

기상휘발법에 의한 이산화규소 나노와이어의 성장

노대호[†] · 김재수* · 변동진 · 이재훈** · 양재웅*** · 김나리 · 조성일

고려대학교 재료공학과

*한국과학기술연구원 금속공정연구센터

**한국생산기술연구원 신소재본부

***대진대학교 신소재공학과

Growth of SiO₂ nanowire by Vapor Phase Evaporation

Rho Dae-Ho[†], Kim Jae-Soo*, Byun Dong-Jin, Lee Jae-Hoon**,
Yang Jae-Woong***, Kim Na-Ri and Cho Sung-Il

Korea University, Department of Materials Science and Engineering

*Korea Institute of Science and Technology, Metal Processing Research Center

**Korea Institute of Industrial Technology, Advanced Materials Center

***Dajin University, Department of Advanced Materials Science and Technology

(2004년 3월 8일 받음, 2004년 7월 13일 최종수정본 받음)

Abstract SiO₂ nanowires were synthesized using the vapor evaporation method. Grown nanowires had a different shapes by kind of substrates. Diameters and lengths of the nanowires increased with increasing growth temperature and time. Mean diameters and lengths of SiO₂ nanowire were different by kind of substrates. These variations were attributed to nanowire densities on the substrates. The kind of substrates affected microstructure and PL properties of grown nanowires. In case of Al₂O₃ and quartz substrates, additional O₂ were supported during growth stages, and made a nucleation site. Therefore relative narrow nanowire was grown on Al₂O₃ and quartz substrates. Optical property were measured by photoluminescence spectroscopy. Relatively broad peak was obtained and mean peak positioned at 450 and 420nm. however in case of quartz substrates, mean peak positioned at 370nm. These peak shift was contributed to the size and substrate effects.

Key words SiO₂ nanowire, SiO₂, nanowire, Al₂O₃, Quartz

1. 서 론

기존의 bulk 재료에 비하여 나노크기를 가지는 재료들의 우수한 물리·화학적 특성이 증명되고 구현됨에 따라 나노크기를 가지는 재료들의 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 1991년에 탄소 나노튜브의 발견이후,¹⁾ 나노튜브, 나노와이어와 나노로드의 연구가 활발히 진행되었다. 탄소나노튜브이외에 여러 가지 탄화물, 산화물, 질화물 등의 나노와이어와 로드 연구가 활발히 진행되었다. 대표적인 물질로서 질화갈륨,²⁾ 탄화규소,³⁾ 산화이연,⁴⁾ 이산화규소⁵⁾ 등이 있다. 이 중에서 이산화규소 나노와이어의 경우, 최근에 청색발광현상이 관찰됨에 따라 많은 관심을 받고 있으며, 차세대 광학소자 및, scanning near field optical microscope의 high resolution optical head로서 사용이 기대되고 있다.⁶⁾

이산화규소 나노와이어를 제조하기 위하여 여러 가지 방법이 사용되었다. 대표적으로 laser ablation,⁶⁾ catalyzed thermal decomposition,⁷⁾ carbothermal reduction⁸⁾과 sublimation⁹⁾ 등이 있다. 이러한 제조방법들은 대부분 분말형태의 나노와이어를 제조함으로써 복합재료의 첨가제로서는 사용가능하나, 전자소자로서 사용하기 위하여 많은 후공정을 거쳐야 한다. 따라서 최근에는 기판위에 이산화규소 나노와이어를 성장시키기 위한 시도가 Wang¹⁰⁾과 Pan¹¹⁾에 의하여 이루어졌다. 이러한 연구에 의하여 기판에 이산화규소 나노와이어를 성장시킴으로서 bottom up 방식으로 나노와이어를 이용한 전자소자를 제작할 수 있는 가능성을 제시하고 있다.

본 연구에서는 손쉽게 이산화규소 나노와이어를 기판위에 성장시키기 위하여, 기상휘발법을 사용하였다. 또한 Si 외에 다른 기판을 사용함으로써 나노와이어의 성장에 미치는 기판의 영향을 관찰하였으며, 미세구조의 변화를 관찰하였다.

