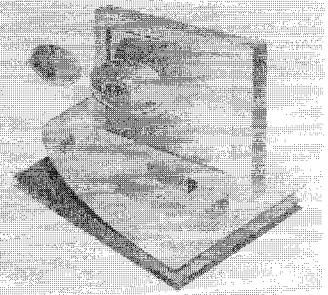


반도체 나노선의 전자소자 응용



최영진 연구원 (KIST 나노재료연구센터) | 김동완 선임연구원 (KIST 나노재료연구센터)
최경진 선임연구원 (KIST 나노재료연구센터) | 박재관 책임연구원 (KIST 나노재료연구센터)

1. 서론

나노물질은 크게 구성요소들의 형태에 따라 나노점, 나노입자와 같은 영차원 구조, 나노선, 나노막대, 나노벨트 등과 같이 직경이 100 nm 이하의 일차원 구조, 나노판, 나노막 등의 이차원 구조로 분류할 수 있다. 이 중 일차원 구조의 나노선은 그 자체로 나노소자를 구현하는데 있어 유용한 기본단위가 될 수 있으며, 기존의 벌크재료에서 발견할 수 없었던 양자제한효과, 우수한 결정성, 자기조립, 내부응력 감소효과, 고비표면적 등 새로운 신기능성, 고기능성들로 인하여 나노전자소자에 다양한 가능성을 열어 줄 유력한 소재로 주목받고 있다 [1].

현재 반도체 나노선은 레이저를 비롯하여 FET (Field Effect Transistor), 논리게이트 (Logic Gate), 태양전지 (Solar Cell), 이차전지 (Secondary Battery) 등 다양한 소자로의 응용 사례가 보고되고 있으며, 특히 최근에는 일차원 나노선의 형상학적 특징을 이용한 광센서 (Optical Sensor), 가스센서 (Gas Sensor), 바이오센서 (Bio Sensor) 등의 표면 현상을 이용한 나노소자에 관한 연구가 활발히 보고되고 있다 [2-4].

최근 나노선 관련 세계적인 연구동향을 살펴보

면, 지난 수년간은 University of California at Berkeley의 Yang 그룹과 Georgia Institute of Technology의 Wang 그룹을 중심으로 나노선의 합성, 구조 및 조성변조 등을 통하여 새로운 물리적, 화학적, 전기적 특성을 관찰하는 연구가 주로 진행되어 왔으나 [4], 최근 연구동향은 Harvard University의 Lieber 그룹을 중심으로 에너지, 바이오, 구조재료, 전자재료 등 다양한 분야의 소자응용에 대한 연구가 활발히 보고되고 있다 [2]. 그러나 실질적인 나노소자응용 측면에서 볼 때는 아직 갈 길이 멀다. 이와 같이, 나노선의 합성 및 이를 이용한 나노소자응용에 대한 연구는 꾸준히 발표되고 있으나 산업적 규모로 생산되고 응용되는 나노소자/제품화에 대한 보고는 극히 미약한 실정이다. 국내 나노선 관련 연구는 포항공과대학교, 고려대학교, 연세대학교 등의 학계를 중심으로 진행되고 있으며, 정부출연기관인 한국과학기술연구원 (KIST) 나노재료연구센터에서는 ZnO, SnO₂, In₂O₃ 등의 산화물 반도체, GaN, AlN, InN 등의 III-V족 화합물, CdS, CdSe, ZnS, ZnSe 등의 II-VI족 화합물, Si 및 SiC 등 다양한 반도체 나노선을 합성하고 도핑, 변조 및 소자응용에 대한 연구를 체계적으로 진행하고 있다 [5-10].

본 고찰에서는 한국과학기술연구원 나노재료연

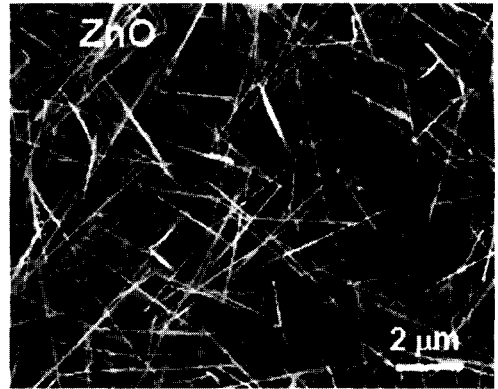
구센터에서 수행된 반도체 나노선의 합성 및 이를 이용한 소자응용에 대한 연구결과를 소개하고 향후 나노선 연구 분야에 대해서 전망하고자 한다. 특히 최근 나노선 연구동향에 주지하여 나노선 기반의 가스센서, 광센서, FED, 이차전지 등의 소자응용에 대한 연구결과를 중점적으로 소개하고자 한다.

2. 반도체 나노선의 합성

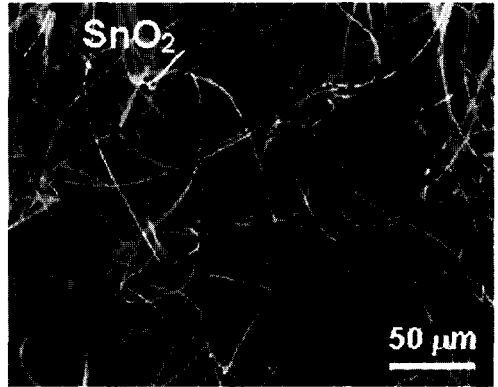
현재 반도체 나노선은 대부분 열분해법 (Thermal Evaporation) [5,6], 화학기상증착법 (CVD, Chemical Vapor Deposition) [7], 펄스 레이저 증착법 (PLD, Pulsed Laser Deposition) [8-10] 등과 같이 기체상태의 전구체를 이용한 기상합성법 (Vapor Phase Transport)을 통해 합성되어 왔다.

