

나노메니플레이터를 이용한 나노선의 특성평가

윤상원 · 서종현 · 안재평* · 심태연^a · 이건배^b
한국과학기술연구원 나노재료분석센터,
^a고려대학교 신소재공학과, ^b국민대학교 신소재공학과

Applications of Nanomanipulator in Nanowires

Sang-Won Yoon, Jong-Hyun Seo, Jae-Pyoung Ahn*, Tae-Yeon Seong^a and Kon-Bae Lee^b

Nano Materials Analysis Center, Korea Institute of Science and Technology,
Hawolkkok-dong, Sungbuk-ku, Seoul 130-650, Korea

^aDepartment of Materials Science and Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

^bSchool of Advanced Materials Engineering, Kookmin University, Seoul, 136-702, Korea

(Received February 18, 2009; Revised March 20, 2009; Accepted April 2, 2009)

Abstract The combination of focused ion beam (FIB) and 4 point probe nanomanipulator could make various nano manufacturing and electrical measurements possible. In this study, we manufactured individual ZnO nanowire devices and measured those electrical properties. In addition, tensile experiments of metallic Au and Pd nanowires was performed by the same directional alignment of two nanomanipulators and a nanowire. It was confirmed from I-V curves that Ohmic contact is formed between electrodes and nanomanipulators, which is able to directly measure the electrical properties of a nanowire itself. In the mechanical tensile test, Au and Pd nanowires showed a totally different fracture behavior except the realignment from $\langle 110 \rangle$ to $\langle 002 \rangle$. The deformation until the fracture was governed by twin for Au and by slip for Pd nanowires, respectively. The crystallographic relationship and fracture mechanism was discussed by TEM observations.

Keywords : Nanomanipulator, FIB, Device, Nanowire, Tensile test, Electrical resistance, RTA

1. 서 론

최근, 나노기술 및 소자기술이 발달하면서 소자의 고성능화 및 고집적화가 진행되고 있다. 이처럼 나노소재가 소자화 가능성을 갖게 되면서 나노소자에 대한 매우 높은 관심이 집중되고 있다[1]. 나노 소재들은 물질의 크기가 10^{-9} m로 작아지며 기존 벌크에서는 볼 수 없었던 특이한 현상들이 나타낸다. 이러한 현상들은 소자의 고성능화를 실현시키는데 중요한 역할을 하고 있다. 또한 이들의 작은 사이즈는 소자의 집적도를 향상시키는데 크게 기여한다. 이러한 나노물질의 특성을 이해하고 소자에 응용하기 위해서는 이들의 특성을 정확히 평가하고 제어하는 것이

매우 중요하다[2, 3]. 이에 따라 나노미터 크기를 갖는 시료를 적절히 제어하는 것은 중요한 이슈가 되고 있다[3]. 나노물질을 이용한 소자의 문제점은 특성의 원인 파악이 미흡하다는 것이다. 나노소자의 특성을 평가하기 위해서는 나노물질의 특성이 극대화되어 발현될 수 있는 소자를 제작하는 것이 중요하다. 현재 제작되는 나노소자 제작과정에는 나노 리소그래피 과정이 필수적으로 수반되지만 이 과정은 매우 복잡한 단계가 필요하며 시간과 비용이 많이 소요된다[4]. 결국, 이렇게 만들어진 소자도 나노물질의 근본적인 특성을 대변하기에는 한계가 있다. 이와 같은 문제점을 극복하는 대안으로 소자를 만들지 않고 나노물질의 근본적인 특성을 평가하여 나노물질 개

*Corresponding Author : [Tel : +82-2-958-5536; E-mail : jpahn@kist.re.kr]

개로부터 local signal을 끌어 내야 한다[5]. 또한 이렇게 얻어진 신호가 소사화된 후에도 발현될 수 있도록 해야 한다. 즉, 나노물질과 전극의 직접적인 접촉을 통해 나노물질의 특성을 좀 더 정밀하게 측정하는 것은 매우 중요하다.

