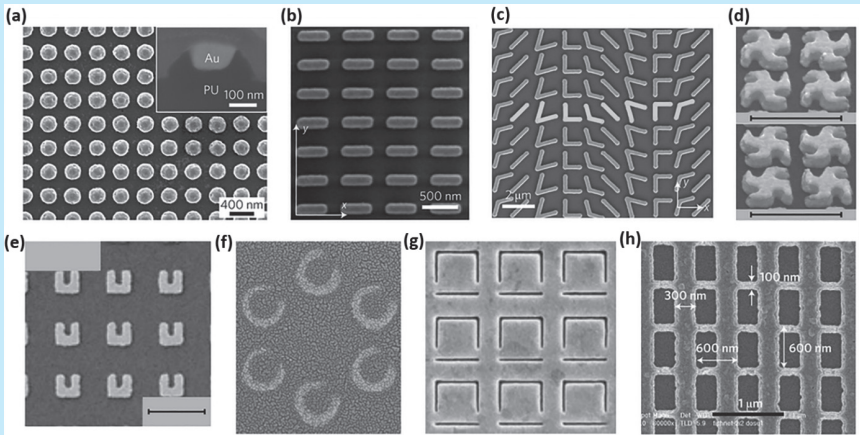


그림 1 2차원 메타표면 예시: (a) 형판 뜯어내기(Template stripping) 방식으로 제작된 나노 디스크; (b) 나노임프린트 방식으로 제작된 나노 막대기; (c) 전자빔 리소그래피로 제작된 서로 다른 V-모양 나노 안테나; (d) 전자빔 리소그래피로 제작된 감마 모양의 손대칭성 메타원자, 스케일 바는 500nm를 나타냄; (e) 전자빔 리소그래피로 제작된 U-모양 나노공진기, 스케일 바는 500nm를 나타냄; (f) 전자빔 리소그래피로 제작된 링 모양의 나노 공진기; (g) 집속 이온빔 밀링으로 제작된 나노 공진기; (h) 나노임프린트로 제작된 그물망 구조의 메타표면. (*Nat. Photonics* 8, 889, 2014)

3차원 메타물질

위의 단점들을 극복하고자 3차원 메타물질을 구현하고자 하는 연구들이 진행되고 있다. 본 연구팀에서는 초정밀 전자빔 리소그래피 오버레이 공정을 이용해 3차원 메타물질을 구현하고자 하고 있다. 전자빔 리소그래피 오버레이 공정에 대한 기본적인 원리는 각 층을 레고 블록처럼 정교하게 쌓아가는 것으로서, 기존의 나노 공정으로는 제작할 수 없었던 복잡한 형태의 3차원 나노구조도 정교하게 제작할 수 있는 큰 장점을 가지고 있다. 오버레이 공정에서 가장 중요한 것은 정렬

(Alignment) 과정이라고 할 수 있다. 먼저 제작된 나노구조 위에, 다음 만들어질 패턴이 정확하게 정렬한 이후에 노광이 진행되어야만 정교한 3차원 구조를 만들 수 있기 때문이다. 하지만 포토리소그래피 과정에서의 정렬 과정과는 다르게, 전자빔 리소그래피에서 정렬 시에는 전자빔을 통해 먼저 제작된 나노 패턴을 직접 볼 수 없다. 만약 전자빔을 통해 제작된 패턴을 보게 되면 도포되어 있는 전자빔 레지스트가 노광이 되어버리기 때문이다. 따라서 전자빔 리소그래피에서 정렬을 하려면 패턴이 있는 영역에서 멀리 떨어진 곳에 정렬 마크를 만들고 전자빔 리소그래피 시스템에서 보여지는 가상의 정렬 마크와 실제 제작된 정렬 마크를 일치시키는 방식으로 진행되게 된다. 정렬의 정교함은 정렬 마크의 정교함에 따라 결정되기 때문에, 적절한 정렬 마크를 디자인하고 제작하는 것이 중요하다.

