

기계적으로 연마한 GaN 분말로부터 열처리 분위기를 달리한 β -Ga₂O₃ 나노벨트 및 나노입자의 합성

Synthesis of β -Ga₂O₃ Nanobelts and Nanoparticles from Mechanically Ground GaN Powders with Different Thermal Annealing Atmospheres

김병철, 선규태, 박광수, 임기주, 노태용, 남산, 성만영, 김상식

(Byung-Cheul Kim, Kyu-Tae Sun, Kwang-Soo Park, Ki-Joo Im, Taeyong Noh, Sahn Nahm, Man-Young Sung, Sangsig Kim)

Abstract

β -Ga₂O₃ nanobelts and nanoparticles were synthesized from mechanically ground GaN powders with thermal annealing in a nitrogen atmosphere and an oxygen atmosphere, respectively. The study of field emission scanning electron microscopy (FESEM) on the microstructures of nanomaterials revealed that the nanobelts synthesized in the nitrogen atmosphere are with the range of 20~1000nm width and 10~100nm thickness, and that nanomaterials are nanoparticles with 20~50nm radius obtained by thermal annealing in an oxygen atmosphere. The crystal structure of the β -Ga₂O₃ nanobelts and nanoparticles was in this study investigated by X-ray diffractometer (XRD) and high-resolution transmission electron microscope (HRTEM). The formation processes of the nanobelts and nanoparticles will be discussed in this paper.

Key Words : β -Ga₂O₃, nanobelts, nanoparticles, GaN powders, mechanical grinding, thermal annealing

1. 서론

나노구조의 물질들은 전통적인 벌크물질의 특성과 비교해 볼 때 나노구조가 갖는 양자제한효과(quantum confinement effect)로 인하여 독특한 전기적, 광학적, 자기적 특성을 나타내기 때문에 나노소자로 응용하려는 요구와 그에 따른 연구가 집중되고 있다[1-4]. 근래에는 양자점으로 소개되고 있는 0차원 나노입자들과 탄소 나노튜브의 발견과 함께 나노로드, 나노와이어, 나노튜브 그리고 나노

케이블과 같은 1차원 나노물질들의 합성에 관한 많은 결과들이 보고되고 있다[5-12, 24-26]. 이러한 나노물질 중에서도 ZnO, SnO, 그리고 Ga₂O₃와 같은 금속산화물 나노물질들은 분말을 출발물질로 사용하여 비교적 간단한 열처리에 의해 제조가 용이하다는 측면에서 주목을 받고 있다[13-15]. 또한 나노물질들은 그 크기 및 형상에 의하여 전기적 특성과 광학적 특성이 좌우되므로 나노물질의 합성시 형상 및 크기를 제어하는 연구가 필수적이다.

β -Ga₂O₃는 밴드 갭 에너지가 4.9eV인 와이드 밴드 갭 화합물 반도체로서 전기전도(electric conduction)와 발광(luminescence) 및 투명전도산화막(transparent conducting oxide, TCO) 특성을 갖고 있는 것으로 오랫동안 잘 알려져 왔으며[10, 11], 특히 환원조건에서 합성될 때는 결정격자 내

고려대학교 전기공학과
(서울특별시 성북구 안암동 5-1,
Fax : 02-3290-3894

E-mail : sangsig@korea.ac.kr
2001년 8월 16일 접수, 2001년 9월 3일 1차심사완료
2001년 10월 25일 2차심사완료

에서 산소가 약간 부족하게 되어 n형 반도체의 성질을 나타낸다. 따라서 저차원 구조의 β -Ga₂O₃ 나노물질들은 그 구조적 특성 및 양자제한효과에 의해 interconnection wire나 발광물질로서의 응용이 기대된다.

본 연구에서는 기계적으로 연마한 GaN 분말에 대해 열처리 분위기를 달리하여 β -Ga₂O₃ 나노벨트와 나노입자를 합성하고, 합성한 시료의 결정구조, 조성 및 형태 등을 분석하며, 열처리 분위기 변화에 의해 각각 합성된 나노벨트 및 나노입자의 형성과정을 고찰하고자 한다.