또한 나노 소재의 기계적 특성을 이해하는 것은 여러 가지 측면에서 중요한 의미를 갖게 된다. 이것은 일반 재료의 소성 및 파괴 거동을 이해하는 시발점이 되는 것은 물론이고 기능성을 갖춘 소자의 구조적 안정성을 이해하는데 필수적이기 때문이다. 최근 나노물질 중에서 높은 응용 가능성을 갖고 있는 나노선에 대한 기계적 특성 평가 연구가 활발히 진행되고 있다. 많은 연구자들은 전산모사[6-8] 매우 얇은 박막과[9] 단결정 벌크 금속으로부터 FIB 가공 방법을[10] 이용하여 응력에 따른 물질의 변형을 연구하였다. 하지만 전산모사의 경우 실험 조건에 따라 결과가 다르게 나오며 실험의 영역이 수 마이크로초 이하 및 수 nm 이하로 매우 제한되어 있다. 또한 기존의 실질적인 실험들은 top-down 형태의 나노 또는 마이크로 물질을 변형시킨 것이어서 흔히 자연적으로 합성되는 bottom-up 형태의 나노 물질의 변형을 확인했다고 생각할 수 없다. 하지만 나노기술의 발달로 인해 우리는 nm 크기 수준으로 물질을 제어할 수 있게 되었다. 그 중 초점이온빔현미경(FIB)은 나노 크기 수준으로 물질의 식각 및 증착을 할 수 있는 장비이며, 나노메니플레이터(나노메니플레이터)는 FIB 안에서 수 nm의 정밀도를 갖고 이동을 할 수 있는 장비이다. 본 논문에서는 최근 나노소재의 연구

에 활발히 사용되고 있는 FIB와 나노메니플레이터를 이용하여 나노물질(나노선)의 전기적, 기계적 특성을 직접 평가하는 응용기술에 대해 소개하였다.

2. FIB & 나노메니플레이터를 이용한 전기적, 기계적 특성 평가방법

FIB는 1960년부터 반도체의 분야에서 sputter와 implantation 공정의 일환으로 사용되던 장비이다. 1961년부터 다양한 액상금속 이온 소스가 발견되면서 이온빔을 이용한 밝기가 향상되었다. 특히, 실온에서 액상 Ga이 발견되었고 이후 1973년에 Seligar 등이 액상 Ga을 FIB에 사용하기 시작하면서 FIB는 물질연구와 응용에 매우 중요한 역할을 하게 되었다. 1990년대 이후 FIB는 전자총을 결합시켜 듀얼빔(dual beam)으로 발전하였다. 듀얼빔 FIB를 이용하면 동일한 영역에서 전자총과 이온빔을 이용한 영상 구현이 각각 가능하다. 즉, 전자총을 이용하여 관찰영역을 고해상도로 관찰할 수 있으며 이온빔을 이용하여 원하는 영역에서의 절단(cutting) 및 증착(deposition)이 가능하다. 그림 1(a)에 듀얼빔 FIB의(FEI, Quanta 3D FEG) 사진을 나타내었다[11].

그림 1(b)는 듀얼빔 FIB 내에 장착된 4개의 나노메니플레이터를(Kleidick, MM3A) 보여준다. 나노메니플레이터는 피에조 모터를 0.5 nm의 정확도로 움직이는 것이 가능하며 나노물질과 텅(텅스텐)의 직접적인 접촉을 통해 전기적 특성 측정이 가능하다. 또한 FIB 내에서 3차원 이동을 하면서 물질을 이동 및 결합시키는

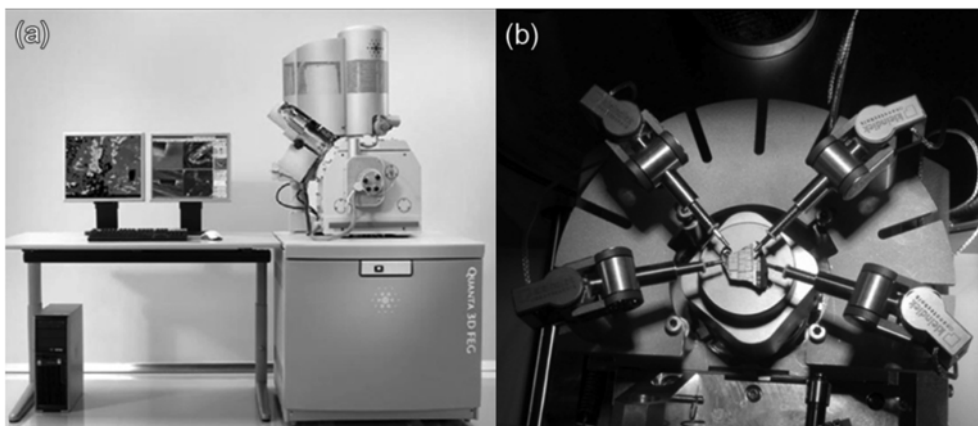


Fig. 1. A photograph of dual beam FIB (a) and a nanomanipulator set attached in FIB (b).

