

윤 관 호 포항공과대학교 기계공학과 석박사 통합과정
 노 준 석 포항공과대학교 기계공학과 조교수/화학공학과

| e-mail : faofai@postech.ac.kr
 | e-mail : jsrho@postech.ac.kr

이 글에서는 대표적인 고에너지 입자빔 기반의 나노가공방법 중에 하나인 집속 이온빔 시스템(focused ion beam system)에 대해 소개하고 이의 응용분야 및 앞으로의 발전 가능성에 대해 논의하고자 한다.

집속 이온빔 밀링 시스템은 제조사별로 구체적인 형상에 차이는 있지만 일반적으로 고에너지의 이온빔을 발생시키는 건(gun)과 방출된 이온빔의 크기, 에너지 등을 조절하는 컬럼(column) 그리고 가공하고자 하는 샘플을 고정시켜 움직이거나 기울일 수 있는 스테이지(stage)로 구성된다(그림 1). 건에서 방출되는 이온은 매우 큰 운동에너지를 가지는데 전자보

다수 천 배 무겁기 때문에 전자빔과는 다르게 샘플에 충돌하면 기존에 샘플을 구성하고 있던 원자를 밖으로 튕겨낼 수 있다. 더욱이 이러한 이온빔은 컬럼을 지나면서 수십 나노미터 이하의 크기로 집속시킬 수 있기 때문에 샘플상에서 우리가 원하는 부분에만 이온빔을 조사하여 그 부분에 있던 물질을 제거하는 방식으로 나노미터 수준의 가공을 실현할 수 있다.

집속 이온빔을 통한 가공의 정밀도를 결정하는 가장 중요한 요소는 이온빔을 발생시키는 건이라고 할 수 있다. 그림 2(a)는 상용적으로 사용되는 갈륨 건의 모습을 나타낸다. 뾰족한 텅스텐 팁이 있고 그 위에 갈륨 소스가 붙어있는데 텅스텐 와이어를 통해 전류를 흘려주면 열이 발생하면서 갈륨이 녹아 텅스텐 팁을 타고 흘러서 팁을 감싸는 형태가 된다. 이때 팁과 팁의 아

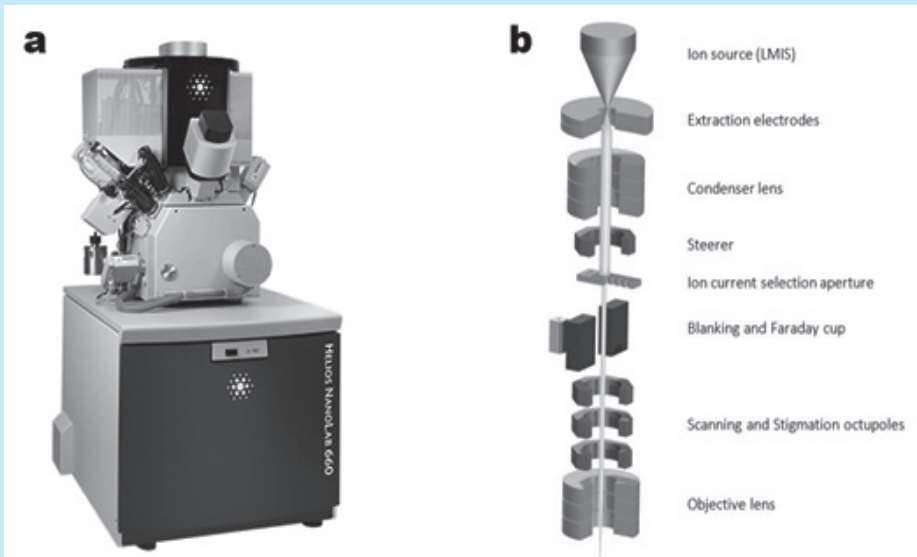


그림 1 (a) 상용 집속 이온빔 밀링 시스템; (b) 집속 이온빔 시스템의 컬럼 내부 모식도[(a) Helios Nanolab 660 Copyright: 2016 FEI Co. LTD; (b) Copyright: 2016 Orsay Physics Co. LTD]

래쪽에 위치한 전극에 강한 전기장을 걸어주면 팁 끝에 모여 있는 액체상태의 갈륨으로부터 결합력이 약해진 갈륨원자들이 전기장에 이끌려 이온의 형태로 방출되는데 이 과정이 연속적으로 일어나기 때문에 이온 빔이 형성된다.[그림 2(b)]