2. 실험

순도가 99.9 %인 Cerac사의 GaN 분말과 스테인레스 스틸 볼을 혼합하여 철재 용기에 넣은 후, 이 혼합물을 10시간, 20시간, 40시간동안 ball mill (SPEX 8000M mixer/mill)을 사용하여 기계적으로 연마하였다. 연마하여 준안정상태에 다다른 GaN 분말을 채취하여 알루미늄 보트에 담고, 전기로 내부의 알루미늄 튜브의 중간에 위치하도록 한 후 준안정상태의 GaN으로부터 갈륨과 질소가 분리가 가능한 온도인 900°C[18]보다 약간 높은 온도인 930°C에서 15시간동안 300 sccm 유량의 질소분위기에서 열처리하였다. 또한 연마한 GaN 분말을 질소분위기에서 열처리 하였던 조건과 동일한 온도와 시간조건에서 산소분위기에서도 열처리를 실시하였다. 합성된 물질들의 미세구조는 전계 방출 전자현미경 (Hitachi S-4300)과 투과현미경 (Jeol 1200EX)으로 관찰하였으며, 고분해능 투과현미경 (Jeol, JEM 3000F)과 X선 회절분석기 (Rigaku, D/MAX-IIA)를 사용하여 합성된 물질들의 결정구조를 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

연마시간에 따른 GaN 분말의 결정구조를 X선 회절기로 분석하여 그림 1에 나타내었다. 그림 1의 (a)는 연마하기 전 GaN 분말의 X선 회절패턴으로서, 모든 피크들이 a=3.18Å, c=5.18Å의 격자상수를 갖는 wurtzite 구조의 육방정계 GaN 결정의 피크들과 일치함을 알 수 있었다[19]. GaN 분말을 연마하기 이전에 2θ=30~40° 범위에서 보였던 가장 큰 (100), (002), (101) 피크들은 10시간 연마 후 크기가 급격히 감소했으며, 40시간 연마 후는

피크들을 그 크기의 감소와 함께 피크들의 폭이 넓어짐을 나타내었다. 따라서 연마시간이 증가함에 따라 GaN 분말들의 충분한 비정질화가 이루어졌음을 알 수 있었다.

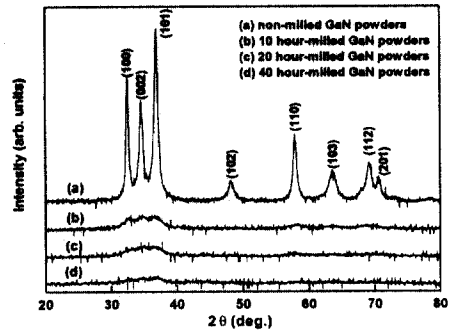


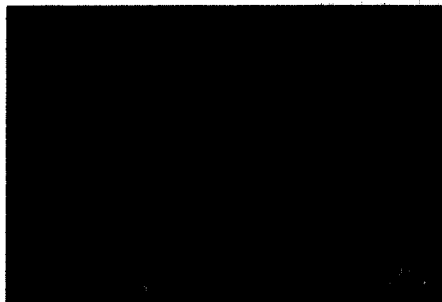
그림 1. 연마시간에 따른 GaN 분말의 X선 회절 패턴.

Fig. 1. The XRD patterns of GaN powders ground as a function of milling time.

