

## 습식 산화 분위기에서의 산화 인듐 나노선의 합성 및 구조적 특성

정 종 석, 김 영 현, 이 정 용\*  
한국과학기술원 재료공학과

### Synthesis and Characterization of $\text{In}_2\text{O}_3$ Nanowires in a Wet Oxidizing Environment

Jong Seok Jeong, Young Heon Kim and Jeong Yong Lee\*

Department of Materials Science and Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 373-1 Guseong-dong, Yuseong-gu, Daejeon, 305-701, Republic of Korea

(Received December 16, 2002; Accepted January 24, 2003)

#### ABSTRACT

Indium oxide ( $\text{In}_2\text{O}_3$ ) nanowires were successfully synthesized by a simple reaction in a wet oxidizing environment at low temperature without metal catalyst. The nanowires were characterized by an x ray diffraction (XRD), a scanning electron microscopy (SEM) equipped with an energy dispersive spectrometry (EDS), and a transmission electron microscopy (TEM). It was shown that the  $\text{In}_2\text{O}_3$  nanowires were two types of morphology, uniform nanowires and nanowires containing  $\text{In}_2\text{O}_3$  nanoparticles in its stem. It was found that lengths of the nano wires were ranges of several micrometers and their diameters were around 10~250 nm. The growth direction of the nanowires was investigated and their growth mechanism is also discussed.

**Key words** :  $\text{In}_2\text{O}_3$ , Nanowire, Wet oxidation

#### 서 론

일차원적(1-D) 구조를 갖는 반도체 재료는 후막 재료에 비해 특별한 물리적, 화학적 특성과 1-D quantum wire high-speed field effect transistor와 전력 소모가 아주 낮은 발광소자 등에 대한 응용 가능성 때문에 최근 들어 많은 연구자들의 관심을 끌고 있

다(Wang et al., 1998). 이러한 일차원적 구조를 갖는 재료에 대한 관심은 1991년 Iijima에 의해 탄소 나노 튜브가 발견된 이래로 계속적으로 증가하고 있다(Iijima, 1991). 현재 Si(Wang et al., 1998), Ge(Wu et al., 2001), GaAs(Shi et al., 2001), GaN(Han et al., 1997)와 같은 다양한 반도체 재료의 나노선이 laser-ablation(Wang et al., 1998; Shi et al., 2001), arc discharge(Iijima, 1991), vapor-transport process(Wu et

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실사업에서 지원하는 연구비로 이루어진 것임.

\* Correspondence should be addressed to Dr. Jeong Yong Lee, Department of Materials Science and Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 373-1 Guseong-dong, Yuseong-gu, Daejeon, 305-701, Republic of Korea. Ph.: 042-869-4216, FAX: 042-869-4276, E-mail: jylee@mail.kaist.ac.kr

Copyright © 2003 Korean Society of Electron Microscopy

al., 2001), template-based method (Han et al., 1997) 등과 같은 방법으로 성공적으로 합성되고 있는 반면 산화물 시스템에 대한 연구 결과에 대한 보고는 아직도 많이 미비한 상태이다. 일차원적 구조를 갖는 산화물 시스템은 그것들의 흥미로운 광학적, 전기적, 자기적 특성 때문에 나노소자 등에 응용될 수 있을 것으로 기대되고 있다. 따라서, 일차원적 구조의 산화물 시스템에 대한 연구 및 개발이 필수적이라 하겠다.

최근 들어, MgO (Yang et al., 1996), SiO<sub>2</sub> (Zhu et al., 1999), Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Choi et al., 2000), GeO<sub>2</sub> (Bai et al., 1999), ZnO (Huang et al., 2001) 등과 같은 이원계 산화물 시스템의 나노선이 성공적으로 합성되었다. 그 중에서도 산화 인듐(In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)은 넓은 밴드갭 (bandgap)을 갖는 투명 반도체로서 window heaters, solar cells, liquid-crystal displays 등에 널리 이용되어 왔다 (Liang et al., 2001; Zheng et al., 2001). 현재까지 산화 인듐 나노선은 얇은 Au 층이 코팅된 InP 기판의 빠른 가열 처리 (Liang et al., 2001), 전착 (electrodeposition)에 의해 anodic alumina membranes에 embed된 인듐의 산화 (Zheng et al., 2001), 그리고 산화 인듐의 열적 기화법 (Pan et al., 2001) 등으로 합성되었다. 이러한 방법들에 의해 산화 인듐 나노선이 성공적으로 합성되었으나 공정 온도가 매우 높다거나 금속 촉매를 사용해야 한다는 단점이 존재한다. 금속 촉매를 사용하는 경우에는 균일한 형태를 갖고, 대량으로 합성 가능하다는 장점이 있으나 추가적으로 정제되어야만 하기 때문에 나노선만의 특성 평가나 추가적인 응용이 때

우 어렵다는 단점이 있다 (Shi et al., 2001).