일반적으로 건의 성능은 이온빔의 소스로 사용되는 물질의 종류에 따라 결정된다. 현재 가장 널리 쓰이는 물질은 갈륨인데 갈륨은 녹는 점이 상온 근처에 있기 때문에 전류를 조금만 흘려주어도 쉽게 녹일 수 있다는 장점이 있다. 다른 금속의 경우에는 녹는점이 매우 높기 때문에 녹이는 것이 쉽지 않은데 녹지 않고 고체상태로 있는 경우

원자 간의 결합력이 매우 강하기 때문에 외부에서 아무리 강한 전기장을 걸어주어도 이온을 방출시키는 것은 쉽지 않다. 그럼에도 불구하고 갈륨이 아닌 다른 종류의 금속을 소스로 사용하는 방법도 있는데 그것은 여러 물질들의 합금을 소스로 사용하는 것이다. 적절한 물질들을 사용해 합금을 만들 경우 녹는점을 비교적 낮게 만들 수 있기 때문에 이온빔을 형성하는 것이 가능하다. 하지만 이 경우에는 전기장을 걸었을 때 특정한 물질의 이온을 선택적으로 방출시키는 것이 불가능해서 여러 종류의 이온들이 동시에 방출되게 된다. 물질의 종류에 따라 각각의 이온이 가지는 질량도 다르기 때문에 여러 종류의 이온들이 섞여 있는 이온빔을 수십 나노미터 이하의 사이즈로 균일하게 집

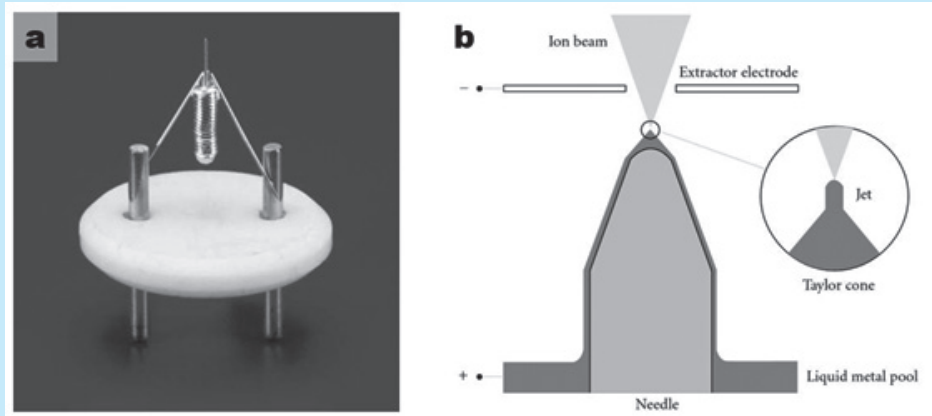


그림 2 (a) 갈륨 LIMS 소스의 모습; (b) 액체상태의 소스로부터 전계방출에 의해 발생하는 이온빔의 모식도(a) L-mion Copyright: 2016 Denka Korea Co. LTD; (b) C. A. Scharlemann & M. Tajmar, presented at CANEUS 2006, Toulouse, France (8, 2006)]

갈륨 소스의 가장 큰 장점은 원자 간의 결합 에너지가 매우 낮기 때문에 전압을 걸었을 때, 소스로부터 이온을 방출시키는 것이 다른 물질들에 비해 매우 쉽다는 것이다

속시키는 것은 매우 힘들다. 이를 해결하기 위해서는 갈륨의 중간에 자기장을 기반으로 하는 질량분석 필터를 추가적으로 설치해야 하는데 모든 비용을 고려했을 때 갈륨을 소스로 사용하는 것이 가장 효율적이기 때문에 현재 거의 모든 집속 이온빔 밀링 시스템이 갈륨을 소스로 사용하고 있다.