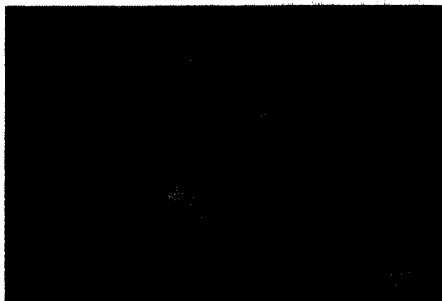
연마시간을 달리한 GaN 분말 중에서 실험시간의 단축을 가져오고 충분한 비정질화가 되었다고 판단된 20시간을 연마한 GaN 분말을 선택하여 질소와 산소분위기에서 각각 열처리한 후 XRD를 측정하여 그림 2에 나타내었다. 열처리한 후의 XRD 결과는 열처리 전의 XRD 결과 및 연마하기 이전의 GaN 분말의 결과와는 전혀 다른 결과를 나타내었다. 질소에서 열처리한 그림 2의 (a)는 2θ > 30° 인 영역에서 나타난 XRD 피크들이 a=12.23Å, b=3.04Å, c=5.80Å, β=103.7°의 격자상수를 갖는 단사정계의 β-Ga₂O₃와 일치함을 알 수 있다[20]. 화살표(↑)로 나타낸 2θ=21.65°와 26.78°에서 나타나는 피크들은 GaO₂H와 같은 질소가 결합된 Ga와 관련된 부수적인 결정상(sub-phase)으로 해석할 수 있으며, 별표(*)로 나타낸 2θ=28.15°에서의 비교적 큰 피크는 아직 밝혀지지 않아 현재 고찰중이다. 그림 2의 (b)와 같이 산소분위기에서 열처리한 경우는 2θ의 모든 범위에서 단사정계 β-Ga₂O₃의 XRD 피크들과 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 질소분위기에서 GaN 분말을 열처리하면 미량의 GaO₂H 결정들이 혼합된 β-Ga₂O₃ 결정들을 합성할 수 있으며, 산소분위기에서는 순수한 β-Ga₂O₃ 결정들이 합성되었음을 알 수 있었다.

것과 같이 질소분위기에서 열처리한 경우는 직사각형 막대기의 형태를 갖는 β -Ga₂O₃ 나노벨트가 합성되었음을 확인할 수 있으며, 그림 4의 (b)와 같이 산소분위기에서 열처리한 경우는 직경 20~50nm의 나노입자 형태로 존재함을 알 수 있었다. 합성한 나노벨트의 경우는 잘 분산된 형태를 얻을 수 있었지만, 나노입자의 경우는 뭉침 현상으로부터 이들을 분산시키는 방법적인 문제가 남아 있으나, 한가지의 출발물질로부터 열처리 분위기를 달리하여 다른 형태의 나노물질 합성할 수 있었다.

그림 5는 GaN 분말을 20시간 연마 후 930°C에서 15시간 동안 질소분위기에서 열처리한 후 합성된 β -Ga₂O₃ 나노벨트의 투과현미경 사진이다. 선



(a) β -Ga₂O₃ nanobelts



(b) β -Ga₂O₃ nanoparticles

그림 4. 20시간 연마한 GaN 분말을 (a) 질소분위기에서 열처리한 후 얻어진 β -Ga₂O₃ 나노벨트와 (b) 산소분위기에서 열처리한 후 얻어진 β -Ga₂O₃ 나노입자의 SEM 사진.

Fig. 4. The SEM images of (a) β -Ga₂O₃ nanobelts obtained from thermal annealing of 20 hour-milled GaN powders in a N₂ atmosphere and (b) β -Ga₂O₃ nanoparticles in an O₂ atmosphere, respectively.

택된 나노벨트의 폭은 약 40nm로서, 매우 균일한 폭과 직선형태를 나타내고 있으며 거의 모든 영역에서 밝고 어두운 부분이 존재하고 있다. 특히 나노벨트의 중심에서 명암의 차이가 나는 부분이 관찰되었는데, 이러한 명암이 나타나는 이유는 합성된 나노벨트의 국부적인 영역에 스트레인이 집중되기 때문이라고 알려져 있다[14]. 이것은 β -Ga₂O₃ 나노벨트의 Ga과 O 원자들이 β -Ga₂O₃ 벌크 또는 에피구조에서 서로 다른 스트레스를 받을 수 있기 때문이라 고려된다. 따라서 β -Ga₂O₃ 나노벨트에서 보이는 명암은 스트레인이 나노벨트 전영역에 걸쳐 불균일하게 발생했기 때문이며, 나노벨트의 중심부분과 가장자리 부분에 가해지는 스트레인이 다르다는 것을 의미한다.