본 연구에서는 이러한 단점들을 보완하기 위하여 금속 촉매를 사용하지 않고 습식 산화 분위기에서 간단한 반응을 통해 산화 인듐 나노선을 합성하였다. 이 방법에 의해 큰 aspect ratio를 갖는 나노선이 비교적 낮은 온도에서 얻어졌다. 문헌에서 알려진 산화 인듐 나노선의 성장방향 (Liang et al., 2001; Pan et al., 2001)과는 전혀 다른 성장 방향을 보이는 나노선이 합성되었다는 것을 확인하였고, 산화 인듐 나노선의 성장 방향 및 성장 기구에 대해 논의하였다.

## 재료 및 방법

산화 인듐 나노선을 합성하기 위하여 Fig. 1에 나타난 일반적인 수평 tube furnace 시스템을 사용하였다. 합성 시스템은 기체 주입구, 배출구, 버블링 (bubbling) 시스템이 있는 수평 석영 tube furnace로 구성되어 있으며, 그것은 박막 재료의 습식 산화를 위해 디자인 된 장비 (Jia et al., 2001; Bhat et al., 1999)와 유사하다. 인듐 금속의 녹는점은 156°C이며, 합성을 위한 반응 온도는 이전에 보고된 문헌에서 적용된 온도인 1400°C (Pan et al., 2001), 1080°C (Liang et al., 2001)보다 매우 낮은 700°C였다. 먼저 1 μm 두께의 SiO<sub>2</sub> 층을 가진 Si 기판을 준비하였다. 준비한 기판과 약 0.5 g의 인듐 금속을 tube furnace 내부에 삽입할 내경이 18 nm인 내부 석영 튜브의 중앙에 위치하였

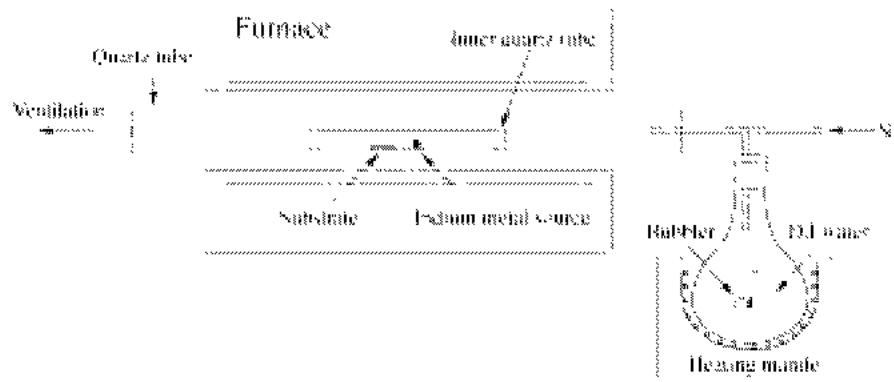
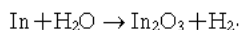


Fig. 1. A schematic diagram of the experimental apparatus for synthesis of indium oxide nanowires in a wet oxidizing environment.

다. 이때 기판과 인듐 금속 사이의 거리는 10 mm로 유지하였다. 내부 석영 튜브는 합성된 재료에 의해 외부 석영 튜브가 오염되는 것을 막고, 합성된 재료를 쉽게 채취하기 위한 것이다. Tube furnace를 반응 온도까지 가열한 후에 1500 sccm의 유량으로 건조한 질소를 흘려주면서 준비된 내부 석영 튜브를 10분 동안 tube furnace의 중앙까지 삽입하였다. 반응은 건조한 질소 기체를 80°C의 증류수를 통해 bubble 시킨 질소 기체와 바꿈과 동시에 시작된다. 1시간 후에 흘려주는 질소 기체를 건조한 질소 기체와 다시 교체하여 반응을 중단시키고, 시료를 상온으로 냉각하였다. 밝은 노란색을 띤 합성물이 기판과 내부 석영 튜브의 내벽에서 발견되었다. 본 연구에서 산화 인듐 나노선의 합성에 사용된 반응식은 다음과 같이 표현될 수 있다.



