

건식 식각 가능한 희생층 기반의 기계식 연동 방식을 통한 새로운 나노와이어 전사 방법

¹ 서민호, ² 박상현, ¹ 유재영, ² 임성규, ¹ 윤준보*,
¹ 한국과학기술원 전기및전자공학부, ² 나노융합기술원
 E-mail: mhseo@3dmems.kaist.ac.kr

A Novel Nanowire Transfer Using Dry Removable Sacrificial Layer Based Mechanical Interlocking Structure

¹Min-Ho Seo, ²Sang Hyun Park, ¹Jae-Young Yoo, ²Sung Kyu Lim, ¹Jun-Bo Yoon*
¹School of Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology,
²National NanoFab Center (NNFC)

Abstract

Nanowires on a plastic-sheet are highly sought for diverse flexible/wearable future-electronics, thanks to the drastic performance-enhancement originated from their nanoscale 1-D for-factor. Herein, we report an unprecedented mechanical interlocking nano-transfer method, fabricating ultra-long, fully-aligned nanowires made of diverse materials on a flexible substrate. Using a re-usable nano-grating mater-mold and dry removable sacrificial layer, a precisely controlled undercut was formed in the sacrificial layer under a nanowire. The undercut then forms a mechanical interlocking structure when molded by the plastic material, which facilitates robust and material-independent transfer of the nanowires from the master-mold. Using the developed method, we fabricated fully-aligned and various-material (metal/metal-oxide) nanowires on a cm-scale plastic-sheet.

Keyword - *Nanowire (나노와이어), Nano-fabrication (나노공정기술), Nano-transfer (나노전사), Flexible device (유연소자)*

1. 서론

물질이 나노 수준으로 작고 가벼워지면 특이한 물리적, 화학적 성질을 보이며 (나노효과), 이를 이용하면 매우 우수한 소자를 구현할 수 있다. [1] 특히 나노와이어 (nanowire, NW)는 나노효과가 연속적으로 길이 방향으로 나타나는 재료로써, 크기 조절과 같은 디자인이 용이해 소자에 적용하기 적합한 나노 재료이다. 이에 최근 유연 (Flexible) 전자소자와 같은 분야의 관심이 급증하면서 이의 성능 향상을 위해 나노와이어를 적용하고자 하는 연구가 매우 활발히 진행되고 있다. [2]

대표적으로 나노와이어를 제작하는 방법은 Bottom-up 방법에 기반한 합성법이다. 이는 기상 및 액상의 화학적 합성법을 이용한 제조 방법으로, 다양한 고품질 나노와이어를 제조할 수 있다. 하지만, 물질 선택성이 비교적 좁고, 성장에 따른 기계적 스트레스나 뭉침 현상 때문에 크기 조절의 제약이 크다. 또한 제조된 나노와이어를 기판 위에 정렬하기가 어려워 나노와이어를

활용한 신뢰적 소자의 제작이 매우 어렵다. [2]

이에 반해 종래 반도체식 공정법에 기반을 둔 Top-down 방법은 증착과 식각을 이용한 제조 방법으로, 높은 속도로 다양한 나노 물질을 크기 조절과 정렬도 조절이 자유롭다는 장점이 있다. 그 중 대표적인 Top-down 방식인 나노전사 (nano-transfer) 방법은 나노와이어 제작의 틀이 되는 기관 (master-mold)을 한번 제작하기만 하면 유연 기판 위에 정렬된 나노와이어를 경제적으로 제작할 수 있다는 장점이 있어 유연 기판 위 나노와이어의 제작 및 이를 활용한 고성능 전자소자에 활발히 이용되고 있다. 하지만, 종래의 나노전사 방법들로부터 나노와이어를 유연 기판으로 옮기기 위해 ‘틀-나노와이어-유연기판’ 간의 ‘화학적 접촉력’을 이용하는데, 이를 위한 화학적 전 처리가 까다롭고 재료 의존도가 높아 다양한 재료를 유연 기판으로 옮기는 어렵다. 또한, 화학적 전처리는 열에 의해 쉽게 저하되기에 추가적인 열 공정이 어려워 나노와이어의 물성을 조절하기가 한계가 있다. [2, 3]