2005) 등의 기술이 개발되어 왔다. 이러한 메타물질 중에 광 주파수 영역(자외선~근적외선 영역)에서 작동하는 메타물질은 광학 메타물질이라 하는데, 광학 메타물질을 제작하기 위해서는 메타원자의 크기가 나노미터 크기이기 때문에 나노 공정이 반드시 필요하다. 현재까지의 광학 메타물질은 주로 전자빔 리소그래피를 이용해 2차원 형태로 많이 제작되어 왔다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 다양한 모양과 크기를 가진 메타원자들이 매우 얇은 형태로 정교하게 2차원 평면상에 배열되어 있는데, 우리는 특별히 이러한 메타물질을 “메타표면” (*Nat. Mater.* 13, 139, 2014)이라고 부른다. 메타표면에 대한 많은 연구들이 보고되고 있지만 메타표면의 구조적인 문제 때문에 발생하는 여러 문제점 또한 함께 존재하고 있다. 예를 들면, 편광 상태나 빛의 입사각도 등에 따라 광학적 특성이 바뀌기도 하고 메타원자의 공명현상을 이용하기에 좁은 대역폭을 갖는 단점이 있다.

본 연구팀에서는 특수 정렬 마크를 디자인하고 오버레이 공정을 최적화하여서 20nm 미만의 정렬 오

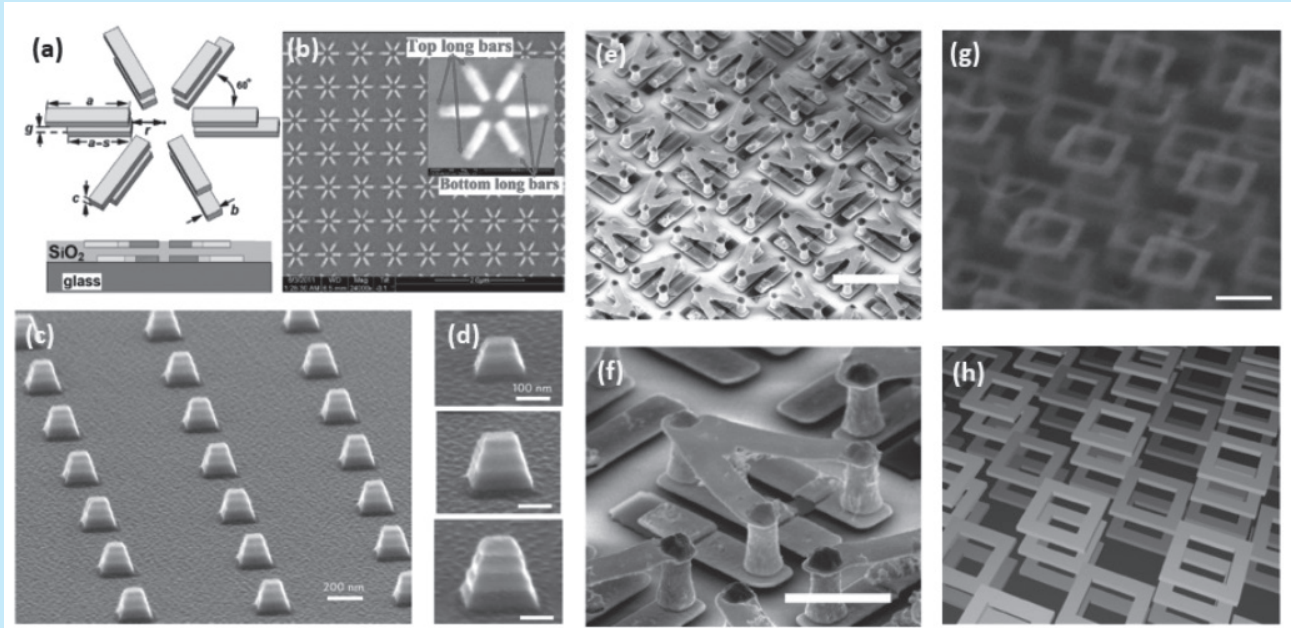


그림 2 3차원 메타물질 예시: (a), (b) 대칭이 깨져 있는 두 개의 나노 막대기로 구성된, 도넛 모양의 쌍극자 모멘트를 만들어내는 3차원 메타물질(Apl. Phys. Lett. 101, 144105, 2012); (c), (d) 은과 게르마늄의 반복된 적층 구조로 만들어진 피라미드 모양의 3차원 나노 공진기(Nat. Photonics 6, 450, 2012); (e), (f) 테라헤르츠파 영역에서 작동하는 광-유도 손대칭성 스위칭 메타물질. 스케일 바는 10 μ m를 나타냄(Nat. Commun. 3, 942, 2012); (g), (h) 조금씩 어긋난 형태로 쌓여 있는 사각형 링 모양으로 구성된 음굴절 메타물질. 스케일 바는 250nm를 나타냄. (Nat. Commun. 3, 1180, 2012)