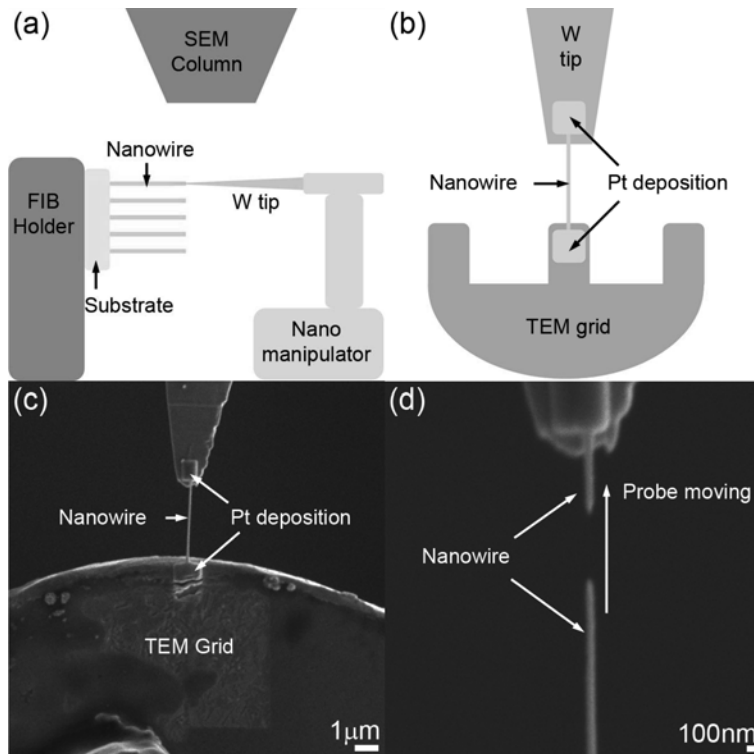


Fig. 2. Schematic diagrams (a, b) and SEM images (c, d) of nano tensile tester in FIB.

3D nano manufacturing을 가능하게 한다.

나노메니플레이터를 3차원으로 적절히 제어하면 나노선의 인장과 압축과 같은 기계적 시험을 수행할 수 있는 나노인장시험 장치가 가능하다. 그림 2는 나노인장시험기의 모식도와 나노선으로부터 인장시험하는 주사전자현미경(SEM) 사진을 보여준다. 그림 2(a)는 FIB 챔버 내부에 장착된 샘플과 장치들의 배치를 보여주는 것으로 나노선과 나노메니플레이터가 인장방향에 1축으로 정렬되어 있으며 이축은 전자빔에 수직으로 놓여 있다. 따라서 모든 인장시험 과정은 인장축에 수직방향에서 SEM으로 확인된다. 이 실험에서 가장 어려운 부분은 나노선과 나노메니플레이터의 인장방향을 수 nm 이하로 일치시키는 것이다. 그림 2(b)에서는 FIB의 Pt 증착을 이용하여 나노선의 한 쪽 끝을 나노메니플레이터의 텅스텐 팁에 고정시키고 다른 쪽 끝은 투과전자현미경 그리드(TEM Cu 그리드, Omniprobe)에 고정시킨 모식도를 보여준다. 이것은 나노인장시험이 끝난 후 파단된 시료의 TEM 관찰을 용이하게 하고자 의도된 것이다. 모든 실험은 FIB의 이온 손상(ion damage)을 생각

하여 이온빔과 이온 증착을 사용하지 않고 전자빔 증착 방식을 사용하였다. 그림 2(c)는 그림 2(b)의 실제 SEM 사진이다. 이러한 배치에서 정렬이 완료되면 나노메니플레이터를 TEM 그리드에서 멀어지도록 이동하여 나노인장시험을 진행한다. 그림 2(d)는 나노인장시험을 한 뒤의 파단된 나노선의 SEM 사진이다. 파단된 나노선의 미세조직 분석 및 결정구조 분석은 나노인장시험이 종료된 뒤 TEM 그리드에 붙어 있는 나노선의 TEM 관찰을 통해 수행되었다. 본 나노인장시험에서 사용된 나노선은 Au 및 Pd였다.

3. 직접 접촉 방식에 의한 나노선의 전기적 특성 평가

최근까지 실제 nm 크기를 갖는 나노소재를 국소영역에서 인위적으로 조작하는 것은 매우 힘들기 때문에 나노선 소자화 분야에서는 개별적으로 나노물질을 소자화하기 보다 나노물질로 구성된 집합체(또는 응집체)를 소자로 제작하는 것이 일반적이다[12]. 나노선 한가닥으로부터 소자를 제작하기 위해서는 전