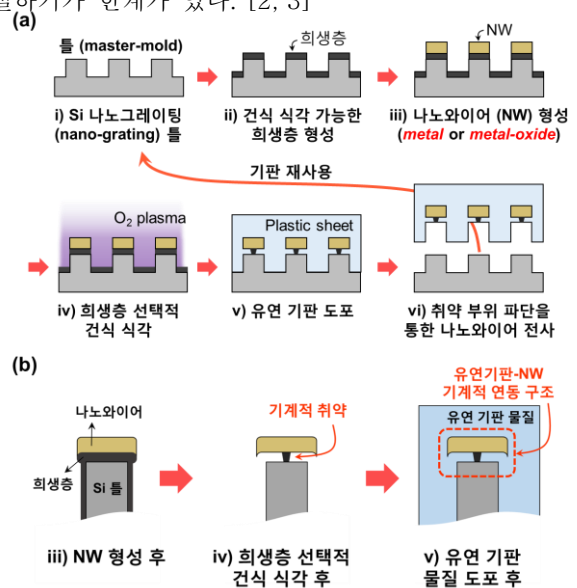


그림. 1 제안하는 공정의 전체 (a)와 상세 (b) 개념도.

이에 본 연구에서 우리는 건식 식각 가능한 희생층을 활용하여 독특한 나노구조를 개발 함으로써, 기계적 연동 (mechanical interlocking) 방식에 기반을 둔 새로운 전사 방법을 개발하였다.

2. 본론

2.1 제안하는 나노와이어 전사 방법

제안하는 전사 공정은 건식 식각 가능한 희생층에 기반한 기계식 연동 구조를 이용하는 방법이기 때문에 재료 독립적인 나노와이어 전사가 가능하다. 그림 1(a)와 (b)는 각각 전체적인 공정과 주요 과정에 관한 모식도이다. 틀이 되는 실리콘 나노그레이팅 (Silicon (Si) nanograting) 기판에 건식 제거 가능한 희생층과 나노와이어를 순차적으로 증착 하면 희생층의 옆면이 노출된 적층 구조를 제작 할 수 있다. 이후 희생층을 선택적으로 건식 식각 하게 되면, 나노와이어와 기판에 영향을 주지 않고 기계적으로 취약한 구조 (언더컷, undercut)를 갖는 희생층을 제작 할 수 있다. 이 구조에 유연 물질을 추가로 형성하면 언더컷으로 유연 물질이 스며들게 되고 나노와이어와 구조적으로 강한 기계식 연동 구조를 형성한다. 끝으로, 유연 기판 물질을 떼어내면 나노와이어와 유연 물질이 기계적으로 강한 접합 구조를 가지기에 함께 틀로부터 떨어지고 화학적 처리 없이 나노와이어를 유연 기판으로 옮겨 지게 한다.

2.2 제작 및 결과

제안하는 방법을 실험적으로 구현하였다. 희생층은 화학 기상 증착 법으로 증착 가능하고 건식 oxygen (O_2) plasma 로 식각 가능 한 비정질 탄소 (amorphous carbon, a-C)를 이용하였고 나노와이어는 물리 기상 증착 법으로 제작가능 한 Gold (Au) 를 이용하였다. 유연 기판은 광경화성 polyurethane acrylate (PUA) resin 과 polyethylene terephthalate (PET)를 이용하였다.