[†]E-Mail : myfudr2@hanmail.net

2. 실험 방법

이산화규소 나노와이어를 규소 기판위에 성장시키기 위하여 탄화규소를 열원으로 사용하는 수평관상로를 사용하였다. 반응관으로는 석영관을 사용하였다. 이산화규소의 원료로서 Si(99.999%, 325mesh, Aldrich Co.)와 이산화규소(99.99%, 325mesh, Junsei Co.)의 혼합물을 사용하였다. 우선 각각의 분말을 1:1 무게 비율로 혼합한 후 ball mill을 사용하여, 720rpm의 속도로 약 2시간 동안 혼합하였다. 금속촉매를 분말원료 위에 코팅하기 위하여 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (99.999% Aldrich Co.)를 isopropylalcohol에 0.05mol%의 비율로 용해시켜 현탁액을 만들었다. 제조된 현탁액 안에 Si와 이산화규소 혼합물을 첨가한 후 2시간 동안 혼합하였다. Si와 SiO_2 혼합물이 첨가된 현탁액을 hot plate를 사용하여 120°C로 유지시켜 수분을 제거함으로써, 분말혼합물 표면에 금속촉매를 코팅시켰다. 생성된 반응원료를 알루미늄나 도가니 가운데에 2g 넣은 후, 45°의 기울기로 기판을 알루미늄나 도가니의 한쪽에 배치하였다. 반응원료와 기판이 놓여진 알루미늄나 도가니를 반응노 내부에 장입한 후, 노를 가열하기 전에 반응관에 안에 잔류되어 있는 산소와 불순물을 제거하기 위하여 Ar(99.999%)을 1slm의 유량으로 약 10분간 흘려주었다. 그 후 2시간 동안 반응온도까지 가열시킨 후 2~20시간 동안 실험조건에 따라 유지시킨 후 노냉하였다. 분위기 가스로서 Ar을 20 sccm 흘려주었으며, Ar의 유량은 MFC(Mass Flow Controller)를 사용하여 조절하였다. 이산화규소 나노와이어를 성장시키기 위한 기판으로서 1 cm × 1 cm로 절단된 Si (100, p-type), 알루미늄나와 고순도 석영을 사용하였다.

제조된 이산화규소 나노와이어의 미세구조는 FE-SEM(Field Emission-Scanning Electron Microscope, S-4200, Hitachi Co.)와 STEM(Scanning Transmission Electron Microscope, CM-30, Phillips Co.)을 사용하여 분석하였다. 또한 이산화규소 나노와이어의 광학적 특성을 관찰하기 위하여 YAG laser ($\lambda = 355 \text{ nm}$)를 사용하여 상온에서 PL(Photoluminescence)를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 서로 다른 기판을 사용하여 성장된 이산화규소 나노와이어의 형상을 관찰한 결과이다. 기판의 종류와 관계없이 거의 유사한 형상을 가지고 있음을 알 수 있으며, 모두 기판에 접착되어 성장되었음을 알 수 있다. Fig. 1의 (a)와 (c)에 화살표로 나타낸 것처럼, 금속으로 이루어진 칩단 부분이 존재함에 따라서 VLS(vapor-liquid-solid) 성장기구¹²⁾로 성장됨을 알 수 있다. 이러한 VLS 성장기구는 금속촉매의 도입을 통한 나노와이어의 성장

을 설명하는 것으로서 일반적으로 SiC ,¹³⁾ SiCN , Si 나노와이어와 나노로드 등의 성장에서 찾아볼 수 있다. 사용되는 촉매의 종류로서는 Fe, Ni, Cr 등이 있으며, 촉매의 종류와 증착방법에 따라 성장방향이 달라지며, 성장된 나노와이어의 특성이 달라진다.¹³⁾ 본 연구에서 사용된 촉매는 Fe이며, 코팅과정을 통하여 질화물과 수화물이 모두 휘발되어 Fe만이 존재하게 된다. 그러나 코팅방법을 통하여 얻어진 Fe 촉매는 laser ablation방법에서 사용되는 Fe 분말과는 다른 특성을 가진다. 그 이유는 코팅과정을 거쳐 얻어진 Fe 촉매의 경우 매우 작은 크기로 반응 분말에 흡착된 상태이며, 수화물과 질화물의 휘발과정에서 broken bond가 많이 형성됨으로서 반응원료와의 흡착성이 높다. 이러한 형상은 Fe의 휘발점을 낮추게 되어 낮은 온도에서 쉽게 휘발가능하다. 따라서 SiO 가스의 휘발온도¹⁴⁾인 1000°C 보다 낮은 온도에서 휘발된 Fe가 먼저 기판위에 쉽게 응착되고, 응착된 입자는 적은 크기를 가질 수 있다. 또한 공급되는 SiO 가스가 액상상태의 촉매위에 흡착이 쉽게 일어날 수 있어, 나노와이어의 성장이 손쉽게 일어날 수 있다. 분말을 원료물질과 같이 혼합하여 사용하는 경우, 첨가되는 입자의 크기에 따라 일정한 온도 이상이 되어야 액상의 촉매가 만들어지며 그 온도는 Fe의 경우 약 1300~1600°C 정도이다. 그러나 본 연구와 같이 코팅방법에 의해 금속촉매를 입힌 경우, 반응온도를 상당히 낮출 수 있다.

본 연구에 의한 이산화규소 나노와이어의 성장은 전형적인 VLS 성장기구로 설명가능하다.⁵⁾ 먼저 고온에서 Fe와 Si과 이산화규소 분말의 혼합물에서 발생된 SiO 가스가 분위기 가스로 공급된 Ar에 의하여 기판위에 도달하게 된다. 기판위에 도달된 Fe가 먼저 기판위에 열 응집되고, 응집된 Fe 위에 SiO가스가 흡착된다. Fe에 흡착된 SiO 가스는 액상상태의 Fe 내부로 확산하게 된다. 이때 Fe 내부는 Fe-Si-O의 화합물 상태가 된다. Fe 내부에 일정농도 이상으로 Si와 O가 과포화 되면, 일정 방향으로 Si와 O가 SiO_2 형태로 석출된다. 이러한 석출과정이 연속적으로 진행되어 나노와이어나 로드 형태로 성장하게 된다. 이때 석출되는 방향에 따라 tip growth¹⁵⁾와 bottom growth¹⁶⁾로 나뉜다. Tip growth의 경우 금속촉매의 아래부분으로 석출이 발생되며, 성장된 후, 나노와이어나 로드의 끝부분에 금속촉매가 존재한다. 대부분 탄화물, 질화물 나노와이어의 성장에서 일어난다. 이와는 반대로, 촉매의 윗부분으로 석출이 일어나는 경우를 bottom growth라 하며 탄소나노튜브의 경우에 주로 발견된다. Fig. 1의 (a)와 (c)에서 보이는 것처럼, 성장된 나노와이어의 칩단 부분에 구형의 tip이 관찰됨으로서, tip growth mechanism에 의해 성장되었음을 확인할 수 있다.