비교적 간단한 실험 장치를 이용하여 나노선을 합성할 수 있는 방법으로 열분해법이 있다. 열분해법은 일반적으로 금속 촉매를 이용한 VLS (Vapor-liquid-solid) 기구에 의해 나노선이 합성된다 [11]. 먼저, 기화된 기상 전구체가 기판의 표면 위에 있는 금속 촉매 물질에 흡착되고, 반응온도가 금속 촉매 물질과 기상 전구체의 공융 온도 (Eutectic Temperature)에 근접하게 되면 금속 촉매와 기상 전구체는 합금체 (Alloy)를 이루게 된다. 지속적으로 공급되는 기상 전구체는 액상의 금속 촉매 내부에 과포화 (Supersaturation)된 고체가 혼재하게 되고, 이 때 석출되는 고체의 결정화를 위한 핵 (Nucleation)이 형성되며, 기상 전구체 성분들이 촉매인 금속과 기판 상에서 재석출 (Recrystallization) 되는 과정을 거쳐 나노선이 성장하게 된다. 현재 당 연구실에서는 이와 같은 성장 기구를 이용하여 ZnO, SnO₂, In₂O₃, Ga₂O₃ 등 다양한 산화물 반도체 나노선을 재현성 있게 합성하고 있다 (그림 1).

화학기상증착법을 이용한 나노선은 일반적으로 금속유기물 화학증착법 (MOCVD, Metal Organic Chemical Vapor Deposition)을 통해 합성된다. 금속유기물 화학증착법은 온도, 압력과 같은 공정변수



(a)



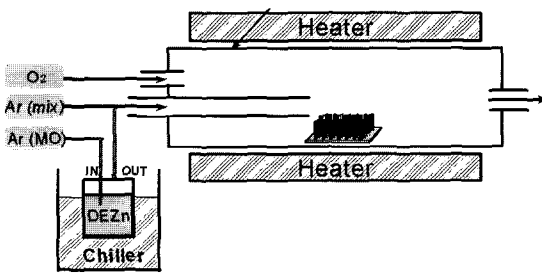
(b)



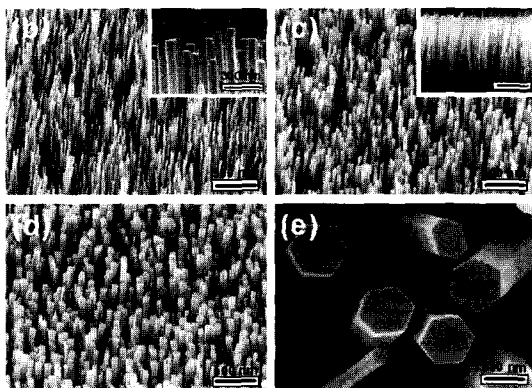
(c)

그림 1. 열분해법에 의해 합성된 다양한 산화물 반도체 나노선 (a) ZnO, (b) SnO₂, (c) In₂O₃.

조절을 통하여 금속 촉매 없이도 나노선을 성장시킬 수 있으며, 다른 나노선 성장 방법과 비교하여 비교적 수직 성장된 나노선을 재현성있게 합성할 수 있다. 비교적 낮은 온도에서 합성이 가능하며 기상 전구체의 유량제어로 나노선의 구경제어가 가능하다. 실례로 다양한 화학기상증착법 중 LP-MOCVD (Low-temperature MOCVD)법의 개략도와 합성된 ZnO 나노선의 SEM 사진을 그림 2에 나타내었다 [7]. LP-MOCVD 방법으로 합성된 ZnO 나노선은 비교적 낮은 온도에서 합성이 가능하며 기상 전구체의 유량제어로 나노선의 구경제어가 가능하였다.

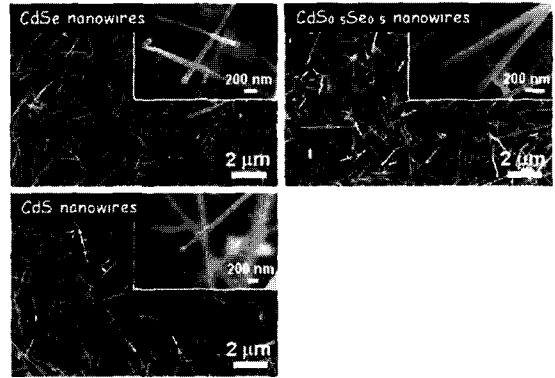


(a)

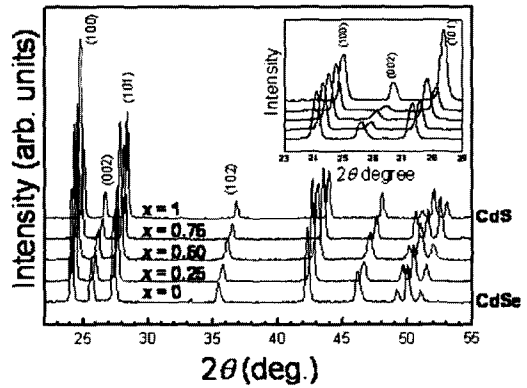


(b)