이러한 집속 이온빔 밀링 시스템을 사용하면 2차원의 나노 패턴을 넘어 3차원 그물망 구조 및 3차원 깔때기, 3차원 타워 등 임의의 형상을 가진 원하는 형태의 나노구조물을 가공할 수 있다. 나노구조물을 가공하는 방법에는 다양한 종류가 있는데 대표적으로 전자빔 리소그래피의 경우 구조물을 만들기 위해서는 감광막 도포, 전자빔 노광, 물질 증착 등 최소한 다섯 개의 중간 단계를 필요로 한다. 하지만 집속 이온빔 밀링의 경우 감광막과 같은 물질이 필요 없기 때문에 한 번의 공정으로 우리가 원하는 구조를 얻을 수 있어 상대적으로 공정이 수월한데 공정에 필요한 재료의 수와 공정 단계의 수가 줄어들수록 시간과 비용의 측면에서 매우 유리해진다. 뿐만 아니라 3차원 나노구

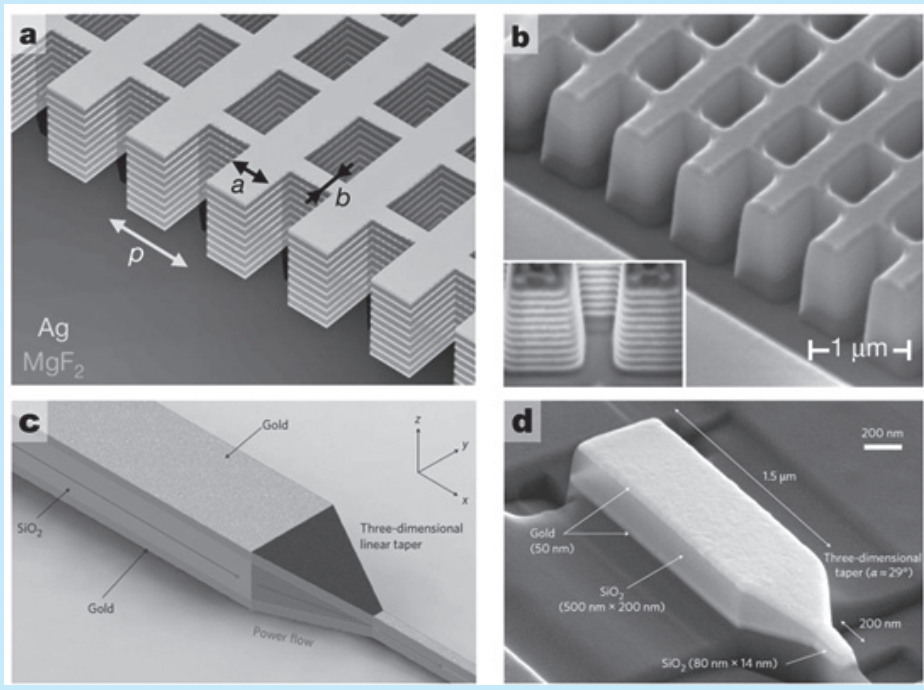


그림 3 집속 이온빔을 이용한 나노구조 예시: (a), (b) 금속, 비금속 그물망 적층구조에 기반한 가시광 영역 음굴절 메타물질과 SEM 이미지; (c), (d) 수평, 수직 테이퍼구조를 이용해 높은 광 집속효율을 보이는 웨이브가이드와 SEM 이미지[(a) J. Valentine et al., Nature, 455, 376–379, 2008; (b) H. Choo et al., Nature Photonics, 6, 838–844, 2012]

조물을 가공하고자 하는 경우에는 집속 이온빔 밀링이 아닌 다른 방법으로는 구현 자체가 불가능한 경우가 많으며, 고에너지 이온빔 밀링의 원리는 이온빔과 시편의 화학적인 작용보다는 단순한 물리적 충돌에 기반하기 때문에 전통적인 식각 공정으로는 가공이 어려운 시편도 가공이 가능해 물질 선택성 측면에서도 큰 장점이 있다.

집속 이온빔 밀링 시스템의 응용분야는 여러 가지가 있지만 대표적으로 메타물질을 꼽을 수 있다. 메타물질이란 기존의 물질이 가지는 광학적 물성을 뛰어넘는 성질을 가지는 물질을 말하는데 이를 구현하기 위해서는 빛의 파장보다 작은 구조물을 규칙적으로 배열하거나 가공해야 한다. 보통 가시광선의 파장이 400nm ~ 800nm 정도이기 때문에 가시광 영역에서 작동하는 메타물질을 구현하기 위해서는 나노구조물을 가공할 수 있는 방법이 반드시 필요하다. 그림