투과전자현미경(TEM) 분석을 위해 내부 석영 튜브로부터 시료를 채취하였다. 채취한 합성물을 먼저 untra-sonification으로 에탄올에 10분간 분산시킨 후, 합성물을 포함한 용액을 탄소 지지막이 있는 micro-grid 위에 떨어뜨려 투과전자현미경 시편을 제작하였다. 합성물의 결정구조는 구리  $K\alpha$  방사선을 이용하여 분당  $1^\circ(2\theta)$ 로 스캐닝하는 x-선 회절(XRD)으로 분석하였다. 합성물의 전체적인 형태와 조성을 분산 x-선 분광 분석기(EDS)를 갖춘 주사전자현미경(SEM, XL30 ESEM-FEG, Philips)을 이용하여 검사하였다. SEM 관찰을 위해 시료를 Au 금속으로 코팅하였다.

## 결과 및 고찰

합성된 재료의 전형적인 x-선 회절 스펙트럼을 Fig. 2에 나타내었다. XRD 결과는 합성된 재료가  $a = 1.012$  nm의 격자상수를 갖는 입방정의 산화 인듐이라는 것을 보여준다. 산화 인듐의 구조는  $Ia3(206)$ 의 공간군(space group)을 갖는 c-rare earth structure(또는 byxbybite)이다. 하나의 단위포 안에 위치하는 원자 수와 위치는 다음과 같다:  $(0, 0, 0; 1/2, 1/2, 1/2) +$

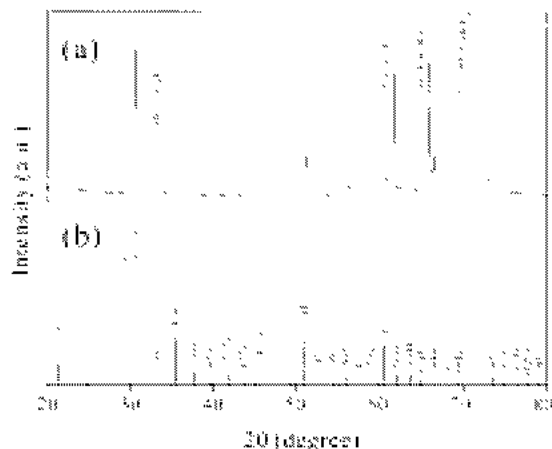
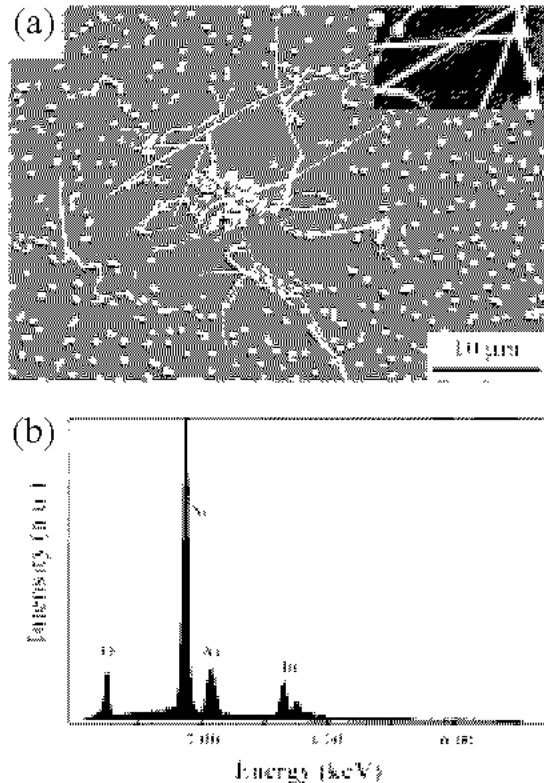


Fig. 2. (a) XRD spectra of the low-dimensional  $\text{In}_2\text{O}_3$  materials on a  $\text{SiO}_2/\text{Si}(100)$  substrate, and (b) relative XRD intensities of the bulk  $\text{In}_2\text{O}_3$  powders referenced from the JCPDS card (#06-0416).