차를 갖고 75% 이상의 재현성을 구현하는 초정밀 전자빔 리소그래피 오버레이 공정을 구현하였고, 이를 이용해 다양한 3차원 메타물질을 제작해왔다. 그림 2에서 보여지는 3차원 나노구조들은 본 연구팀 주도로 제작된 결과들이다. 3차원 나노구조는 2가지 정도로 다시 세분화 할 수 있는데, 그 중 한 가지는 2차원 층들을 겹겹이 쌓는 형태로 3차원 구조를 형성하는 방법(비연결형 나노구조)이고 다른 한 가지는 3차원 형태를 가지는 메타원자를 직접 제작하는 방법(연결형 나노구조)이 있다. 그림 2에 (a), (b), (g), (h)가 비연결형 나노구조의 예시이고, (c), (d), (e), (f)가 연결형 나노구조의 예라고 할 수 있다.

(a), (b)는 광 주파수에서 도넛 모양의 쌍극자 모멘트를 만들어내는 3차원 메타물질이고, (c), (d)는 쌍곡선 메타물질의 원리를 이용한 은과 게르마늄의 적층구조로 이루어진 피라미드 모양의 3차원 나노 공진

기이다. (e), (f)는 가열 빔(Pump beam) 유무에 따라 물질의 손대칭성이 바뀌는 손대칭성 스위칭 메타물질이고, (g), (h)는 사각형 링 모양의 층들로 이루어진 메타물질로 공명현상을 이용하지 않는 저손실, 큰 대역폭을 가지는 음굴절 물질이다.

비전통적 2차원 메타물질

3차원 메타물질에 대한 관심과 더불어, 비전통적 2차원 메타물질에 대한 관심 또한 높은 상황이다. 비전통적 2차원 메타물질로는 2개 이상의 물질로 이루어진 하이브리드 나노안테나구조와 평면이 아닌 3차원 곡면 구조 위에 만들어지는 나노안테나구조 등이 있다. 하이브리드 나노안테나구조는 기존의 단일 물질 나노안테나구조에서는 볼 수 없던 현상들을 연구하는데 중요한 기반이 된다. 예를 들면, 바이오물질 센