성장에 사용된 기판의 종류에 따라 성장된 나노와이어가 약간 다른 형상을 가짐을 확인할 수 있었다. Si 기

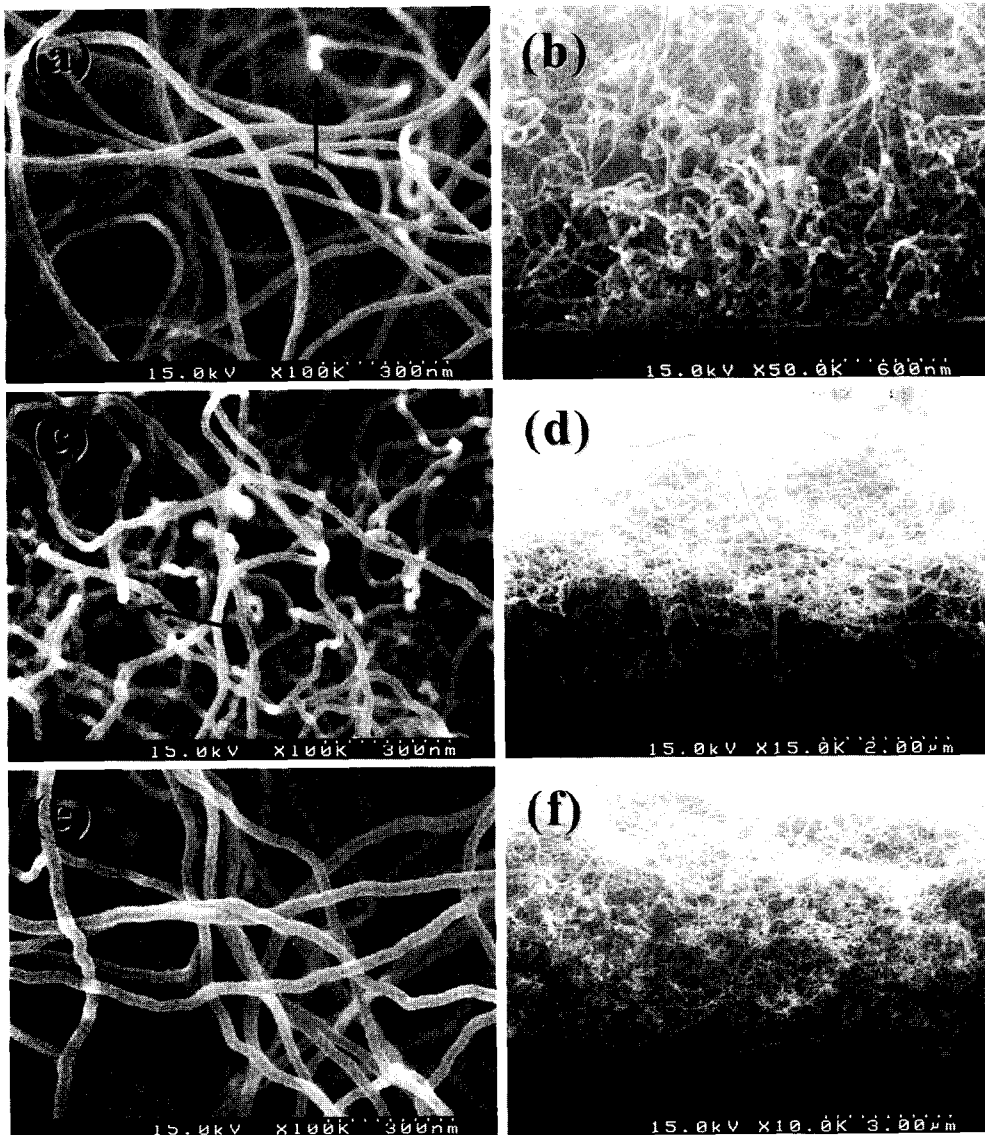


Fig. 1. SEM images of SiO₂ nanowires. (a) plane view of SiO₂ nanowires grown on Si, (b) cross-section view of SiO₂ nanowires grown on Si, (c) plane view of SiO₂ nanowires grown on quartz, (d) cross-section view of SiO₂ nanowires grown on quartz, (e) plane view of SiO₂ nanowires grown on Al₂O₃, (f) cross-section view of SiO₂ nanowires grown on Al₂O₃.