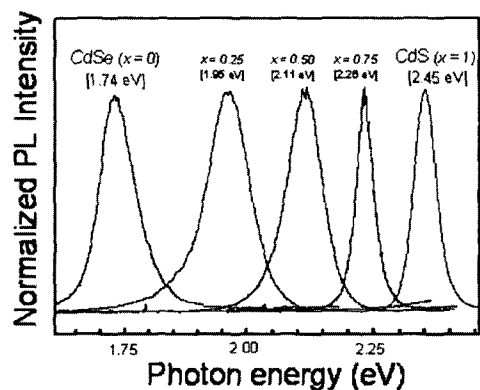
그림 2. LP-MOCVD법에 의해 합성된 ZnO 나노선의 합성장치 개략도 및 대표적인 SEM 사진.



(a)



(b)



(c)

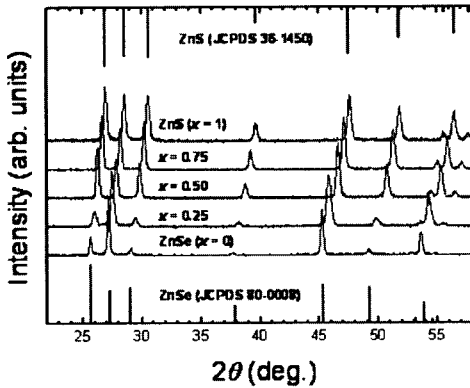
그림 3. (a) PLD법에 의해 합성된 CdS-CdSe 연속고용체 나노선의 대표적인 SEM 사진. (b) CdS-CdSe 연속고용체 나노선의 X-선 회절 분석 패턴. (c) CdS-CdSe 연속고용체 나노선의 PL 스펙트럼.

그 외에도 Si, SiC를 비롯하여 GaN, AlN, InN 등의 III-V족 화합물 반도체를 CVD법을 이용하여 합성하고 있다.

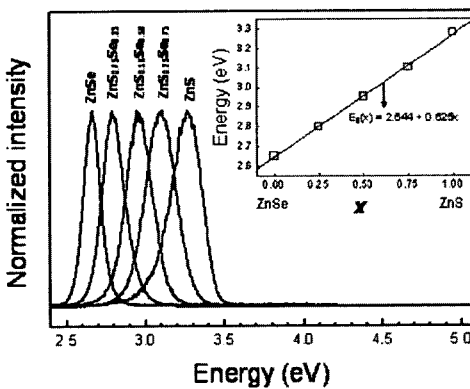
펄스레이저 증착법 (Pulsed Laser Deposition, PLD)은 축 또는 지름방향의 이종구조를 재현하거나 복잡한 다성분계 물질을 합성할 때 매우 유리한 방법이다. 고강도의 레이저 빔이 타겟 표면에 조사되어질 때 타겟 물질은 순간적으로 액상과 기상을 거쳐 플라즈마 상태로 만들어지게 되며, 기상 플리즈마는 타겟과 같은 조성을 가지게 되어 다성분계 반도체 나노선을 합성할 때 조성설계가 쉽다. 이와 같

은 장점을 가지는 펄스 레이저를 이용한 합성 방법은 2성분계 및 복잡한 다성분계 화합물 반도체 나노선의 합성에 매우 유리하다. 하나의 실례로 II-VI족 화합물인 CdS와 CdSe의 조성 변조를 통하여 1.74 ~ 2.45 eV 범위에서 에너지 띵간격을 변화시킬 수 있다 [9, 10]. 그림 3에는 CdS-CdSe 연속고용체 나노선의 SEM 사진, X-선 회절분석패턴 및 PL 스펙트럼을 나타내었다. CdS-CdSe 연속고용체 나노선은 CdS와 CdSe의 상분리 없이 완전한 화합물 고용체를 이루고 있으며, CdSe 함량이 증가함에 따라 회절 피크들은 고각 쪽으로 이동하였다. 또한 CdS-CdSe 연속고용체 나노선의 에너지 띵간격은 조성비에 따라 가시광영역 전체범위에 해당하는 1.74 ~ 2.45 eV 범위에서 변화하였다. S와 Se의 조성변동에 의하여 베가드 법칙 (Vegard's Law) [12]을 따라 두 물질이 고용된 결정의 격자상수가 변화되고, 이는 에너지 띵간격의 변화를 초래한다.

또 다른 예로, 그림 4와 같이 ZnS-ZnSe 연속고용체 나노선을 들 수 있다. PL 스펙트럼을 통해서 ZnS-ZnSe 연속고용체 나노선의 에너지 띵간격이 3.67 eV의 자외선에서 2.67 eV의 청색영역의 범위로 변조된 것을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 4. PLD법에 의해 합성된 ZnS-ZnSe 연속고용체 나노선의 X-선 회절분석패턴 및 PL 스펙트럼.

3. 반도체 나노선 기반의 가스센서

반도체형 가스센서는 감응물질의 표면에 가스분자들의 흡·탈착에 의한 저항의 변화를 이용하여 유해가스를 측정하는 원리에 의해 구동된다. 이러한 반도체형 가스감응물질로는 대표적으로 SnO₂, ZnO, WO₃ 등의 산화물 분말이 상용화되고 있다.