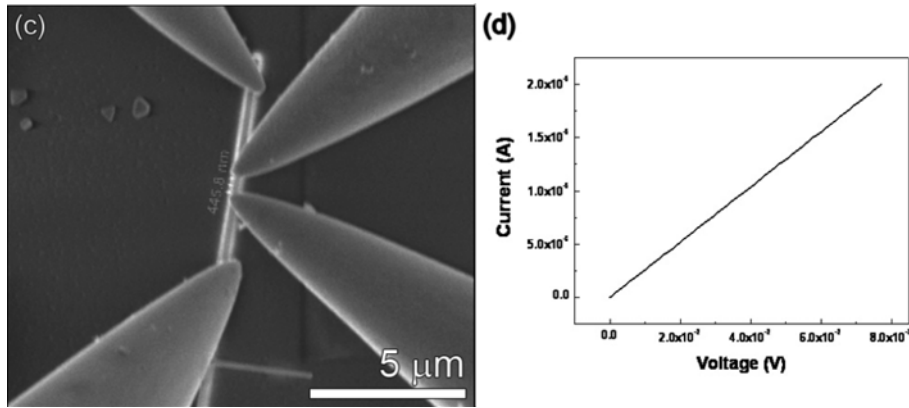


Fig. 3. A direct contact image of single ZnO nanowire and 4 point probe nanomanipulator (a) and a I-V curve obtained from the direct measurement (b).

자빔을 이용한 나노리소그래피 공정이 일반적으로 이용된다. 하지만 이 공정은 다단계로 진행되며 다양한 화학물질을 이용하므로 소자 특성 평가까지 많은 시간과 비용이 소모되며 분석 결과에도 많은 공정변수의 영향이 포함되어 있다. 따라서 이러한 다단계 공정보다는 나노영역에서 직접 나노물질의 특성을 측정하는 것이 매우 유용한 방법이다. 그림 3(a)는 FIB 내에 4점 프로브 나노메니플레이터(4 point probe nanomanipulator)를 장착하고 전자빔으로 직접 Au 나노선을 관찰하면서 프로브를 나노선에 접촉시킨 SEM 영상이며 그림 3(b)는 나노선으로부터 직접 I-V 곡선을 측정한 결과이다.

I-V 곡선으로부터 계산된 Au 나노선의 비저항은 $6.8 \times 10^{-2} \Omega \text{cm}$ 벌크의[13] 값과 유사한 범위에 있다. 비슷하다[13]. 또한 그림 3(b)의 I-V 커브를 통해 나노메니플레이터 팁과 나노물질의 접촉은 매우 안정적임을 알 수 있다. 사실 나노영역에서 나노선과 나노메니플레이터 사이에 접촉을 제어하는 것은 매우 어려운 일이기 때문에 안정적인 접촉을 위해 우리는 safety tip approach(STA) 시스템을 이용하였다. STA 시스템은 나노메니플레이터 팁이 나노선에 접촉하는 순간 급격히 변화하는 저항의 움직임을 모니터링하여 특정 저항값에서 팁의 움직임을 제어함으로써 항상 일정한 수준의 압력으로 나노물질과 팁의 접촉을 형성시킬 수 있다. 그림 4은 ZnO 나노선 한가닥으로부터 열처리에 따른 소자의 비저항 변화를 나타낸 것이다. 700°C까지 열처리 동안에 ZnO 나노선의 비저항은 200~500°C의 범위에서 매우 급격하게 감소

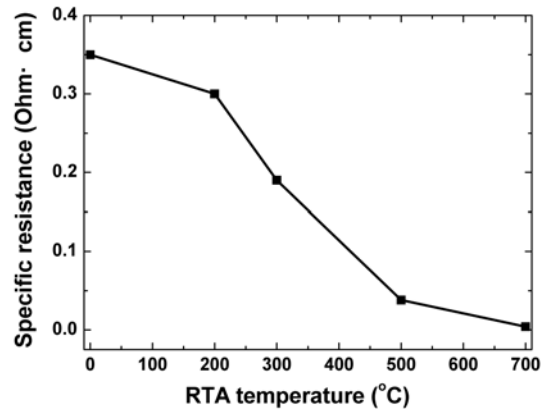


Fig. 4. The specific resistances with the RTA temperature of single ZnO nanowire calculated from I-V curves measured by 4 point probe nanomanipulator.

하는 경향을 보였다[14, 15] 이것은 열처리에 따라 ZnO 나노선 표면부의 결정성 증가와 소자의 접촉저항을 증가시키는 탄소함량의 감소 때문으로 밝혀졌다. 다음절에서는 듀얼빔 초점 이온빔 현미경을 이용하여 단일 나노선 소자를 기존의 복잡한 단계를 거치지 않고 한 단계로 제작하는 방법을 소개하겠다.