판에 성장된 경우(Fig. 1(a), (b)) 상대적으로 직선적으로 성장되었으며, 성장밀도가 낮음을 알 수 있으나, 석영이나 알루미늄 기판위에 성장된 경우, 성장밀도가 상대적으로 높음을 확인 할 수 있었다. 성장된 나노와이어의 직경은 Si를 기판으로 사용한 경우 약 30 nm이고, 석영과 알루미늄을 기판으로 사용한 경우 약 25 nm로서 약간의 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 직경의 차이와 성장밀도의 차이는 반응 중 공급되는 상대적인 산소의 양에 기인한다고 생각된다. Si를 기판으로 사용한 경우, 산소의 공급원은 Si와 이산화규소 분말의 반응에서 생성된 SiO 가스 중 포함된 산소,¹⁴⁾ 분위기 가스로 공급된 Ar 가스내에 함유된 잔류 산소, 결합부에서 스며들어오는

산소 등으로 추정가능하다. 물론 대부분의 반응은 SiO 가스에서 공급되는 산소가 대부분의 반응산소로 사용된다.

Fig. 2는 1200°C의 반응온도에서 성장시간에 따라 성장된 이산화규소 나노와이어의 직경의 변화를 나타낸 것이다. 사용된 기판의 종류와 무관하게, 성장시간이 증가할수록 나노와이어의 직경이 증가함을 알 수 있었다. 반응시간이 300분 이상일 경우 거의 직경이 증가하지 않음을 관찰할 수 있었으며, 이 또한 기판의 종류와 무관하였다. 이러한 직경의 변화 경향은 mixed VLS 성장기구의 특징¹⁷⁾을 보여준다. 즉 초기에 석출에 의해 성장된 나노와이어의 표면에 공급되는 SiO 가스가 흡착되어 일정한 증가 경향을 보이게 된다. 그러나 일정한 반응시간

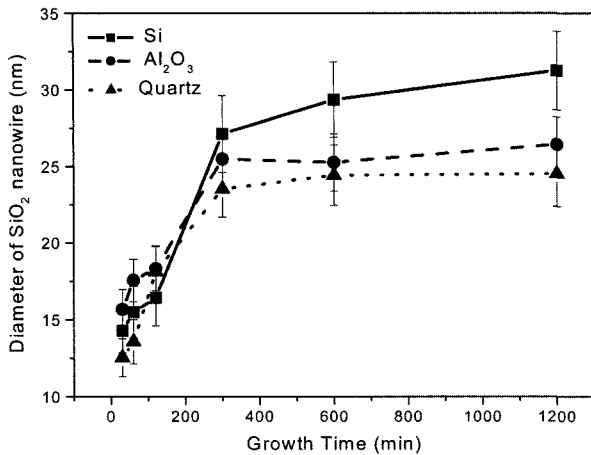


Fig. 2. Variations of diameter of SiO₂ nanowire with growth time and substrates.

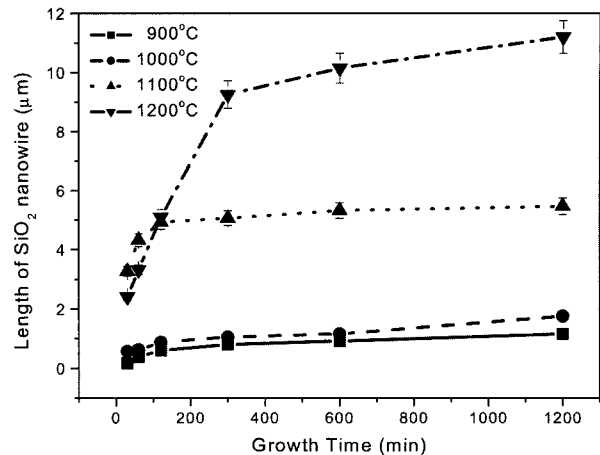


Fig. 3. Variations of length of SiO₂ nanowire with growth time and temperatures on Si.

이상에서는 표면에 흡착된 반응물들이 지속적으로 공급되는 에너지에 의하여 일부가 분해되고, 이 자리에 다시 흡착이 이루어지기 때문에 일정한 크기가 유지될 수 있다. 전체적인 이산화규소 나노와이어의 직경은 Si를 사용할 경우에 가장 크며, 알루미나와 석영을 기판으로 사용한 경우 적음을 알 수 있다. 이러한 경향은 성장속도와 성장밀도, 반응기구의 차이에 의한 것으로 여겨진다.

상대적인 성장속도의 차이를 관찰하기 위하여, Si를 기판으로 사용한 경우 반응온도에 따른 성장 길이의 변화를 살펴보았다. (Fig. 3) 온도가 증가할수록 성장된 나노와이어의 길이가 증가하는 경향을 보였다. 1000°C 이하에서 반응시간이 증가하여도 이산화규소 나노와이어의 길이가 거의 증가하지 않음을 알 수 있었으나, 1100°C에서는 반응시간이 120분 까지 급격한 증가를 보였으나, 그 후에는 거의 증가하지 않음을 알 수 있었다. 그러나 1200°C에서는 성장시간에 따라 성장된 나노와이어의 길이가 증가함을 알 수 있었다. 이러한 성장길이의 변화는 공급되는 에너지에 의해서 성장속도가 결정이 되고, 원료로 사용되는 SiO 가스의 발생 양과 밀접한 관련이 있다. 1000°C 이하에서는 적은 양의 SiO가스가 휘발된다. 또한 먼저 휘발되어 기판위에 응집된 Fe 촉매와의 상대적인 반응양이 적어서 매우 낮은 성장속도를 가진다. 그러나 1200°C에서는 충분한 SiO 가스가 발생되고, 초기에 VLS 성장기구에 의한 석출이 활발히 진행됨으로서 길이가 급격하게 증가한다.