$(1/4, 1/4, 1/4; 1/4, 3/4, 3/4; 3/4, 1/4, 3/4; 3/4, 3/4, 1/4)$  위치에 여덟 개의 인듐 원자;  $(0, 0, 0; 1/2, 1/2, 1/2) \pm (x, 0, 1/4; 1/4, x, 0; 0, 1/4, x; -x, 1/2, 1/4; 1/4, -x, 1/2; 1/2, 1/4, -x)$  위치에 24개의 인듐 원자(여기서  $x \approx 0.97$ );  $(0, 0, 0; 1/2, 1/2, 1/2) \pm (x, y, z; x, -y, 1/2 - z; 1/2 - x, y, -z; -x, 1/2 - y, z; z, x, y; z, -x, 1/2 - y; 1/2 - z, x, -y; -z, 1/2 - x, y; y, z, x; y, -z, 1/2 - x; 1/2 - y, z, -x; -y, 1/2 - z, x)$  위치에 48개의 산소 원자(여기서  $x \approx 0.385, y \approx 0.145, z \approx 0.380$ ) (Galasso, 1970). 산화 인듐 나노선의 XRD 결과와 벌크 산화 인듐의 비교를 위하여 JCPDS card #06-0416 으로부터 얻은 산화 인듐 분말의 결과를 Fig. 2에 함께 나타내었다. 산화 인듐 나노선의 회절 피크 위치는 산화 인듐 분말의 결과와 잘 일치함을 알 수 있으며, 상대적인 강도 역시 그렇게 큰 차이를 보이지 않았다. 33.04, 61.74, 65.95, 69.18°에서 관찰되는 강한 피크는 기판에 의한 것이다.

Fig. 3(a)는 본 실험에서 합성된 산화 인듐 나노선과 나노입자들의 주사현미경(SEM) 사진이다. SEM 사진으로부터 나노선과 많은 면들로 각이 진 나노입자들이 우리의 실험 조건에서 성공적으로 합성된다는 것을 확인하였다. 합성된 나노선은 두 가지의 형태를 갖는다. 첫번째는 나노선의 줄기에 각진 나노입자들이 포함되어 있는 형태이고, 나머지 하나는 나