4. 나노선 소자 제조 및 단일 소자의 특성 평가

나노메니플레이터가 부착된 듀얼빔 FIB를 이용하여 단일 나노선 소자를 제작하는 과정을 그림 5에 나타내었다. 그림 5에서 사용된 나노선은 기상법으

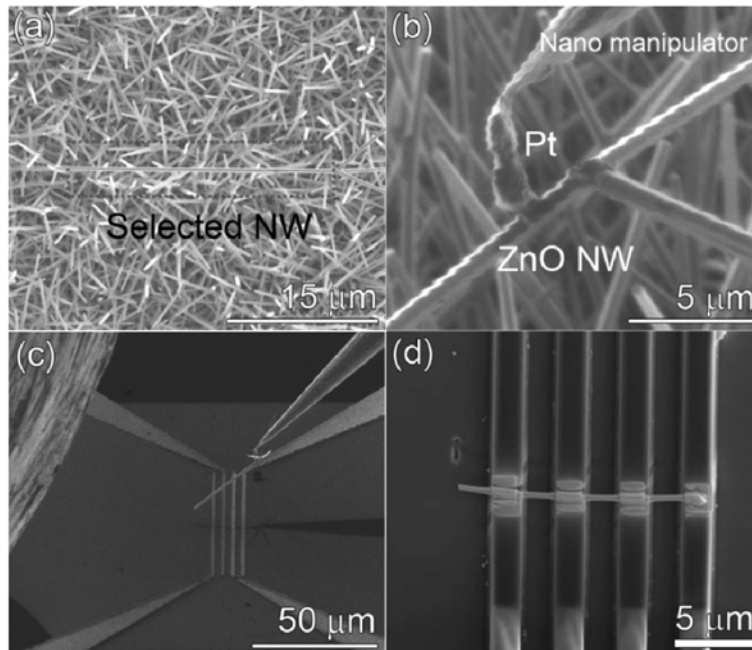


Fig. 5. A SEM image of a selected ZnO nanowire (a), a welding feature between the nanomanipulator and ZnO nanowire, where the Pt deposition was used (b), the ZnO nanowire aligned on electrodes after lift-out (c), and finally a single ZnO nanowire device.

로 제조된 ZnO였으며 제조과정은 다음과 같다.

(a) 합성된 나노선 기판에서 적절한 크기와 형상을 갖는 나노선을 선택함.

(b) 나노메니퓰레이터 팁을 나노선 가까이 가져간 후 FIB의 Pt 증착을 이용하여 접착시키고 기판에 연결된 나노선을 FIB 이온빔으로 절단함.

(c) 나노메니퓰레이터에 접합된 나노선을 전극이 패턴닝되어 있는 Si 기판으로 이동시키고 전극과 나노선을 적절히 정렬시킴.

(d) 마지막으로 FIB의 Pt 증착을 통해 전극 위에 합체시켜 소자를 완성시킴.

이 방법은 마스크를 이용한 전자빔 리소그래피 방법에 비해 여러 가지 장점을 가지고 있다. 첫째, 한번의 단계로 나노선을 소자화시킬 수 있기 때문에 공정이 간단하다. 둘째, 전자빔 리소그래피는 전극을 증착시키기 위해 photoresist(PR), developer 등 다양한 화학물질을 이용하므로 오염에서 자유로울 수 없다. 하지만 FIB를 이용하게 되면 Pt 증착 소스인 trimethyl platinum(MeCp)PtMe₃를 국부적으로 사용하는 것 외에는 화학물질을 전혀 이용하지 않기 때문에 오염에 대한 걱정이 별로 없다. 셋째는 전자빔 리소그래피는

무질서하게 퍼트려 놓은 나노선 중에서 선택해서 소자를 만들 수 밖에 없어 많은 나노선을 소비해야 하지만 FIB에서는 한번에 최적의 나노선 하나만을 선택하여 소자화 할 수 있다. 마지막으로 전자빔 리소그래피 방법으로 소자를 제작 시 노광 작업을 여러 번 하는데 이때 정렬이 틀어지는 경우가 많아 소자 제작에 실패하는 경우가 종종 발생한다. 반면, FIB에서는 정렬하는 동안 전자빔을 이용하여 계속 관찰하면서 진행할 수 있어 실수 확률이 거의 없다.

5. Au 나노선의 기계적 특성 평가

Au 나노선은 사파이어 위에 CVD 방법을 사용하여 합성되었다[16]. Au 나노선의 길이는 수~수십 μm , 평균 직경은 약 200 nm이다. Au 나노선의 성장방향은 $\langle 110 \rangle$ 방향이며 네 개의 면으로 둘러싸여 있는 마름모 형태의 구조를 가지고 있다. 본 실험에서 나노선의 기계적 특성 평가를 위해 100 nm 이하의 직경을 가지는 Au 나노선을 사용하였다(그림 6).