Fig. 4는 1200°C에서 성장된 나노와이어의 길이를 반응시간과 사용된 기판의 종류에 따라 나타낸 것이다. 사용된 기판의 종류와는 무관하게 성장초기에 급격한 성장속도를 보이다가, 5시간 이후에 완만한 성장을 보임을 알 수 있었다. Si를 기판으로 사용한 경우, 이산화규소 나노와이어가 가장 길게 성장하였으며, 석영과 알루미나를

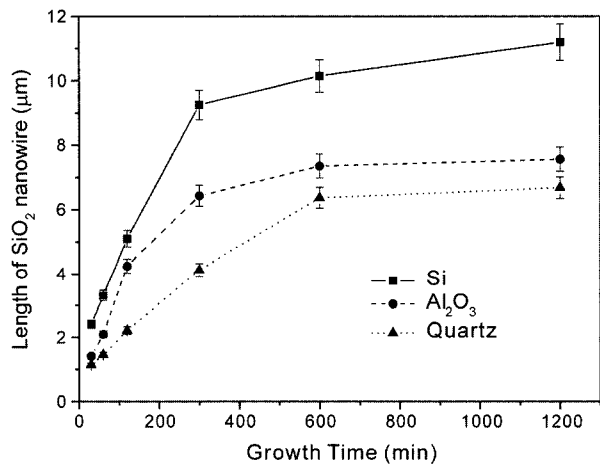


Fig. 4. Variations of length of SiO₂ nanowire with growth time and substrates.

기판으로 사용한 경우 유사함을 알 수 있었다. 이러한 성장 길이의 차이는 성장밀도와 관련이 있는 것으로 보여지며, 동일한 양의 반응원료가 도달하였을때, 석영과 알루미나를 기판으로 사용한 경우 상대적으로 높은 성장밀도를 가지고 있기 때문에 성장된 나노와이어의 길이가 적은 것으로 보여진다.

Fig. 5는 성장된 이산화규소 나노와이어를 스크래칭 기법으로 채취하여 투과전자현미경을 사용하여 관찰한 결과이다. 사용된 기판의 종류에 따라 아주 독특한 형상을 가짐을 알 수 있었다. Si위에 성장된 경우, 전형적인 VLS 성장기구에 의하여 성장된 것으로 관찰되었으며

Fig. 5(b)에서 보이듯이 tip growth에서 관찰되는 첨단 부분이 관찰되었다. EDS 분석 결과, 첨단부분은 Fe-Si-O로 구성되어 있음을 알 수 있었다. 또한 첨단 아래부분에 빈 공간이 관찰됨에 따라, 이산화규소의 석출경로를 예