박막이나 벌크에서의 가스센서 특성은 감응물질의 입자표면과 가스분자의 흡·탈착 과정에 의해 생기는 현상이므로 입자크기를 작게 만들어 비표면적을 극대화하거나 Pt 또는 Pd 등의 귀금속을 첨가하여 그 특성을 증가시킬 수 있다. 그러나 이러한 박막이나 벌크에서 입자크기의 감소는 한계가 있다. 최근 나노선 또는 나노벨트 등과 같은 저차원 나노구



조체는 고비표면적, 탁월한 단결정성, 나노스케일의 크기 등 다양한 물리적, 화학적 특성으로 인하여 표면의 현상을 이용하는 가스센서 등과 같은 전자소자에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

나노선은 표면적 대 부피비가 크고 두께가 50 nm 정도되기 때문에 가스의 노출에 따른 전자공핍층 두께변화가 나노선의 전체 전기전도도를 크게 변화시킨다. 나노선의 경우 대개 지름이 50 ~ 100 nm로서 가스의 흡착과정에서 흡착에 의한 공핍층 형성이 나노선의 지름과 비슷한 크기로 일어나게 되어 결국 큰 가스감응감도를 나타낸다고 보고되고 있다 [13].

현재 보고되고 있는 반도체 나노선 기반의 전자소자들은 단일 나노선을 이용한 소자제작에 집중되고 있으며, 상용화를 위해 몇 가지 해결해야 할 과제를 내포하고 있다. 먼저, 대부분 소자제작을 위해 분산 및 정렬 등의 후공정이 필요하며, 전극부착을 위해 고비용의 전자빔 리소그래피 (E-beam Lithography) 등의 기법이 동원되어야 한다는 것이다. 또한 개별 나노선에 대하여 일일이 전극부착 작업을 해주어야 하므로 다중의 소자를 일괄제작하지 못하는 단점이 있다. 이러한 이유로 현재 나노선을 이용한 소자 및 제품들은 거의 상용화되지 못하고 있다.

당 연구실에서는 나노선 하나하나에 대한 개별적인 전자빔 리소그래피 등의 공정없이 제조공정을 단순화하고 다중의 소자를 일괄 제작 가능한 나노선기반의 가스센서를 보고하였으며 [14], 이를 간략하게 소개하겠다.

기존의 분말을 이용한 반도체형 가스센서의 경우 두 전극 사이에 분말이 채워져 있어 바닥 기판과의 저항층 형성으로 인한 가스감응 특성 저하가 불가피하다. 따라서 바닥 층의 효과를 제거하기 위해서 그림 5(a)와 같이 나노선을 공중에 부양시켜 기판의 영향을 최소화하고 나노선과 나노선을 통해 전기전도가 이루어지도록 설계하였다. 그림 5(b)에는 실제 SnO₂ 나노선 가스센서의 SEM 사진을 나타내었으며, 바닥층 위로 나노선이 공중 부양되어 네트워크 형태로 연결된 것을 보여준다. 그림 5(b)에는 200 °C

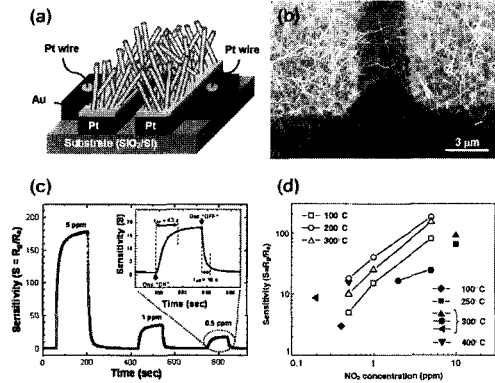


그림 5. 두 전극 사이로 나노선이 공중 부양된 형태를 가지는 SnO₂ 나노선 가스센서의 삽화사진, SEM 사진 및 NO₂ 가스 감응특성.

에서 측정된 NO₂ 가스에 대한 SnO₂ 나노선의 가스센서 특성을 나타내었다. 반응온도가 200 °C에서 가장 우수한 센싱 특성을 얻었으며, NO₂ 가스의 농도가 5 ppm인 경우 180 이상의 우수한 가스감도, 90 % 반응속도 및 회복속도는 10초 내외로 측정되었다. 또한 NO₂ 가스의 농도가 증가할수록 높은 감도 특성을 보이고 있다. 이러한 결과는 그림 5(d)와 같이 기존에 보고된 SnO₂ 나노선 또는 나노벨트 기반의 가스센서의 감도 특성에 비해서 향상된 결과임을 알 수 있다.