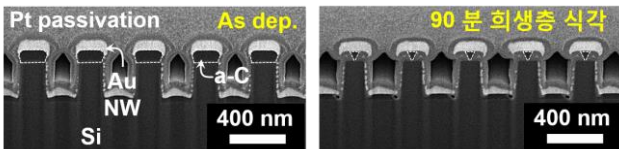


그림. 2 O_2 plasma 에 의한 희생층 식각 및 언더컷 형성

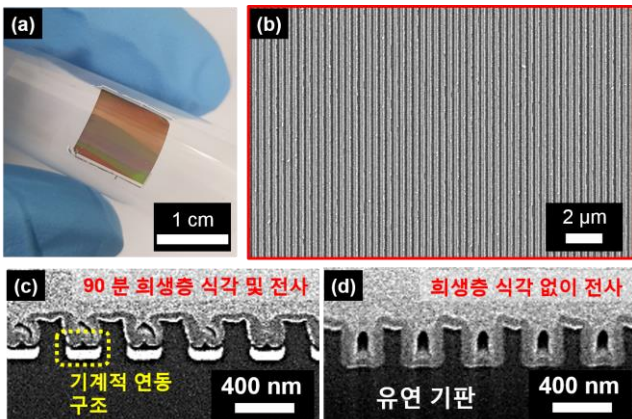


그림. 3 (a-c)개발된 방법으로 제작된 Au NW 의 광학, 표면, 단면 SEM 사진. (d) 일반 전사의 결과

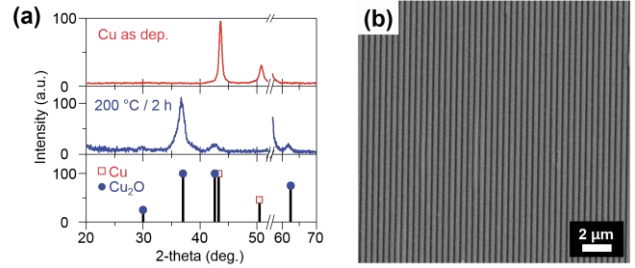


그림. 4 (a) $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 열처리를 통해 Cu 로부터 제작 가능한 Cu_2O 의 X-ray diffraction analysis 결과. (b) 제안된 방법으로 제작된 유연기판 위 Cu_2O NW 의 표면 SEM 사진

성공적인 전사를 위해서는 희생층의 선택적 건식 식각과 언더컷 구조 구현이 중요하다. 그림 2 는 실제 O_2 plasma (90 분)를 통해 희생층이 선택적으로 식각 되는 결과를 보여주는 전자 현미경 (SEM) 사진이다. 이를 통해 실제 기계적으로 취약한 언더컷 구조가 형성됨을 확인 하였다.

실제 나노와이어를 전사한 결과가 그림 3 이다. 광학 (그림 3 a) 과 전자현미경 (그림 3 b) 관측으로부터 성공적인 전사가 이루어 졌음을 확인 할 수 있다. 또한 단면 관측 (그림 3 c) 으로부터 기계적 연동구조에 의한 전사가 이루어 졌음을 확인 할 수 있다. 그림 3 d 는 희생층 식각 없이 이루어진 실패한 전사 실험 결과이다.

제안한 방법의 또 다른 장점은 화학 처리가 필요 없어 열처리가 가능하며 이를 통한 재료 선택의 확장이 가능한 것이다. 실제 Copper (Cu)로부터 열처리를 통한 Copper-oxide (Cu_2O)를 해당 방법으로 제작하였고 (그림 4a) 이 역시 유연 기판 위에 제작 가능함을 실험적으로 확인 하였다 (그림 4b).

3. 결론

본 연구는 건식 가능한 희생층과 기계식 구조에 기반한 새로운 나노와이어 전사 방법에 관한 것으로 실제 제안한 방법을 통해 정렬되고 긴 금속, 금속-산화물 나노와이어가 유연 기판 위에 제작 가능함을 실험적으로 확인하였다. 본 전사 방법은 기계식 구조에 기반을 두기에 다양한 재료의 나노와이어를 손쉽게 제작하는데 활용 될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Cao, G.; Wang, Y. *Nanostructures and Nanomaterials, Synthesis, Properties and Applications*, Imperial College Press, London, 2011.
2. M. Seo, et al., Versatile Transfer of an Ultralong and Seamless Nanowire Array Crystallized at High Temperature for Use in High-Performance Flexible Devices. *ACS Nano* 2017, **11**, 1520-1529.
3. S. Hwang, et al., Covalent Bonding-Assisted Nanotransfer Lithography for the Fabrication of Plasmonic Nano-Optical Elements. *Nanoscale* 2017, **9**, 14335-14346.