3(a), 3(b)는 집속 이온빔 밀링으로 구현된 3차원 음굴절 메타물질을 보여준다. 음굴절이란 쉽게 말해 굴절률이 음수인 물질을 말하는데 굴절률이 양수인 기존의 물질과는 전혀 다른 광학적 특성을 보여주기 때문에 이를 응용하면 투명망토, 수퍼렌즈 등 공상 과학에나 나올 법한 신기한 과학 현상을 구현할 수 있다. 3차원 음굴절 메타물질의 구조를 살펴보면 그물망 구조를 가진 금속, 비금속 박막이 교대로 적층되어 있는 것을 알 수 있다. 집속 이온빔 밀링이 아닌 전자빔 리소그래피 등 다른 방법으로도 구현이 가능하긴 하지만 매우 어려우며 특히 플루오린화 마그네슘의 경우 건식 식각으로 가공이 어렵기 때문에 에칭을 통해 이러한 구조를 가공하는 것은 불가능하다. 그러나 집속 이온빔으로 가공하는 것은 간단하다. 먼저 시편에 금속, 비금속 박막을 교대로 적층한 후 집속 이온빔을 원하는 곳에 적절히 조사하여 구멍을 뚫으면 끝이다. 앞서 언급했던 것처럼 에칭과 달리 물질 선택의 제약이 없기 때문에 건식 식각이 어려운 플루오린화 마그네슘과 같은 유전체도 가공이 가능하다.

기본적인 밀링 기능 이외에도 가스 주입 시스템 (Gas Injection System)을 이용하면 더욱 다양한 형태의 3차원 나노구조물을 구현할 수 있다(그림 4). 가스 주입 시스템이란 집속 이온빔이 시편에 도달하는 영역 근처에 아주 가는 노즐을 위치시키고 이를 통해

우리가 원하는 물질을 가스 형태로 공급할 수 있는 시스템을 말한다. 고에너지의 집속 이온빔이나 전자빔이 시편과 충돌하면 시편을 구성하는 원자에서 결합력이 약한 전자는 결합을 끊고 시편 밖으로 방출되는데 이를 이차전자라고 부른다. 통상적으로 이차전자는 매우 작은 운동에너지를 가지고 있으며 적절한 형태의 물질

을 가스 주입 시스템을 통해 공급할 경우 이차전자에 의해 가스분자가 분해되면서 일부는 기체형태로 날아가고 일부는 시편에 그대로 증착된다. 다시 말하면 집속 이온빔 시스템으로 시편을 밀링 가공할 수도 있지만 반대로 GIS를 이용해 원하는 물질을 증착시킬 수도 있는 것이다. 주입하는 가스의 종류에 따라 다양한 종류의 금속이나 화합물을 증착할 수 있으며 복잡한 형태의 3차원 나노구조물도 충분히 구현이 가능하다. 그림 3(c), 3(d)는 집속 이온빔 밀링과 가스 주입 시스템을 이용해 제작한 3차원 웨이브가이드의 모습을 나타낸다. 구조를 살펴보면 수평방향의 테이퍼와 수직방향의 테이퍼를 확인할 수 있는데 두 방향의 테이퍼로 인해 기존의 웨이브가이드보다 월등히 높은 광 집속효율을 얻을 수 있다. 이러한 구조를 만드는 데 있어 수평방향의 테이퍼는 밀링을 통해 가공하였고 수직방향의 테이퍼는 가스 주입 시스템을 통해 산화규소 층을 계단처럼 쌓으면서 구현한 것인데 수직방향 테이퍼를 만들기 위해서는 실질적으