4. 반도체 나노선 기반의 광센서

2002년 University of California at Berkeley의 P. Yang 그룹에서 단일 ZnO 나노선을 이용한 광검출기가 구현된 이래로 [15], 최근 University of Hong Kong의 Lee 그룹을 중심으로 나노선 기반의 광센서에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다 [16]. 기존 연구를 통해서 보고된 반도체 나노선 기반의 광센서 소자는 전극패치 사이에 한 개의 나노선을 위치시키고 특정 파장의 광을 조사시켜 나노선 전기저항의 변화를 측정한다. 그러나 기존 연구결과에 의하면 한 개의 나노선을 전극패치 사이에 위치시키는 방법

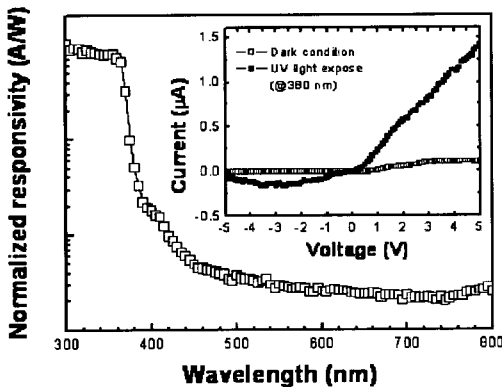
으로 측정된 전기저항은 자외선 노출에 의해 무한대에서 수 백 M Ω 수준으로 감소하는 것으로 보고되었다. 이러한 개별 나노선을 사용한 광센서의 제조는 높은 단가와 낮은 수율 등의 이유로 실현이 불가능하다.

당 연구실에서는 나노선 광센서 제조의 현실성을 극복하기 위하여 전극 탑재방식에 의한 나노선 광센서를 제작하여 그 특성을 평가하는 연구를 수행하였다. 실험적 모델로서 나노선 기반의 광센서 소자를 제작, 평가하여 반도체 나노선 기반의 광센서 소자로서의 가능성을 확인하였다.

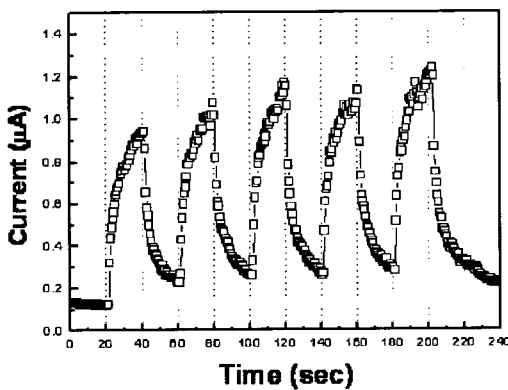
나노선 기반의 광센서 소자는 노광 (Photo-

lithography)공정을 이용하여 전극과 전극 사이의 거리가 10 μm 인 스트립 형태의 IDE 전극 (Interdigitized Electrodes)을 제작하였으며, 전극 위에 나노선을 분주한 후 교류전압을 인가하여 전극 위에 나노선을 정렬시켰다. 제작된 나노선 기반의 광센서 소자는 광원으로부터 분리된 특정 파장을 조사하면 광전류 (Photocurrent)값의 변화를 측정하였다.

그림 6(a)에는 파장변화에 따른 ZnO 나노선의 광전류 감응곡선을 나타내었다. 파장 감응도 (Spectral Responsivity)는 파장스캔을 통해 측정된 전류를 광량측정기를 이용하여 측정된 빛의 Power로 나누어 계산하였다. ZnO 나노선의 광전류 감응곡선은 에너지 띠간격에 해당되는 부근에서 급격한 광전류 값의 감소를 나타내었으며, 이러한 결과는 PL, CL 및 UV-vis. 흡수 스펙트럼 등의 광학적 장치로 측정된 에너지 띠간격과 매우 잘 일치하였다. ZnO 에너지 띠간격에 해당되는 3.26 eV의 특정에너지가 조사된 ZnO 나노선의 "ON/OFF"에 의한 동적인 거동은 그림 6(b)에 나타내었다. 특정에너지 조사 유무에 따라 ZnO 나노선의 광감응도는 최대 8배 정도의 차이를 보였으며, ZnO 나노선을 이용한 광센서가 특정에너지에서 작동한다는 것을 의미한다.



(a)



(b)

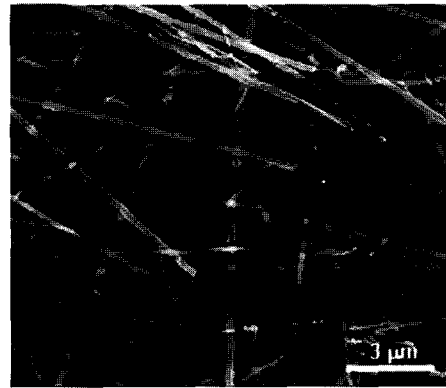
그림 6. ZnO 나노선 광센서의 광전류 감응특성.

5. 반도체 나노선 기반의 FED 소자

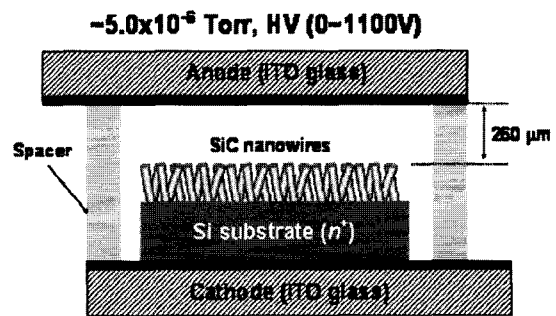
또 다른 나노선 기반의 소자응용 사례로 FED (Field Emission Display)의 전계방출 캐소드가 있다. 현재 전계방출 캐소드물질로는 Mo, Si, W 등이 많이 사용되고 있으나, 장시간 작동에 따른 캐소드 물질의 수명과 안정성에 큰 문제가 있고, 전자방출 효율이 좋지 못하기 때문에 높은 전도성과 예리한 팁의 형상을 가진 탄소나노튜브 (Carbon Nanotubes, CNT)를 전계방출 캐소드 에미터 팁으로 사용하려는 연구가 가장 크게 주목을 받고 있다 [17]. 이와 같은 캐소드 물질의 문제점을 극복하기 위한 대체 물질로, 최근 탄소나노튜브와 같은 종횡비가 큰 일차원 나노물질을 기반으로 하는 나노기술을