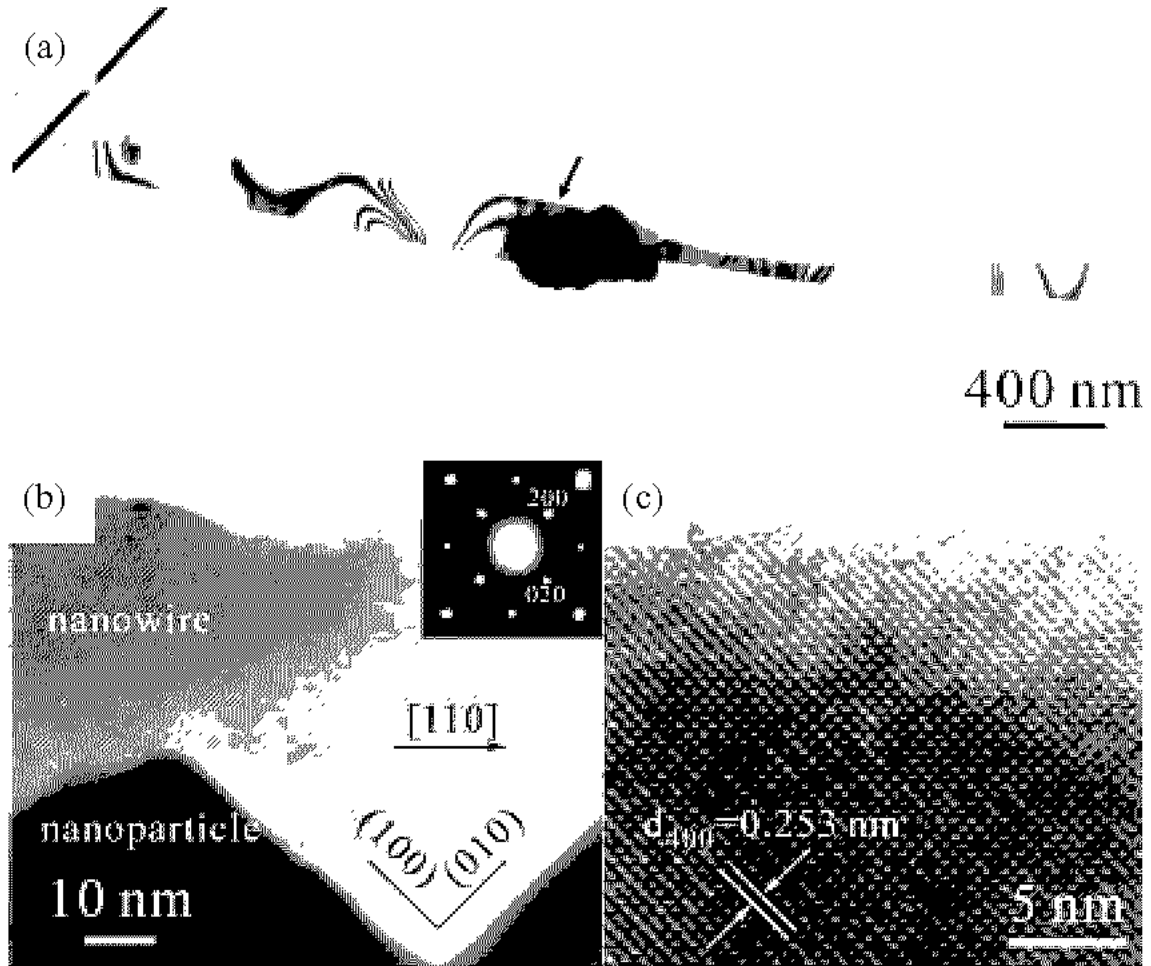


**Fig. 3.** (a) SEM image of the  $\text{In}_2\text{O}_3$  nanowires and nanoparticles synthesized in a wet oxidizing environment, and (b) EDS spectrum of the nanoparticle in the stem of the nanowires.

노입자들을 포함하지 않는 형태이다. 이러한 두 가지 타입의 나노선은 또한 TEM 관찰을 통해서도 관찰되었다. SEM으로부터 확인된 나노입자의 크기는 약 500 nm이다. Fig. 3(a)에 삽입된 확대된 SEM 사진에서 보여지는 것처럼 나노입자를 포함하고 있는 나노선은 구불구불하며 그것들의 두께가 일정하지 않다는 것을 알 수 있다. 또한 나노입자를 포함하고 있지 않은 나노선들은 매끄럽고 곧은 형태를 하고 있으며 그 두께 역시 일정하다는 것을 알 수 있다. EDS 분석을 통해 모든 나노선들은 인듐과 산소로만 이루어져 있다는 것을 알 수 있다. 나노입자를 포함한 나노선의 경우에 나노선의 EDS 스펙트럼을 Fig. 3(b)에 나타내었다. 나노입자 역시 인듐과 산소로만 이루어져 있다는 것을 알 수 있다. EDS 분석 결과 합성된 모든

시료에 있어서 나노선의 줄기와 끝, 그리고 나노입자에서 금속 불순물은 검출되지 않았다. Fig. 3(b)에 나타난 1.74 keV 위치에서의 강한 피크는 기판에 의한  $\text{Si K}\alpha_1$  피크이며, 2.123 keV에서의 강한 피크는 SEM 관찰 시 발생하는 charging effects를 방지하기 위해 코팅한 Au의  $M\alpha_1$  피크이다. Au 코팅 처리를 하지 않은 시료의 경우 역시 EDS 분석 결과 Au 및 다른 금속 불순물은 검출되지 않았다.