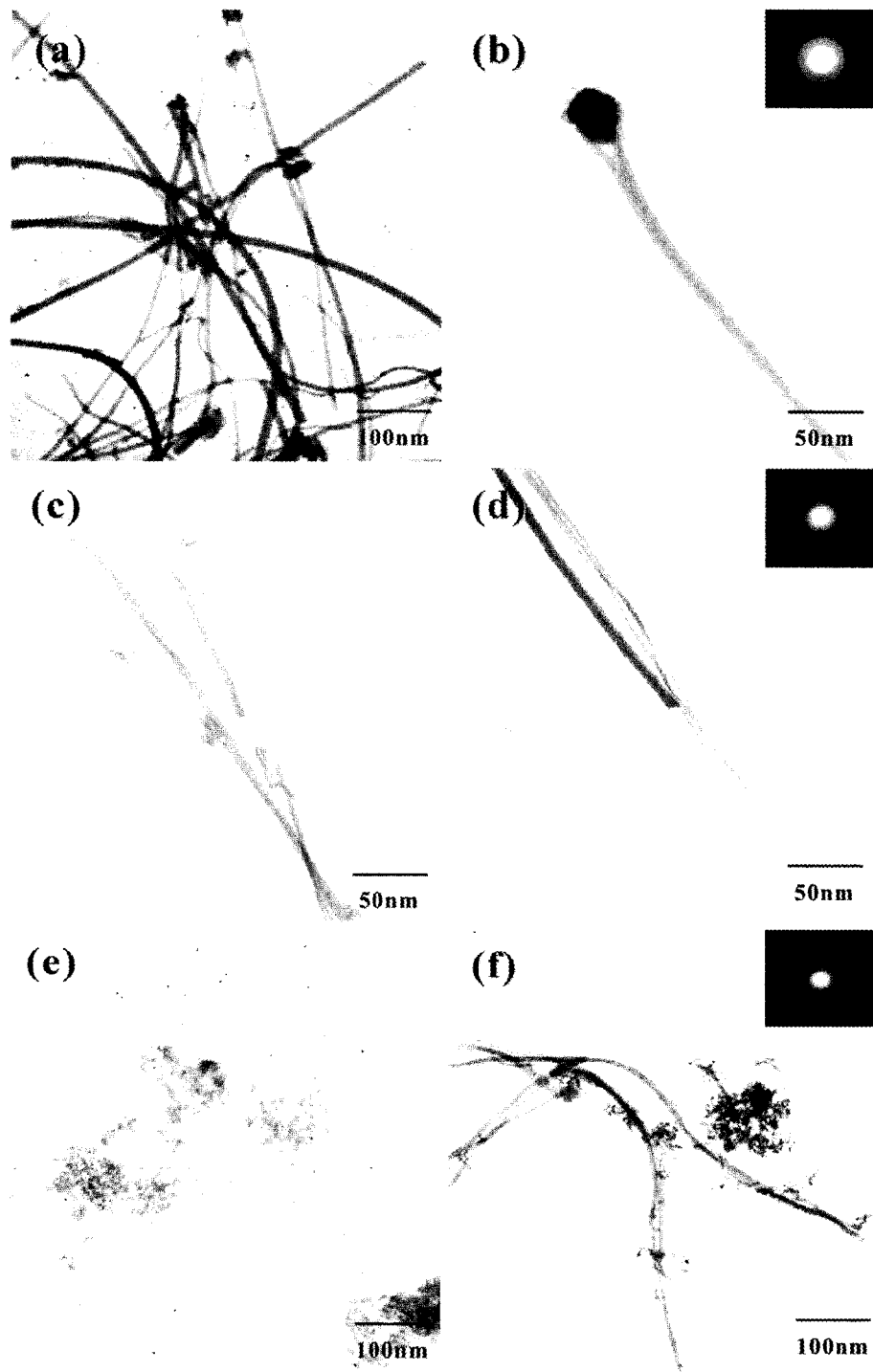


Fig. 5. TEM images of SiO₂ nanowires. (a), (b) SiO₂ nanowires grown on Si, (c), (d) SiO₂ nanowires grown on quartz, (e), (f) SiO₂ nanowires grown on Al₂O₃.

측할 수 있었다. 이러한 Fig. 5(b)와 같이 촉매 아래 부분에 hole이 존재하는 경우는 VLS 성장기구로서 설명이 가능하다. Fig. 6에 나타난 것 처럼 금속촉매 표면에 도달된 반응가스의 일부는 금속촉매 내부로 들어가서 과포화 상태를 이루지만, 나머지 반응가스는 표면에서 액

상화 되고 금속촉매의 아래 부분으로 표면을 따라 이동하게 된다. 이때 Fig. 6의 ①의 경로로 석출과정이 일어나면 tip growth, ③의 경로로 석출이 발생하면 base growth가 된다. Fig. 5(b)에 나타난 촉매 아래 부분의 빈 공간은 Fig. 6의 ②의 경로를 통하여 액화된 원료가스가

이동하는 것으로 여겨진다. 금속촉매의 아래 부분에서 표면을 따라 이동된 반응원료가 모이게 되고 이것이 일정한 직경으로 응집되면서 고상화 된다. 이러한 현상이 계속적으로 진행되면서 나노와이어로 성장하게 된다. 이때 촉매의 표면에서 이동된 액상이 응집될 때, 촉매와 인접한 부분에서 응집되지 않는 경향을 가지고 있어 촉매 아래 부분에 hole이 생성될 수 있다.

Fig. 5(c)와 (d)는 석영 기판위에서 성장된 나노와이어의 형상이다. 거의 직선형태의 나노와이어가 채취되었으며, Si 위에 성장된 경우보다 얇은 직경을 가지고 있음을 알 수 있었다. 또한 상대적으로 직경의 분포가 다양함을 알 수 있었다. 이러한 다양한 분포는 기판의 영향으로 여겨진다. 이러한 현상은 CNT-confined reaction에 의해 성장된 탄화규소 나노와이어에서도 관찰되며, 전형적인 breaching 구조¹⁸⁾를 가지게 된다. 이러한 성장특성은 알루미늄 기판에 성장된 이산화규소 나노와이어에서도 (Fig. 5(e), (f)) 관찰된다.

알루미늄 기판에서 성장된 이산화규소 나노와이어의 경우, 약간 휘어진 형상을 가지고 있으며, 미세한 나노와이어가 응집된 핵으로부터 성장되고 있으며, 전형적인 breaching 현상을 보이고 있음을 알 수 있었다. 기존의 연구결과에 의하면 알루미늄 위에서 성장된 이산화규소 나노와이어의 경우,¹⁰⁾ cage structures, chinese lantern, bundled array등의 다양한 형상을 가지는 것이 보고되었다. 각각의 기판위에 성장된 나노와이어의 결정성은 Fig. 5(b), (d)와 (f)에 삽입된 SAED (selective area electron diffraction) pattern을 통하여 모두 비정질임을 알 수 있었다. 비정질로 성장된 이유는 다른 비교연구에 비하여 낮은 반응 온도와, 반응에너지에 의한 것으로 여겨진다.