캐소드에 접목하는 연구가 활발히 진행 중에 있으나, 내구성과 열적 안정성이 약하다는 단점이 제기되고 있다. 한편, 최적의 전계방출용 캐소드 물질은 저일함수값을 가지며, 내구성과 열적 안정성이 우수하며, 전계방출 특성이 우수하여야 한다. 이를 위해서는 전계방출용 캐소드 물질의 팁의 지름이 최대한 작고, 날카로워야 우수한 전계방출 특성을 가질 수 있다. 따라서 기존의 Mo, Si 및 탄소나노튜브 등의 전계방출 캐소드 대체 물질로, 저일함수값을 가지며, 내구성과 열적 안정성이 우수하고 종횡비가 큰 형상학적인 특징을 가지는 나노선을 이용하여 낮은 구동 전압과 전계향상계수 (Field Enhancement Factor, β)를 향상시키려는 연구가 진행되고 있다.

이러한 요구에 따라 당 연구실에서는 나노선 기반의 전계방출 소자를 제작하고 그 특성을 평가하는 연구를 수행하였다 [18]. 그림 7에는 MOCVD법으로 합성된 SiC 나노선의 SEM 사진과 전계방출 측정 장치 개략도를 나타내었다. 합성된 나노선의 직경은 대략 100~200 nm 정도이며, 그 길이는 수 십에서 수 백 μm 이다. 그림 8에는 SiC 나노선의 전계방출 특성을 나타내었다. SiC 나노선의 전계방출 특성은 "Flat screen" 법을 이용하여 10^{-6} Torr 이하의 고진공 하에서 측정하였다. 그림과 같이 SiC 나노선의 전계방출 특성은 $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 이상의 전류가 흐르는데 필요한 구동 전압은 $\sim 1.8 \text{ V}/\mu\text{m}$ 이었으며, $1 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 이상의 전류가 흐르는 필요한 구동 전압은 $\sim 2.5 \text{ V}/\mu\text{m}$ 이하로 낮은 구동 전압에도 우수한 전계방출 특성을 나타내었다. 또한 파울러-노드하임(Fowler-Nordheim) 그래프의 기울기가 직선 형태로 나타났으며, 이는 균일한 직경, 일정한 길이의 형상을 가지고 있다는 것을 의미한다. 이와 같이 SiC 나노선은 물질 자체가 가지는 뛰어난 물성과 형상이 가지는 장점으로 인하여 낮은 구동전압과 높은 전계향상계수 (β)값을 나타내었다. 이러한 SiC 나노선의 전계방출 특성은 FED 소자화 응용에 있어서 그 가능성을 보여주고 있다.



(a)



(b)

그림 7. MOCVD법에 의해 합성된 SiC 나노선의 SEM 사진 및 전계방출 측정 장치의 개략도.

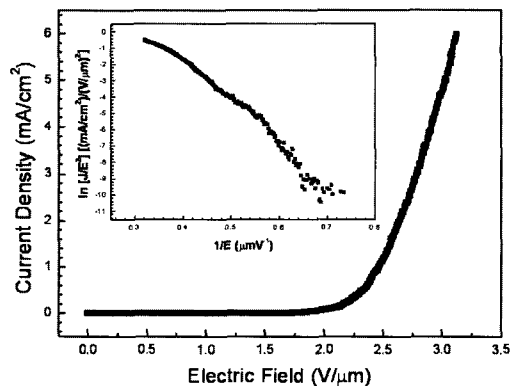


그림 8. SiC 나노선의 전계방출 특성.

6. 반도체 나노선 기반의 이차전지 전극 응용

화학에너지를 전기에너지로 바꾸는 장치인 전지는 기본 구성 재료의 종류와 특징에 따라 일차전지, 이차전지, 연료전지 그리고 태양전지 등으로 구분된다.

이차전지 중 리튬이온전지는 전하 나르개인 리튬이온과 전자가 양극과 음극을 왕복 이동하는 원리를 기본으로, 방전 시에는 리튬이온과 전자가 양극으로 이동하여 음극 활물질에 삽입되고, 충전 시에는 이들이 음극 활물질로부터 탈리되어 양극 활물질에 삽입되는 일련의 과정을 반복하게 된다.

리튬이온전지가 용량이 크고 충·방전에 대한 사이클 안정성이 우수하기 위해서는 사용되는 음극과 양극 활물질이 리튬과 반응하기에 적절한 결정구조를 갖고 전기적 성질이 뛰어나야 한다. 또한 활물질과 전해질 간의 부차반응 (Side-reaction)이 없고, 충·방전 시 발생하는 활물질 격자의 파괴변화가 작아야 한다. 음극 활물질 중에서 위와 같이 요구되는 특성 중 상당부분을 충족시키는 대표적인 물질로 인조 흑연과 천연흑연 등 탄소계 물질이 광범위하게 연구되고 있으나, 탄소계 물질들이 갖는 한계로 인해 새로운 음극 활물질에 대한 연구가 학계 및 산업계 전

반에 걸쳐 요구되고 있다.