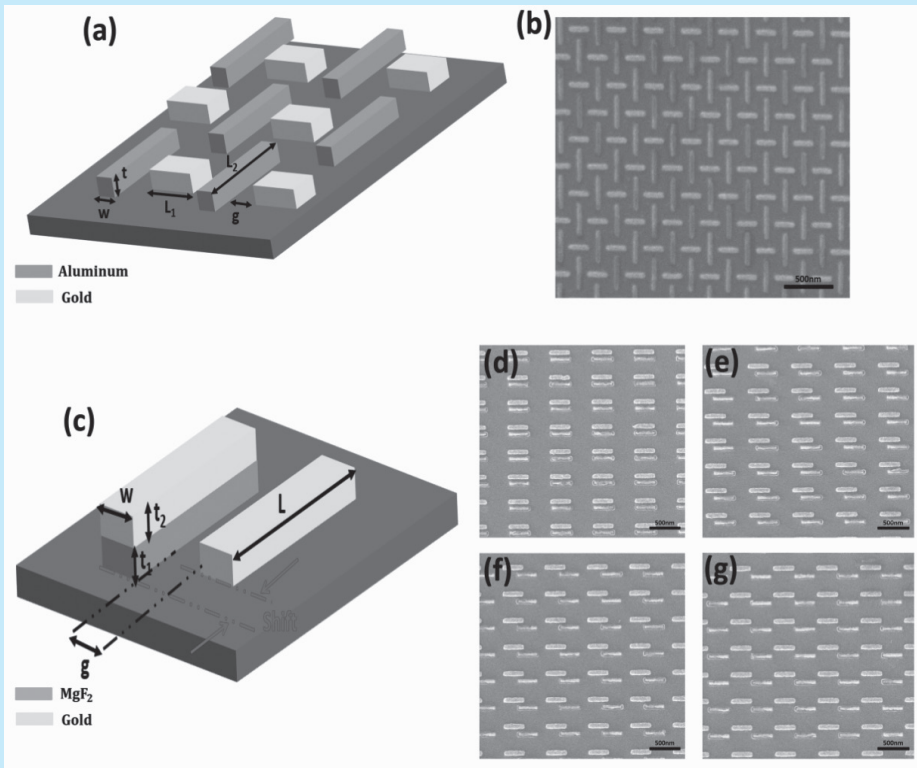


그림 3 2차원 하이브리드 나노안테나 예시: (a), (b) 골드와 알루미늄으로 이루어진 하이브리드 나노안테나구조. SEM 이미지에서 수평 방향으로 있는 것이 골드 수직 방향으로 있는 것이 알루미늄. $L_1=200\text{nm}$, $L_2=300\text{nm}$, $w=50\text{nm}$, $t=30\text{nm}$, $g=50\text{nm}$; (c)-(g) 서로 높이가 다른 2개의 나노안테나의 예시로 한 안테나는 불화마그네슘과 골드의 적층구조로 되어 있고 다른 안테나는 골드만으로 구성. $L=300\text{nm}$, $w=50\text{nm}$, $d=20\text{nm}$, $t_1=65\text{nm}$, $t_2=30\text{nm}$; (d), (e), (f), (g)는 각각 0, 100, 200, 300nm씩 어긋나게 제작된 나노구조. 각 스케일 바는 500nm를 나타냄.

싱, 손대칭성을 지닌 플라즈모닉 현상, 포톤(Photon)-포논(Phonon) 상호작용, 마그네토 플라즈모닉 현상들은 하이브리드 나노안테나구조에서 나타나는 특이한 현상들이다. 이러한 연구들을 위해 정교하게 2차원 하이브리드 메타물질을 제작할 수 있는 필요가 증대되고 있는 상황에서, 전자빔 리소그래피 오버레이 기술은 유용한 접근이 될 수 있다. 그림 3에는 2차원 하이브리드 나노안테나구조의 예시들이 나와 있다. 먼저 (a)와 (b)는 골드 나노안테나와 알루미늄 나노안테나가 서로 일정한 간격을 갖고 수직형태로 가공된 구조이다. (c)-(g)의 구조는 두 가지 이상

의 물질을 사용해 서로 높이가 다른 나노안테나 구조를 만든 예시이다. 오버레이 공정의 정확성을 보이기 위해 두 나노안테나를 각각 0, 100, 200, 300nm 만큼 어긋나게 제작하였고 (d)-(g)에서 보여지는 이미지가 그 구조이다.

그림 4에 나와 있는 예시는, 곡면에 제작된 비전통적 2차원 나노구조의 예시이다. 2차원 메타표면을 이용해 투명망토 효과를 처음으로 보인 연구로, 집속 이온빔 밀링(Focused Ion Beam milling)으로 가공된 3차원 곡면 위에 골드 나노안테나구조를 제작해서 만든 결과이다(Science 349, 1310, 2015). 3차원 곡면 각 부분마다 배

열되는 나노안테나의 모양(길기와 틀어진 각도)이 다르기 때문에, 3차원 곡면의 위치와 모양을 원자력 현미경(Atomic Force Microscopy)으로 인식한 뒤에 오버레이 공정을 이용해 정확하게 곡면의 위치와 나노안테나 패턴이 노광 될 부분을 정확히 정렬시켜야 한다. 그림 (a)에 나타난 것이 FIB로 제작된 곡면을 AFM으로 찍은 이미지이고, (b)에 보여지는 이미지가 그 곡면 위에 제작된 나노안테나구조들이다. (c), (d)에 보여지는 이미지는 투명망토 작동할 때의 예시로, 광학 현미경으로 관찰하면 곡면 부분들이 마치 아무 것도 없는 평평한 면처럼 보이게 된다. (e), (f)는 동일