Fig. 4는 줄기에 나노 입자가 형성된 나노선의 TEM 사진이다. 본 연구에서 나노선은 벨트 또는 리본 형태를 가지고 있으며 이것은 이전에 Pan 등(Pan et al., 2001)에 의해 보고된 형태와 유사하다. 그러나 그들의 결과와는 다르게 나노선의 줄기에 각진 나노 입자들이 형성되었고 그것의 두께는 형성된 나노 입자를 기준으로 급격하게 변한다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 앞에서 언급한 SEM 관찰 결과와 일치한다. 더 많은 TEM 관찰을 통해 나노선의 길이는 대략 수 마이크로미터 범위이고, 그것들의 두께는 약 10 nm에서 250 nm 범위라는 것을 알 수 있었다. Fig. 4(b)는 Fig. 4(a)에서 화살표로 표시된 영역의 고분해능 투과전자현미경(HRTEM) 사진으로서 나노선과 나노입자 사이의 결정학적 방향 관계를 보여준다. 나노선과 나노입자는 단결정의 입방정 구조를 갖는다는 것을 알 수 있으며, 또한 제한시야 회절상(SADP)으로부터 같은 결정학적 방향을 갖는다는 것을 알 수 있다. Fig. 4(b)의 오른쪽 위에 삽입된 SADP는  $\langle 100 \rangle$  축이 전자빔과 평행한 입방정 산화 인듐의 회절상에 해당한다. SADP 및 HRTEM 결과를 통해 나노입자의 각진 면들은  $\{100\}$  면들이라는 것을 확인하였다. Fig. 4(c)는 나노선의 내부 구조와 표면을 보여주는 전형적인 HRTEM 사진이다. 나노선 내부에는 다른 산화물 시스템(Choi et al., 2000; Han et al., 2000; Zhang et al., 1999)에서 관찰된 마이크로 트윈(microtwins), 적층 결함, 전위 등과 같은 결함은 전혀 존재하지 않았다. 나노선의 표면에 약 5 nm 이하의 비정질 층이 존재하며, 그것의 두께는 항상 일정하지는 않다는 것을 Fig. 4(b)로부터 알 수 있다. SADP와 HRTEM 분석 결과로부터 Fig. 4의 나노선은  $\langle 110 \rangle$  방향으로 성장하였다는 것을 확인하였다. 성장 방향에 대한 이러한 결과는 성장 방향이  $\langle 100 \rangle$  방향이었던 이



**Fig. 4.** TEM images of the nanowire containing a nanoparticle in its stem: (a) typical bright-field image, (b) HRTEM image of the nanowire/nanoparticle interface indicated by arrow in (a) and the corresponding SAEDP (insert), and (c) HRTEM image of the nanowire.

전에 보고된 결과(Liang et al., 2001; Pan et al., 2001)와는 완전히 다르다. HRTEM을 통해 각각의 산화 인듐 나노선을 광범위하게 관찰한 결과, 나노입자가 포함되어 있지 않은 대부분의 나노선들의 성장 방향은  $\langle 100 \rangle$  방향이고, 나노 입자를 포함한 나노선의 경우  $\langle 110 \rangle$  방향으로 자랐다는 것을 확인하였다. 그러나 나노입자가 포함되어 있지 않음에도 불구하고  $\langle 110 \rangle$  방향으로 성장한 몇몇 나노선들을 발견하였다. 이와 같은 나노입자들을 포함하지 않음에도 불구하고  $\langle 110 \rangle$  방향으로 자란 나노선의 경우, TEM 분

석만으로는 시편 제작 과정에서 나노입자가 포함된 일부가 떨어져 나갔는지 원래부터  $\langle 110 \rangle$  방향으로 자랐는지 명확하게 밝힐 수 없었다.

본 연구에서 산화 인듐 나노선을 합성함에 있어서 금속 촉매는 사용되지 않았으며 인듐 금속만이 사용되었다. EDS와 TEM 결과 역시 나노선과 나노입자 어디에서도 금속 불순물은 존재하지 않음을 보여주고 있다. 비록 금속 촉매를 사용하여 나노선을 합성하는 이전 연구 결과(Choi et al., 2000; Liang et al., 2001)에서 보여지는 형태와 유사하게 본 연구에서도