일차원 나노선은 표면적 대 부피비가 크고 높은 결정성을 가지고 있으므로 리튬이온과 전자의 이동이 나노분말에 비해 상대적으로 훨씬 더 용이하고 전극과 전해질 간의 넓은 표면적, 짧은 화학 확산 길이, 고용량 등의 이유로 고용량, 고출력이 가능하다고 보고되고 있다. 이와 같은 이유로 최근 일차원 형상을 가지는 탄소나노튜브, TiO_2 나노선, SnO_2 나노선 등 신규 음극활물질이 적용되어 기존의 활물질에 비해 우수한 리튬이온 이차전지 특성을 가지는 연구가 보고되고 있다 [19]. 특히 SnO_2 는 전이 금속 산화

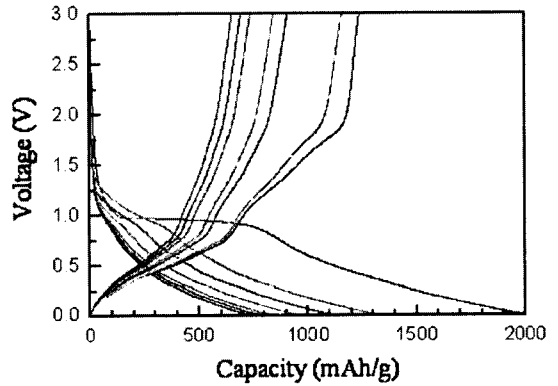
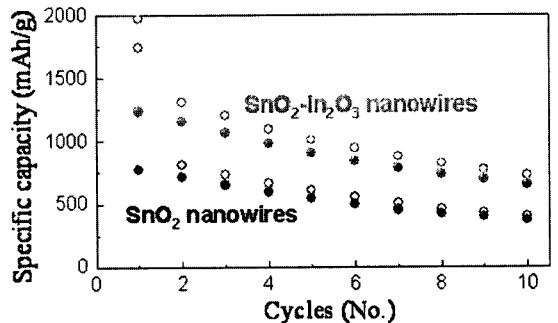


그림 9. 코어-셸 구조의 $\text{SnO}_2\text{-In}_2\text{O}_3$ 나노선의 TEM 격자사진.

(a)



(b)

그림 10. 코어-셸 구조의 $\text{SnO}_2\text{-In}_2\text{O}_3$ 나노선의 충·방전 반복 사이클 특성 및 방전용량.



물이기 때문에 일차원 나노선 형상을 가졌을 때 향상된 음극활물질로써 특성을 가지는 것으로 보고되고 있다.

당 연구실에서는 이러한 연구 방향에 발맞추어 일차원 나노선을 이차전지 전극 재료로 응용하는 연구를 수행하였으며, 그 결과 코어-셸 (Core-shell) 형태의 $\text{SnO}_2\text{-In}_2\text{O}_3$ 나노선 기반의 이차전지 응용에 대한 연구결과를 저명한 국외학회지에 발표하였다 [20].

그림 9에는 코어-셸 형태의 $\text{SnO}_2\text{-In}_2\text{O}_3$ 나노선의 TEM 격자사진을 보여주고 있다. TEM 격자사진에서 확인할 수 있듯이 나노선의 중심은 SnO_2 , 나노선의 표면은 In_2O_3 로 구성되어 있으며, SnO_2 와 In_2O_3 사이의 입계 층 (Gain Boundary Layer)은 SnO_2 와 In_2O_3 의 화합물이 형성된 것을 알 수 있다. 그림 10에는 코어-셸 형태의 $\text{SnO}_2\text{-In}_2\text{O}_3$ 나노선 음극활물질의 이차전지 충·방전 반복 사이클 특성 및 방전용량을 나타내었다. SnO_2 나노선에 비해 코어-셸 형태의 $\text{SnO}_2\text{-In}_2\text{O}_3$ 나노선은 뛰어난 전기적 특성으로 인하여 높은 방전용량값을 나타낸다. 이와 같이 본 연구를 통해 합성된 코어-셸 형태의 $\text{SnO}_2\text{-In}_2\text{O}_3$ 나노선 음극활물질은 물질 자체가 가지는 뛰어난 전기전도도와 높은 비표면적 등의 형상이 가지는 장점으로 인하여 사이클 안정성 및 방전용량이 우수한 특성을 나타내었으며, 향후 고분자 이차전지, 슈퍼 커패시터, 열전소자 등의 전기화학분야 소자에 적용 가능할 것으로 예상된다.

형상으로 나노선을 배향하고 정렬하는 방법에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이러한 일련의 연구 내용은 종국적으로 나노선을 이용한 소자응용에 초점이 맞추어져 있으며 최근에는 소자화 모델에 대한 보고가 증가되고 있는 추세에 있다.