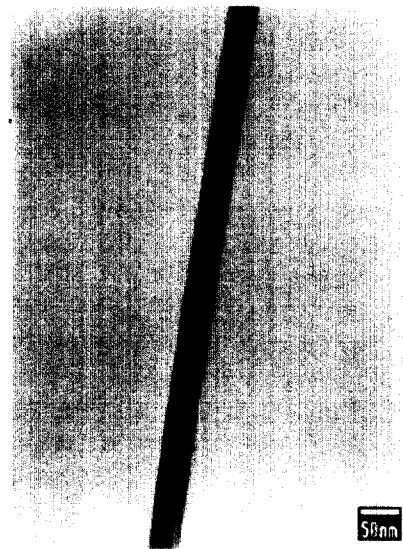


그림 5. 20시간 연마한 GaN 분말을 질소분위기에서 열처리한 후 얻어진 β -Ga₂O₃ 나노벨트의 투과현미경 사진.

Fig. 5. The TEM image of a β -Ga₂O₃ nanobelt synthesized by thermal annealing in a N₂ atmosphere from the 20 hour-milled GaN powders.

그림 6은 GaN 분말을 20시간 연마 후 930°C에서 15시간 질소분위기에서 열처리한 후 합성된 β -Ga₂O₃ 나노벨트의 격자구조를 조사한 고분해능 투과현미경 사진 및 회절 패턴이다. 고분해능 투과현미경 사진에서 변조파장 (modulation

wavelength)은 460Å으로서, 이 파장은 단사정계 β -Ga₂O₃의 (201) 격자면의 면간 거리 (interplanar distance)에 해당하는 파장과 일치한다. 그림 6에 삽입부분에서 나타난 회절패턴은 선택된 부분의 격자면이 정확히 (201) 임을 입증하고 있다. 이로부터 적어도 고분해능 투과현미경으로 관찰한 부분에서는 기존의 다른 연구자들이 나노와이어에서 관찰했던 어떠한 변위 (dislocations) 나 트윈구조 (twin structures) [12]가 나타나지 않고 완전한 주기성을 가지고 있음을 알 수 있었다.

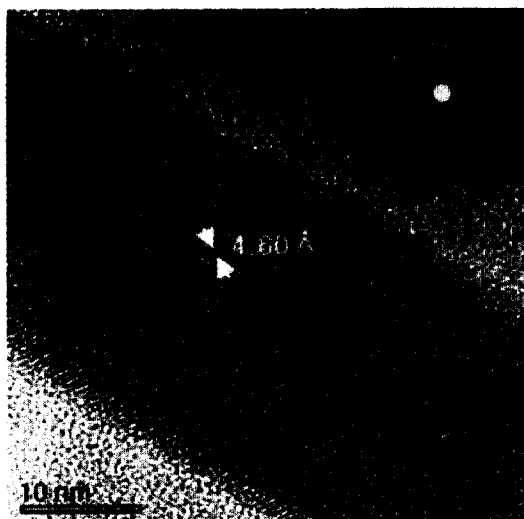


그림 6. 20시간 연마한 GaN 분말을 질소분위기에서 열처리한 후 얻어진 β -Ga₂O₃ 나노벨트의 고분해능 투과현미경 사진과 회절패턴.

Fig. 6. The HRTEM image of a β -Ga₂O₃ nanobelt and its SAED pattern synthesized by thermal annealing in a N₂ atmosphere from the 20 hour-milled GaN powders.

합성한 β -Ga₂O₃ 나노벨트의 에너지 분산 X선 (EDX) 분석결과를 그림 7에 나타내었다. 그림 7에서 탄소 (C) 와 관련된 피크들은 투과현미경 시료를 준비하는 과정에서 탄소에 의한 오염 때문이며, 구리 (Cu) 와 관련된 피크들은 Cu grid의 사용에 의해 나타나는 부수적인 피크들이다. EDX의 나머지 피크들로부터 β -Ga₂O₃ 나노벨트의 성분은 Ga