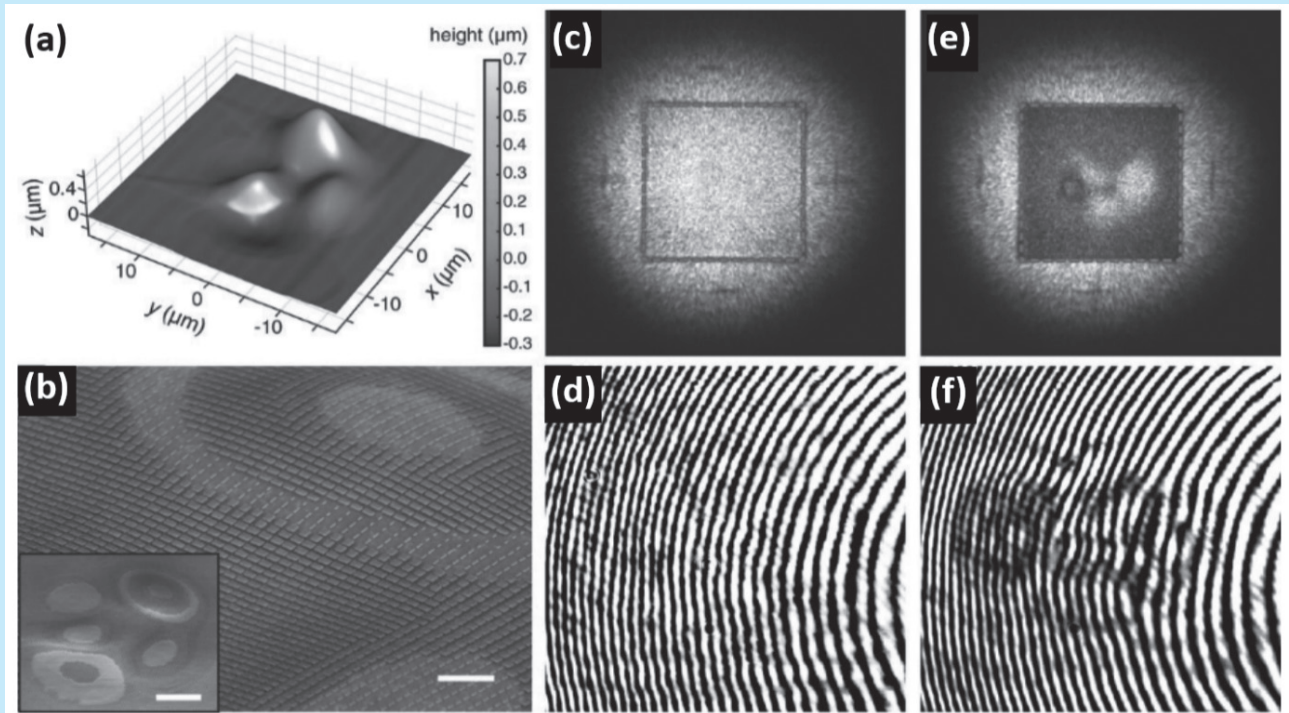


그림 4 곡면에 제작된 비전통적 2차원 나노안테나 예시: (a) FIB로 만들어진 3차원 곡면을 AFM으로 찍은 이미지; (b) 3차원 곡면 위에 정교하게 제작된 2차원 나노안테나 SEM 이미지. 스케일 바는 1 μ m를 나타냄. 왼쪽 아래 이미지는 확대된 이미지로 스케일 바는 5 μ m를 나타냄; (c) 투명망토가 작동할 때 광학 현미경으로 관찰한 곡면 이미지. 곡면이 마치 아무것도 없는 평면처럼 관찰됨; (e) 투명망토가 작동하지 않을 때의 광학 현미경으로 관찰한 곡면 이미지. 곡면의 높고 낮음에 따른 밝기 차이 관찰; (d), (f)는 각각 투명망토가 작동할 때와 하지 않을 때의 간섭 이미지로, 투명망토가 작동할 때는 위상 정보 또한 마치 평면에서 빛이 반사된 것처럼 나타남. (Science 349, 1310, 2015)

한 부분을 투명망토 효과가 없을 때 찍은 광학 현미경 이미지로, 표면의 굴곡이 보이게 된다. 이 글에서는 고에너지 전자빔을 이용한 초정밀 전자빔 리소그래피 오버레이 공정을 통해 제작된 정교한 3차원 나노구조 및 비전통적 2차원 나노구조에 대해 소개하였

다. 소개된 나노구조들은 대부분 메타물질과 플라즈모닉 분야에 적용되고 있는 예들이지만 이 분야에만 한정되지 않고 이외에 다양한 분야에도 적용될 수 있다.