이러한 연구들에 기초하여 나노선 기반의 소자 응용 기술이 반도체 공정과 접목될 수 있을 정도의 경제성을 가진 수준으로 발전하기 위해서는 다양한 문제점을 극복해야 한다. 먼저 일차원 나노선의 구조와 그에 따른 물성에 대한 재현성 있는 제어 기술을 최우선적으로 해결되어야 한다. 이를 위해서는 나노선 자체의 열역학적, 동역학적, 전기화학적, 형상학적 관점에서 이루어지는 기초 연구에 대한 심도 있는 연구가 필수적이다. 두 번째로 나노선의 소자화, 산업화를 위하여 나노선을 원하는 위치에 정렬하는 얼라인먼트 기술과 단일 나노선 또는 나노선 다발을 이용한 나노 소자 구현을 실험실 수준에서 산업적인 규모의 대량 제조 수준으로 확대하는 공정 기술이 절실히 요구된다. 이러한 기초지식, 제어 기술, 그리고 공정 기술의 확립을 통해 나노선이 경제성을 가진 수준에서 차세대 신소재로서 자리매김할 수 있으며, 보다 조직적인 연구개발 노력을 통하여 나노선을 이용한 소자 기술은 차세대 산업 기술이 될 가능성이 확보될 것이다.

참고 문헌

7. 향후 반도체 나노선의 연구 전망

지금까지의 반도체 나노선 연구는 다양한 물리적, 화학적 방법을 통해 다양한 종류의 나노선을 합성하고 도핑 또는 조성변조 등을 통해 새로운 물리적, 화학적, 전기적 특성을 관찰하는 연구가 주로 진행되어 왔다. 이와 더불어 나노선의 소자화, 제품화를 실현하기 위한 연구로서 자기정렬 (Self-align), 자기조립 (Self-assembly), Langmuir-blodgett법 및 Soft Molding법 등을 이용하여 원하는 위치, 원하는

- [1] Y. Xia et al., Adv. Mater., Vol. 15, p. 353, 2003.
- [2] F. Patolsky et al., Science, Vol. 313, p. 1100 2006.
- [3] J. Goldberger et al., Nano Letters, Vol. 6, p. 973 2006.
- [4] W. Z. Pan et al., Science, Vol. 291, p. 1947 2001.
- [5] J. H. Park, et al., J. Mater. Chem., Vol. 14, p. 1 2004.
- [6] Y. J. Choi et al., J. Kor. Phys. Soc. Vol. 49, p. 1152 2006.
- [7] Y. J. Choi et al., J. Mater. Res., Vol. 20, p. 959 2005.
- [8] J. H. Park et al., J. Crystal Growth, Vol. 276, p. 171 2005.
- [9] S. Joon Kwon et al., Phys. Rev. B, Vol. 72, p. 1 2005.

- [10] Y. J. Choi et al., Nanotechnology, Vol. 17, p. 3775 2006.
- [11] R. S. Wangner, Appl. Phys. Lett., Vol. 4, p. 89 1964.
- [12] L. Vegard, Z. Phys. Vol. 5, p. 17 1921.
- [13] A. Kolmakov et al., Adv. Mater., Vol. 15, p. 997 2003.
- [14] Y. J. Choi et al., Nanotechnology, Vol. 19, p. 095508 2008.
- [15] H. Kind et al., Adv. Mater., Vol. 14, p. 158 2002.
- [16] J. S. Jie et al., Nano Lett., Vo. 16, p. 1887 2006.
- [17] Nai Gui Shang et al., Adv. Mater., Vol. 14, p. 1308 2002.
- [18] Y. J. Choi et al., Korean Patent, submission code: 10-2006-0113643, 2006.
- [19] P. G. Bruce et al., Adv. Mater., Vol. 18, p. 2597 2006.
- [20] D. W. Kim et al., Nano Lett., Vol. 7, p. 3041 2007.

저자약력



성명 : 최영진

- ◆ 학력
 - 2001년 서울산업대 재료공학과 공학사
 - 2003년 고려대 대학원 재료공학과 공학석사
 - 2007년 고려대 대학원 재료공학과 공학박사

- ◆ 경력
 - 2007년 - 현재

KIST 나노과학연구본부 나노재료연구센터 박사 후 연구원



성명 : 김동완

- ◆ 학력
 - 1995년 서울대 무기재료공학과 공학사
 - 1997년 서울대 대학원 재료공학부 공학석사
 - 2001년 서울대 대학원 재료공학부 공학박사

- ◆ 경력
 - 2001년 - 2003년 서울대 신소재공동연구소 박사 후 연구원
 - 2003년 - 2005년 MIT 재료공학과 박사 후 연구원
 - 2005년 - 현재 KIST 나노과학연구본부 나노재료연구센터 선임연구원



성명 : 최경진

- ◆ 학력
 - 1996년 서울대 무기재료공학과 공학사
 - 1998년 포스텍 대학원 재료금속공학과 공학석사
 - 2001년 포스텍 대학원 신소재공학과 공학박사

- ◆ 경력
 - 2002년 - 2006년 Univ. of Wisconsin-Madison 박사 후 연구원
 - 2006년 - 현재 KIST 나노과학연구본부 나노재료연구센터 선임연구원



성명 : 박재관

- ◆ 학력
 - 1982년 서울대 요업공학과 공학사
 - 1984년 서울대 대학원 무기재료공학과 공학석사
 - 1995년 Alfred Univ. 공학박사

- ◆ 경력
 - 1985년 - 현재 KIST 책임연구원
 - 2007년 - 현재 KIST 나노과학연구본부 나노재료연구센터장