그림 7은 나노인장시험을 통해 얻어진 Au 나노선의 TEM 이미지를 보여준다. 그림 7(a)에서 Au 나

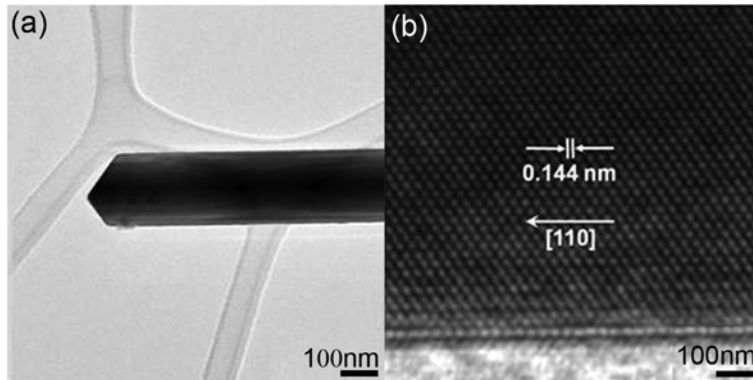


Fig. 6. A typical TEM image of Au nanowire and its crystallographic characterization confirmed by TEM observations.

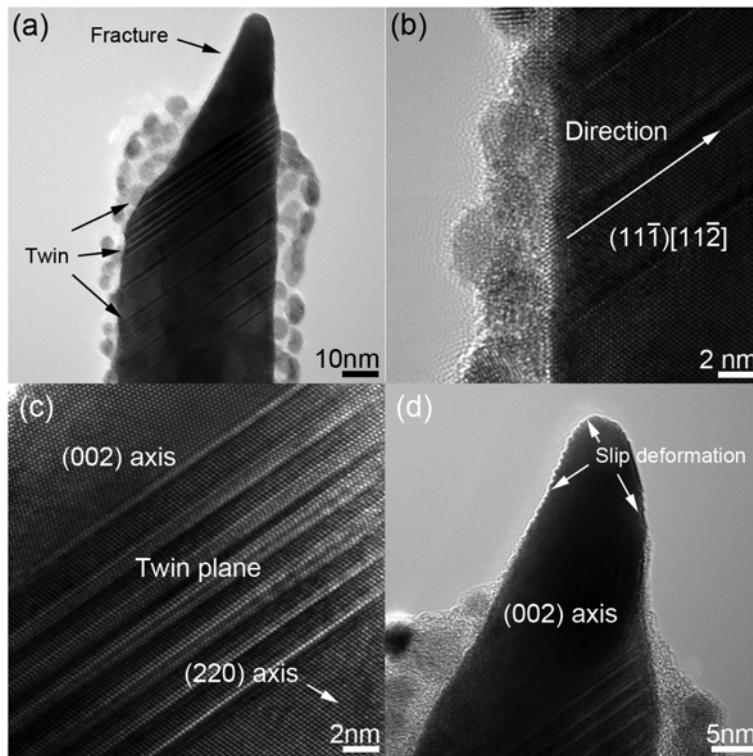


Fig. 7. TEM micrographs showing the failure behavior of a Au nanowire. In particular, Fig. 7(d) reveals the fracture tip of the Au nanowire, where the slip deformation is clearly observed on the surface.

노선의 인장실험 초기에는 쌍정(twin)이 Au 나노선에 전체적으로 형성되었다. 그림 7(b, c)에서 쌍정은 $\{111\}\langle 112\rangle$ 부분 전위에 의해 $\{111\}$ 면 위를 $\langle 112\rangle$ 방향으로 지나가면서 생성되었음을 알 수 있다[6]. 일반적으로 하중에 놓인 Au의 변형은 슬립에 의해 진행되는 것으로 알려져 있다[17]. 따라서 본 실험에서 관찰되는 쌍정은 Au 나노선에서 관찰되는 나노 물질

의 고유한 특성이라 생각된다. 나노선에 응력이 계속 전달되면서 나노선의 직경은 쌍정에 의해 감소된다. 쌍정에 의해 Au 나노선의 직경이 감소되다가 어떤 특정 시점에서 또는 응력상태에서 나노선에 인장 응력이 집중되고 네킹(necking) 현상을 보이게 된다. 나노선의 직경이 감소하면서 더 이상 인장 응력을 수용할 수 없게 되면 $\langle 110\rangle$ 축을 가지고 있던 나노선