Fig. 7은 성장된 나노와이어의 광학적 특성을 PL 측정을 통하여 관찰한 것이다. 사용된 기판의 종류에 따라 큰 차이를 보임을 알 수 있었다. Si 기판을 사용한 경우, (Fig. 7(a)) 약 450 nm 대역에서 청색 발광현상이 나타났으며, 석영 기판위에서 성장된 이산화규소 나노와이어의 경우 370 nm 대역에서 peak가 측정되었다.(Fig. 7 (b)) 알루미늄 기판위에서 성장된 이산화규소 나노와이어는 약 420 nm 대역에서 청색 발광현상이 관찰되었다. (Fig. 7(c)) 또한 알루미늄 기판에서 성장된 나노와이어의 경우 672 nm와 687 nm대역에서의 peak도 관찰되었다. 이러한 PL peak는 성장된 나노와이어의 형상과 기판의 영향으로 생성된 것으로 보인다. Si 기판과 알루미늄 기판에서 성장된 이산화규소 나노와이어¹⁹⁾에서 관찰된 청색 발광현상은 polishing된 Si에서 SLS(solid-liquid-solid) 성장기구에 의하여 1300°C에서 성장된 비정질 이산화규소 나노와이어에서 관찰된 540 nm peak와는 큰 차이를 보인다. 그러나 HFCVD에 의하여 성장된 Si 나노결정이 함유된 이산화규소 나노와이어²²⁾에서 관찰된 420~460 nm

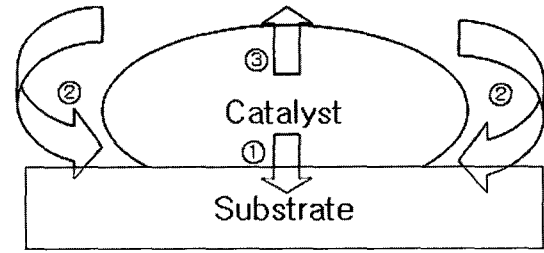


Fig. 6. Schematic diagram of the precipitation and diffusion reaction on metal catalysts of VLS growth mechanism.

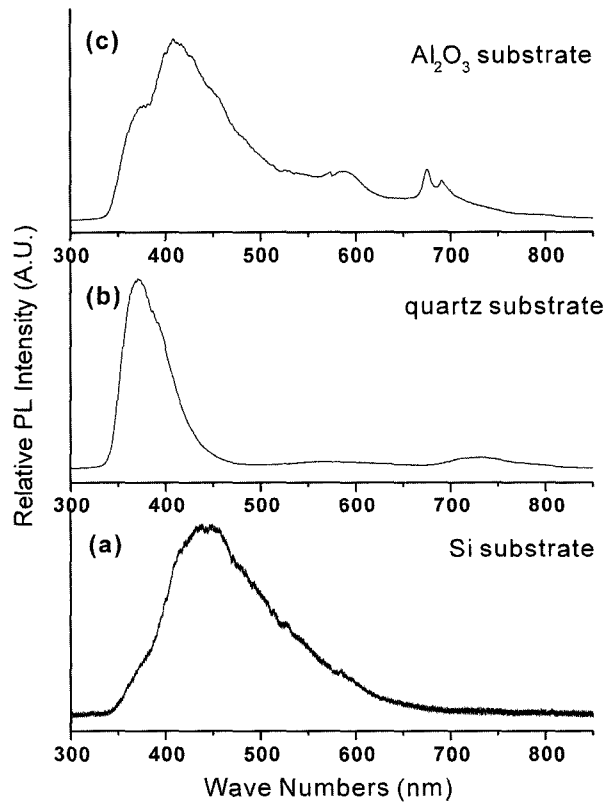


Fig. 7. Photoluminescence spectrums of SiO₂ nanowires with various substrates. (a) Si substrate, (b) quartz substrate, (c) Al₂O₃ substrate.

peak와는 유사하다. Wu 등²⁰⁾은 420~460 nm에서의 발광 현상은 비정질 이산화규소내의 neutral oxygen vacancy에 의한 것으로 추정하였으며, 530 nm에서의 발광현상은 산화된 Si 나노결정과 관련된 Si-O-H 결합에 의한 것으로 추정하였다. 이러한 청색발광현상은 이산화규소 산화막 위에 제조된 Si 나노결정²¹⁾에서도 관찰되었으며(2.3~3.0 eV), 주로 산소가 결핍된 구조에서 발생된 결합에서 기인한다고 보고하였다. 유사한 연구결과²²⁾에서 전형적인 quantum confinement effect가 나타남을 알 수 있었다. Si 결정의 크기가 100~200 nm인 경우 3.2~4.5 eV 영역에서의 적색발광현상이, 결정의 크기가 20~60 nm인 경

우, 2.3~3.0 eV 영역에서의 청색발광현상이 나타난다. 이러한 발광현상은 quantum confinement effect 이외에도 hot carrier transport (high energy carrier excitation)²³⁾ 과 Si/SiO_x 계면에서의 low energy carrier excitation²¹⁾ 으로 설명하기도 하였다. 이산화규소 나노와이어에서 얻어진 발광현상은 아직 정확히 설명하기는 어려우나, 앞서 설명된 neutral oxygen vacancy에 의한 해석이 가장 일반적이다.

본 연구에서 성장된 이산화규소 나노와이어의 경우, 측정된 청색발광현상은 neutral oxygen vacancy에 의한 것으로 여겨지나, 아직 비정질에서의 발광기구에 대한 구체적인 이론이 성립되지 않아서, 좀 더 심도있는 연구가 필요하다.