나노선의 줄기에서 나노 입자가 발견되었지만 그것 역시 인듐 금속과 산소로만 이루어졌다는 것을 EDS 결과를 통해 확인하였다. 따라서 산화 인듐 나노선의 성장은 catalytic growth (Choi et al., 2000; Liang et al., 2001) 또는 vapor-liquid-solid (VLS) growth (Wagner et al., 1964)에 의해 이루어지는 것이 아니다. 구조적인 결함들은 나노선의 핵 생성과 성장에 있어서 중요한 역할을 하며, 이러한 결함을 통해 에너지적으로 불리함에도 불구하고 매우 큰 aspect ratio를 갖는 나노선 형태로 자랄 수 있다는 보고가 있다 (Yu et al., 1998). 그러나 본 연구에서 산화 인듐 나노선은 결함이 없는 단결정이었다. 따라서 본 연구에서 성장된 산화 인듐 나노선의 성장은 결함에 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다. 결론적으로 본 연구에서 합성된 산화 인듐 나노선의 성장은 vapor-solid process (Yang et al., 1997)에 의해 지배된다고 말할 수 있을 것이다. Fig. 4로부터 나노입자를 포함한 나노선이  $\langle 110 \rangle$  방향으로 성장하였다는 것을 알았다. 이와 같이 일반적인 성장 방향과는 다른 새로운 방향으로 나노선이 자랄 수 있었던 것은 본 연구에서 산화물 합성 시 산소의 공급원으로 사용된 습식 분위기와 비교적 낮은 온도가 원인인 것으로 생각된다. 그러나 아직 산화 인듐 나노선의 성장 기구에 대한 명확한 결과는 보고되지 않았으며, 앞으로 더 많은 연구가 필요할 것으로 생각된다. 본 연구에서 사용된 습식 산화 분위기에서의 산화 인듐 나노선의 합성 결과 비교적 낮은 온도에서 합성이 가능하였으며, 기존에 보고된 결과와는 다른 성장 방향을 보이는 나노선을 합성 가능하였다. 따라서 본 연구에서 사용된 습식 산화 분위기에서의 산화물 나노선 합성법을 산화 인듐 이외의 다른 여러 산화물 나노선 합성에 적용한다면 낮은 온도에서 새로운 형태나 새로운 방향으로 성장된 나노선을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

요약하면, 본 연구에서 우리는 습식 산화 분위기에서 vapor-solid process를 통해 금속 촉매를 사용하지 않고도 낮은 온도에서 산화 인듐 나노선을 성공적으로 합성하였다. XRD 결과는 합성된 산화 인듐 나노선이 입방정 구조를 갖는다는 것을 보여준다. 이러한 나노선들은 두 가지 형태를 갖는다. 하나는 줄기에 약 500 nm 크기의 각진 나노입자가 형성된 형태이고

다른 하나는 나노입자가 형성되지 않은 형태이다. 나노선의 길이는 수 마이크로미터 범위이고, 두께는 약 10 nm에서 250 nm 범위이다. 대부분의 나노선의 성장 방향은  $\langle 100 \rangle$  방향이다. 나노입자를 포함한 나노선은  $\langle 110 \rangle$  방향으로 자랐다는 것이 발견되었으며, 이러한 성장 방향은 이전의 문헌에서 보고되지 않은 새로운 결과이다. 따라서 본 연구에서 사용된 습식 산화 분위기에서의 나노선 합성법을 다른 여러 산화물의 나노선 합성에 응용한다면 낮은 온도에서 새로운 형태 및 성장 방향을 갖는 나노선을 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

## 참 고 문 헌

- Bai ZG, Yu DP, Zhang HZ, Ding Y, Gai XZ, Hang QL, Xiong GC, Feng SQ: Nano scale GeO<sub>2</sub> wires synthesized by physical evaporation. Chem Phys Lett 303 : 311 314, 1999.
- Bhat VK, Pattabiraman M, Bhat KN, Subrahmanyam A: The growth of ultrathin oxides of silicon by low temperature wet oxidation technique. Mater Res Bull 34 : 1797 1803, 1999.
- Choi YC, Kim WS, Park YS, Lee SM, Bae DJ, Lee YH, Park GS, Choi WB, Lee NS, Kim JM: Catalytic growth of  $\beta$  Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanowires by arc discharge. Adv Mater 12 : 746 750, 2000.
- Galasso FS: Structure and properties of inorganic solid. Pergamon press, New York, pp. 99 102, 1970.
- Han WQ, Fan SS, Li QQ, Hu YD: Synthesis of gallium nitride nanorods through a carbon nanotube confined reaction. Science 277 : 1287 1289, 1997.
- Han WQ, Kohler Redlich P, Ernst F, Ruhle M: Growth and microstructure of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanorods. Solid State Comm 115 : 527 529, 2000.
- Huang MH, Wu Y, Feick H, Tran N, Weber E, Yang P: Catalytic growth of zinc oxide nanowires by vapor transport. Adv Mater 13 : 113 116, 2001.
- Iijima S: Helical microtubules of graphitic carbon. Nature 354 : 56 58, 1991.
- Jia HQ, Chen H, Wang WC, Wang WX, Li W, Huang Q, Zhou J: The study of thermal stability during wet oxidation of AlAs. J Crystal Growth 223 : 484 488, 2001.