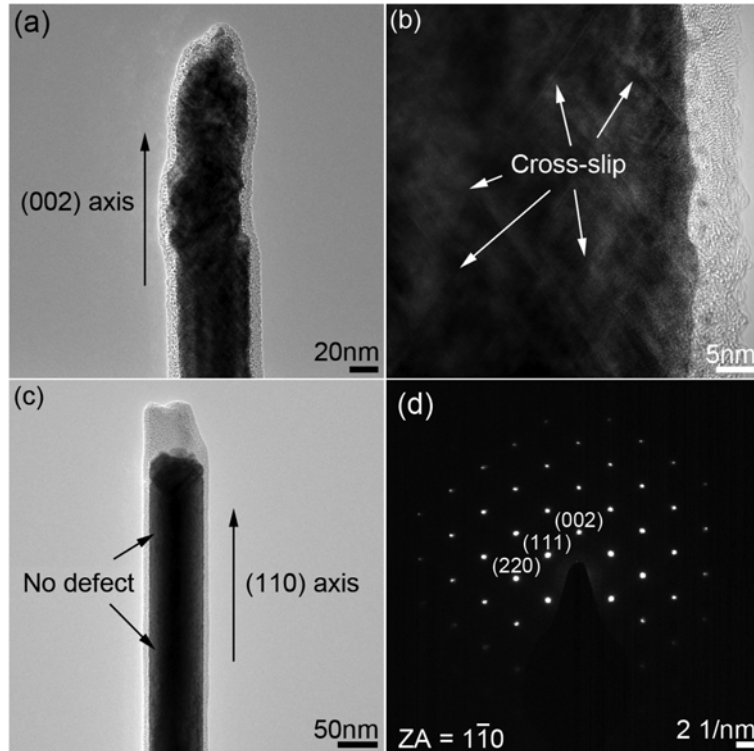


Fig. 8. TEM micrographs showing the failure behavior of a Pd nanowire, (a) $\langle 002 \rangle$ rotation after the fracture, (b) cross-slip behavior at the orientation with $\langle 002 \rangle$ axis, (c) the another counter part of the fractured Pd nanowire, and (d) a selected area diffraction (SAD) pattern of Fig (a, b), showing the reorientation toward $\langle 002 \rangle$ axis.

은 갑자기 $\langle 002 \rangle$ 축으로 재배열을 하게 된다. 이러한 특이한 현상은 그림 7(d)에서 관찰된다. 더욱 흥미로운 사실은 $\langle 002 \rangle$ 축으로 재배열한 Au 나노선에서는 더 이상 쌍정에 의한 변형이 일어나지 않고 슬립을 통한 변형이 일어난다. 이는 네킹 부근의 입자 재배열에 따른 나노선 축의 변화로 인해 인장축과 결정축에 따른 Schmid 인자가 변화했기 때문이다[18].

6. Pd 나노선의 기계적 특성 평가

Pd 나노선은 Au 나노선과 동일한 방법으로 사파이어 위에 CVD 방법을 사용하여 합성되었으며 나노선의 전체적인 형상 및 결정학적 특징은 Au와 유사하였다. 그림 8은 Pd 나노선의 나노인장시험 결과를 보여주는 것으로 앞 절에서 설명된 Au 나노선과는 다른 변형 거동을 보인다. 또한 파단되어 두 부분으로 나뉘 Pd 나노선의 파괴거동은 서로 판이하게 달랐다. 파단된 Pd 나노선의 한 부분은 $\langle 110 \rangle$ 축을 가

지고 있으며 아무런 변형도 일어나지 않았다. 이것은 인장시험에서 어느 한 부분에서 인장 응력에 의해 변형이 일어나면 다른 부분에서는 응력이 존재하지 않기 때문이다. 반면 다른 파단된 Pd 나노선은 $\langle 110 \rangle$ 축에서 $\langle 002 \rangle$ 축으로 재배열을 하였으며 전체적으로 cross-slip에 의한 변형에 의해 변형 및 파괴가 진행되었다. 이러한 결과로부터 Pd 나노선은 금 나노선과 달리 쌍정에 의한 변형을 하지 않고 입자재배열 및 cross-slip에 의한 변형을 하였다. 그 이유는 두 물질의 입계 쌍정 응력이 다르기 때문이다[19]. 금의 경우 비교적 적은 입계 쌍정 응력(80 MPa)을 가지고 있고 팔라듐의 경우 면심입방구조 중 높은 입계 쌍정 응력(330 MPa)을 가지고 있다. 따라서 금 나노선은 쌍정에 의한 변형을 하며 팔라듐 나노선은 cross-slip에 의한 변형을 한다. 현상적으로 결과를 정리해보면 Pd 나노선은 변형초기에 $\langle 002 \rangle$ 축으로 재배열을 한 후 cross-slip에 의한 변형을 하다가 파단이 된다는 사실이다.