4. 결 론

기상휘발법에 의하여 이산화규소 나노와이어를 성장시켰으며, 그 성장특성을 관찰하였다. 성장된 나노와이어는 사용된 기판의 종류에 따라 서로 다른 형상을 보임을 알 수 있었다. 성장된 나노와이어는 VLS 성장기구에 의하여 성장되었음을 알 수 있었으며, 온도와 반응시간이 증가함에 따라 직경과 길이가 증가하였다. 성장된 나노와이어의 직경은 Si 기판을 사용한 경우 약 30 nm로서 알루미늄과 석영을 기판으로 사용한 경우보다 약 5~10 nm 정도 큼을 알 수 있었으며, 이는 상대적인 밀도 차이에 의한 것으로 보여진다. 알루미늄을 기판으로 사용한 경우 미세한 나노와이어가 분기되어 성장되었다. 이러한 형상은 사용된 기판의 종류에 따라서 변화하였다. 이러한 미세구조가 PL peak에 영향을 미침을 관찰할 수 있었다. Si를 기판으로 사용한 경우 450 nm 대역에서 청색 발광현상을 보였으며, 알루미늄을 기판으로 사용한 경우 약 30 nm 이동되어 420 nm에서 발광현상이 일어났으며, defect에 의한 여분의 PL peak가 관찰되었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 21세기 프론티어 연구개발사업인 '나노소재기술개발사업단'의 지원(과제번호 : 04K1501-03110)으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. S. Ijima, Nature **354**, 56 (1991).
2. I. J. Li, X. L. Chen, H. J. Li and Y. D. Xu, J. Cryst. Gr., **236**(1), 71 (2002).
3. D. H. Rho, J. S. Kim, D. J. Byun, J. W. Yang and N. R. Kim, Kor. J. Mater. Res., **13**(6), 404 (2003).
4. N. R. Kim, J. S. Kim, D. J. Byun, D. H. Rho and J. W. Yang, Kor. J. Mater. Res., **13**(10), 668 (2003).
5. C. H. liang, L. D. Zhang, G. W. Meng, Y. W. Wang and Z. Q. Chu, J. Non-Cryst. Solids, **277**(1), 63 (2000).
6. D. P. Yu, Q. L. Hong, Y. Ding, H. Z. Zhang, Z. G. Bai, J. J. Wang, Y. H. Zou, W. Qian G. G. Xiong and S. Q. Feng, Appl. Phys. Lett., **73**(21), 3076 (1988).
7. Z. Q. Liu, S. S. Xie, L. F. Sun, D. S. Tang, W. Y. Zhou, C. Y. Wang, W. Liu, Y. B. Li, X. P. Zou and G. Wang, J. Mater. Res., **16**(3), 683 (2001).
8. X. C. Wu, W. H. Song, K. Y. Wang, T. Hu, B. Zhao, Y. P. Sun and J. J. Du, Chem. Phys. Lett., **336**(1), 53 (2001).
9. H. Takikawa, M. Yatsuki and T. Sakakibara, Jpn. J. Appl. Phys., **38**, L401 (1999).
10. Z. L. Wang, R. P. Ga, Z. L. Gole and J. D. Stout. Adv. Mater., **12**(24), 1938 (2000).
11. Z. W. Pan, Z. R. Dai, C. Ma and Z. L. Wang, J. Am. Chem. Soc., **124**, 1817 (2002).
12. E. I. Givargizov, J. Cryst. Gr., **31**(1), 20 (1975).
13. D. H. Rho, J. S. Kim, D. J. Byun, J. W. Yang and N. R. Kim, Kor. J. Mater. Res., **13**(10), 677 (2003).
14. X. T. Zhou, H. L. Lai, H. Y. Peng, F. C. K. Au, L. S. Liao, N. Wang, I. Bello, C. S. Lee and S. T. Lee, Chem. Phys. Lett., **318**(1), 58 (2000).
15. Z. W. Pan, S. S. Xie, L. F. Sun and G. Wang, Chem. Phys. Lett., **299**(1), 97 (1999).
16. C. J. Lee, J. H. Park and J. Park, Chem Phys. Lett., **323**(6), 560 (2000).
17. H. Yamamoto, R. R. Hasiguti, T. Watanabe and N. Igata, J. Cryst. Gr., **87**(1), 1 (1988).
18. H. J. Li, Z. J. Li, A. L. Meng, K. Z. Li, X. N. Zhang and Y. P. Xu. J. Alloys and Compounds, **352**(2), 279 (2003).
19. J. Q. Hul, Y. Jiang, X. M. Meng, C. S. Lee and S. T. Lee, Chem. Phys. Lett., **367**(3), 339 (2003).
20. J. J. Wu, T. C. Weng and C. C. Yu Adv. Mater., **14**(22), 1643 (2002).
21. T. V. Torchynska, M. M. Rodriquez, A. V. Hernadez and K. W. Cheah, J. Luminescence, **102**(1), 551 (2003).
22. T. V. Torchynska, M. M. Rodriquez and L. Y. khomenkova, Surface Science, **532**(1), 1204 (2003).