Liang CH, Meng GW, Lei Y, Phillip F, Zhang L: Catalytic growth of semiconducting  $\text{In}_2\text{O}_3$  nanofibers. *Adv Mater* 13 : 1330-1333, 2001.

Pan ZW, Dai ZR, Wang ZL: Nanobelts of semiconducting oxides. *Science* 291 : 1947-1949, 2001.

Shi W, Zheng Y, Wang N, Lee CS, Lee ST: A general synthetic route to III-V compound semiconductor nanowires. *Adv Mater* 13 : 591-594, 2001.

Wagner RS, Ellis WC: Vapor-liquid-solid mechanism of single crystal growth. *Appl Phys Lett* 4 : 89-90, 1964.

Wang N, Tang YH, Zhang YF, Yu DP, Lee CS, Bello I, Lee ST: Transmission electron microscopy evidence of the defect structure in Si nanowires synthesized by laser ablation. *Chem Phys Lett* 283 : 368-372, 1998.

Wu Y, Yang P: Melting and welding semiconductor nanowires in nanotubes. *Adv Mater* 13 : 520-523, 2001.

Yang P, Lieber CM: Nanorod-superconductor composites: A pathway to materials with high critical current densities. *Science* 273 : 1836-1840, 1996.

Yang P, Lieber CM: Nanostructured high-temperature superconductors: Creation of strong pinning columnar defects in nanorod/superconductor composites. *J Mater Res* 12 : 2981-2996, 1997.

Yu DP, Hang QL, Ding Y, Zhang HZ, Bai ZG, Wang JJ, Zou YH, Qian W, Xiong GC, Feng SQ: *Appl Phys Lett* 73 : 3076-3078, 1998.

Zhang HZ, Kong YC, Wang YZ, Du X, Bai ZG, Wang JJ, Yu DP, Ding Y, Hang QL, Feng SQ:  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  nanowires prepared by physical evaporation. *Solid State Comm* 109 : 677-682, 1999.

Zheng MJ, Zhang LD, Zhang XY, Zhang J, Li GH: Fabrication and optical absorption of ordered indium oxide nanowire arrays embedded in anodic alumina membranes.

*Chem Phys Lett* 334 : 298-302, 2001.

Zhu YQ, Hu WB, Hsu WK, Terrones M, Grobert N, Hare JP, Kroto HW, Walton DRM, Terrones H:  $\text{SiC-SiO}_x$  heterojunctions in nanowires. *J Mater Chem* 9 : 3173-3178, 1999.

#### < 국문초록 >

습식 산화 분위기에서 vapor-solid process를 통해 금속 촉매를 사용하지 않고도 낮은 온도에서 산화 인듐 나노선을 성공적으로 합성하였다. 나노선은 x선 회절(XRD), 분산 x선 분광 분석기(EDS)를 갖춘 주사전자현미경(SEM), 투과전자현미경(TEM)을 통해 분석되었다. XRD 결과는 합성된 산화 인듐 나노선이 입방정 구조를 갖는다는 것을 보여준다. 이러한 나노선들은 두 가지 형태를 갖는다. 하나는 줄기에 약 500 nm 크기의 각진 나노입자가 형성된 형태이고 다른 하나는 나노입자가 형성되지 않은 형태이다. 나노선의 길이는 수 마이크로미터 범위이고, 두께는 약 10 nm에서 250 nm 범위이다. 나노선은 결함을 포함하지 않았으며 표면에 5 nm 이하의 비정질 층을 가지고 있었다. TEM 분석 결과 대부분의 나노선의 성장 방향은 <100> 방향이었으나 나노입자를 포함한 나노선은 <110> 방향으로 자랐다는 것이 발견되었다. 이러한 성장 방향은 이전의 문헌에서 보고되지 않은 새로운 결과이다. 일반적인 성장 방향과는 다른 새로운 방향으로 나노선이 자랄 수 있었던 것은 본 연구에서 산화물 합성 시 산소의 공급원으로 사용된 습식 분위기와 비교적 낮은 온도가 원인인 것으로 생각된다. 따라서 습식 산화 분위기에서의 나노선 합성법을 다른 여러 산화물의 나노선 합성에 응용한다면 낮은 온도에서 새로운 형태 및 성장 방향을 갖는 나노선을 얻을 수 있을 것으로 예상된다.