7. 요약

FIB와 나노메니플레이터를 이용한 다양한 nano manufacturing을 통해 단일 나노선 소자제작 및 평가가 가능하였으며 또한 나노물질 자체의 전기적, 기계적 특성 평가를 수행할 수 있었다. 나노메니플레이터를 나노선에 직접 접촉시켜 전기적 특성을 평가하는 기술은 STA 등과 함께 사용될 때 높은 신뢰도를 갖는 신호를 얻을 수 있었다. 특히, 이를 이용한 나노소재 특성 평가기술은 소자제작 시간을 단축시킬 수 있고 패턴닝으로부터 화학적 오염을 줄일 수 있는 장점을 갖고 있었다.

또한 FIB와 나노메니플레이터를 적절히 이용하면 나노인장시험기로서 활용이 가능하였으며 나노선의 기계적 특성을 본격적으로 평가할 수 있었다. 본 연구의 나노인장시험으로부터 얻은 인장실험 및 TEM 분석으로부터 Au 및 Pd 나노선의 인장 및 파괴거동을 직접적으로 관찰할 수 있었다. Au 나노선은 인장 초기에 $\{111\}\langle 112 \rangle$ 쌍정이 생성되고 나노선의 직경이 감소하다가 더 이상 인장응력을 수용할 수 없게 되면 $\langle 110 \rangle$ 축으로부터 $\langle 002 \rangle$ 방향으로 재배열하는 방식으로 네킹이 형성되며 최종적으로 결정축 재배열 이후에는 슬립에 의한 파괴가 진행된다. Pd 나노선의 경우에는 Au와는 전혀 다른 파괴거동을 보였다. 먼저 네킹없이 $\langle 002 \rangle$ 축으로의 재배열 현상이 관찰되며 이후 cross-slip에 의한 변형을 하였다. 두 나노선 모두 인장 응력이 가해지면 네킹 부분을 중심으로 한 부분에서만 변형이 일어나며 다른 부분에서는 아무런 변형을 찾아 볼 수 없었다.

감사의 글

본 논문은 산업자원부가 지원하는 국가 반도체 연구개발사업인 “나노반도체장비 원천기술 상용화사업” 및 교육과학기술부가 지원하는 “미래유망융합기술 파이오니어사업”을 통해 개발된 결과임을 밝힙니다.

참고문헌

- [1] K.W. Z. Zeng, Z. Zhang, J. Chen and W. Zhou: *Nanotechnology.*, **20** (2009) 045503.
- [2] Y. M. S. Yoshimoto, K. Kubo and K. Tomita: *Nano Letters.*, **7** (2007) 956.
- [3] C. S. L. J. Zhou, P. Gao, W. Mai, W. L. Hughes, S. Z. Deng, N. S. Xu and Z. L. Wang: *Solid State Communications.*, **139** (2006) 222.
- [4] Z. F. A. J. G. Lu: *Applied Physics Letters.*, **86** (2005) 032111.
- [5] P. C. C. Z. Fan and J. G. Lu: *Applied Physics Letters.*, **85** (2004) 6128.
- [6] K. G. A. M. L. D. J. Diao: *Nano Letters.*, **4** (2004) 1863.
- [7] J. D. A. M. L. D. K. Gall: *Nano Letters.*, **4** (2004) 2431.
- [8] H. S. P. A. J. A. Zimmerman: *Phys. Rev. B.*, **72** (2005) 054106.
- [9] M. L. S. H. Oh, D. Kiener, P. Gruber and G. Dehm: *Acta materialia.*, **55** (2007) 5558.
- [10] M.L. S. H. Oh, D. Kiener and G. Dehm: *Nature materials.*, **8** (2009) 95.
- [11] K.-H. K. J.-P. Ahn and S.-W. Yoon: *Thin Solid Films.* ISBN:978-81-7895-314-4 (2008) 281.
- [12] H. B.L. L. Liao, J. C. Li, H. He, D. F. Wang, D. J. Fu, and C. Liu: *Journal of Physics Chemistry C.*, **111** (2007) 1900.
- [13] D. J. S. J. Goldberger, M. Law, and P. Yang: *The Journal of Physical Chemistry B.*, **109** (2005) 9.
- [14] H.-J. S. S.-Y. Yoon, K.-H. Kim, J.-P. Ahn, and T.-Y. Seong: *Thin Solid Films* (2008) Accepted.
- [15] J.-H. S. S.-W. Yoon, J.-P. Ahn, T.-Y. Seong, and K.-B Lee: *Nano Letters* (2009) Submission.
- [16] Y. D. Y. A. B. S. Kim: *Nature* (2009) Submission.
- [17] R. W. Hertzberg: *Deformation and Fracture Mechanisms of Engineering Materials*, (Wiley, New York, 1989).
- [18] K. G. A. J. A. Z. H. S. Park: *JMPS.*, **54** (2006) 1862.
- [19] J. B. L. S. Kibey, D. D. Johnson and H. Schitoglu: *Acta materialia.*, **55** (2007) 6843.