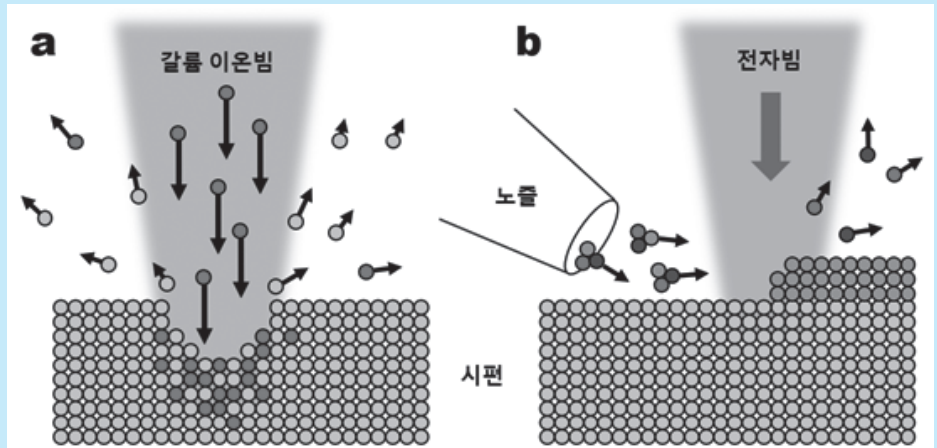


그림 4 집속 이온빔 기반 나노 가공 모식도: (a) 고에너지 가스로 이온빔과 시편의 직접적 충돌에 의한 밀링 프로세스; (b) 추가적인 가스 공급에 의한 증착 프로세스. 전자빔과 시편의 충돌에 의해 발생하는 에너지를 공급받은 기체분자는 시편의 표면에서 반응을 일으켜 원하는 물질이 증착됨

집속 이온빔 시스템을 이용하면 복잡한 형상을 가진 나노미터 단위의 3차원 구조물을 쉽게 가공할 수 있기 때문에 초정밀 3차원 프린터라고 할 수 있다

로 가스 주입 시스템을 통한 계단식 증착이 현재 유일한 방법이다.

집속 이온빔 밀링 시스템이 다른 나노 공정방법에 비해 여러 가지 장점을 가지고 있는 반면 단점도 존재한다. 가장 문제가 되는 것은 가공 시간이 매우 오래 걸린다는 점이다. 반도체 공정에 쓰이는 포토리소그래피의 경우 해상도나 공

정 단계의 수에 있어서 부족한 면이 있지만 마스크를 이용해 대량 생산이 가능하다는 이점 때문에 실용적인 디바이스 제작에 적용될 수 있다. 하지만 집속 이온빔 밀링의 경우 전자빔 리소그래피와 마찬가지로 글씨를 쓰듯이 구조를 만드는 원리에 기반하기 때문에 구조물 가공에 시간이 매우 오래 걸리며 실제 디바이스를 구현하기에는 무리가 있어 연구용이나 단순히 시편의 단면을 관찰하기 위한 현미경의 용도로 많이 사용되고 있다. 이를 해결하기 위해 갈륨보다 원자량이 큰 제논(Xe) 플라즈마 소스를 사용하면 가공효율을 높일 수 있지만 동시에 빔 사이즈가 커져서 가공정밀도가 떨어지는 문제가 있다. 반대로 상대적으로

질량이 가벼운 헬륨(He) 플라즈마 소스를 사용할 경우 기존의 갈륨 소스를 사용할 때에 비해 더 높은 해상도를 가지는 구조를 가공할 수 있지만 시간이 더 오래 걸리는 문제가 있다. 최근에는 이들의 단점을 보완하기 위해 한 챔버에 여러 이온 칼럼을 설치한 제품이 출시되고 있는데 높은 해상도를 요구하지 않는 부분은 가공효율이 좋은 고질량 이온빔을 사용하여 가공 시간을 크게 줄이고 크기가 작은 부분은 헬륨과 같은 저질량 이온빔을 사용하여 예리하게 가공하는 방식을 사용하여 집속 이온빔 시스템의 단점을 훌륭히 보완하고 있다. 또 다른 문제로는 시편의 갈륨 오염문제를 들 수 있다. 고에너지로 가속된 갈륨 이온이 시편

에 충돌하면 시편을 구성하고 있는 원자를 튕겨냄과 동시에 갈륨이 시편 속에 남아 있게 된다. 보통의 경우에 이것은 큰 문제가 되지 않지만 시편을 구성하는 원자의 조성이나 결합이 중요한 파트의 경우에는 디바이스의 성능을 떨어뜨릴 수 있는 요소가 되기 때문에 집속 이온빔을 사용한 것이 적절치 않은 경우가 있다. 이외에도 넓고 깊은 면적을 가공하는 경우에 시편에서 떨어져 나온 원자들이 시편의 다른 부분에 다시 쌓이는 재충착 문제, 이온 충돌 시 발생하는 근접효과(proximity effect)로 인해 구조물의 끝이 뭉툭해지는 현상 등의 문제가 있다.