과 O 로 구성되어 있음을 알 수 있었으나, EDX의 분석결과는 탄소보다 더 가벼운 이온들에 대한 결정적인 정보를 제공하지 못하기 때문에 β -Ga₂O₃ 나노벨트에 대한 XRD 회절패턴에서 나타났던 부수적인 결정상인 Ga₂OH의 수소이온을 검출할 수 없었다. AES (Auger Electron Spectroscopy) 역시 수소이온을 검출할 수 없지만 β -Ga₂O₃ 나노벨트에 대해서 측정한 결과는, 그림으로 나타내지는 않았으나, EDX의 분석결과와 잘 일치하였다. 한가지 흥미로운 사실은 GaN 분말을 기계적으로 연마하는 동안 연마제로 사용한 스테인레스 스틸 볼로부터 GaN 분말이 볼의 금속입자들 (주로 Fe)에 의해 매우 심하게 오염 되리라 예상하였으나, EDX와 AES 분석결과로부터는 합성된 β -Ga₂O₃ 나노벨트에서는 어떠한 금속과 관련된 피크들이 나타나지 않았다는 점이다. 따라서 EDX와 AES 결과들은 합성된 나노벨트는 비록 Ga₂OH와 같은 부수적인 결정상이 존재하지만, Fe와 Cr과 같은 금속 이온들에 의한 오염이 전혀 발생하지 않은 화학적으로 순수한 물질임을 입증하고 있다.

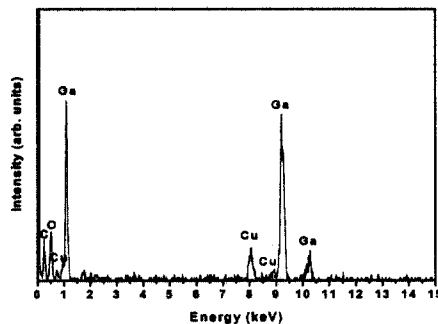


그림 7. 20시간 연마한 GaN 분말을 질소분위기에서 열처리한 후 얻어진 β -Ga₂O₃ 나노벨트의 EDX 스펙트럼.

Fig. 7. The EDX spectrum of β -Ga₂O₃ nanobelts synthesized by thermal annealing in a N₂ atmosphere from the 20 hour-milled GaN powders.

연마하여 비정질화 시킨 GaN 분말을 열처리함으로써 얻어지는 나노물질들의 형성과정에 대하여는 아직 구체적으로 규명된 바가 없다. 단지 암모니아 분위기에서 열처리하면 GaN 나노와이어 형태가 얻어지고[22], 질소 분위기의 열처리에서는

β -Ga₂O₃ 나노벨트의 형태가 얻어졌음이 보고되고 있다[15]. 그리고 본 연구에서 산소분위기에서의 열처리하였을 경우 β -Ga₂O₃ 나노입자가 형성됨을 알 수 있었다. 이렇듯 Ga계 나노물질의 제조를 위해서는 먼저 Ga의 승화(sublimation)가 쉽게 발생 되도록 준안정상태의 형성을 위한 연마과정이 필수적이며, 연마시간을 충분히 하여 비정질화 시키는 과정이 중요하다. 또한 β -Ga₂O₃ 나노물질의 형성과정의 경우 가장 핵심이 되는 부분은 산소의 공급원을 어떻게 설명하는가이다. 연마한 GaN 분말을 질소 분위기에서 열처리한 경우 알루미늄이 보트가 산소 공급원으로 작용한다고 이야기할 수 있다. 그 이유로는, 첫째 알루미늄 보트의 벽면으로부터 나노벨트들이 성장하였으며 나노벨트가 형성된 부분의 알루미늄 보트의 색깔은 황색에서 흰색으로 변색이 발생한 것으로부터 알 수 있다. 또한 산소 분위기에서 열처리 하였을 경우에는 나노벨트가 형성되지 않았으며, 알루미늄 보트의 변색도 발생하지 않았음이 이를 뒷받침 한다. 둘째 이유로는 알루미늄(Al₂O₃)와 같이 산화물 분말을 성형시켜 열처리하여 만든 대부분의 세라믹 물질들은 온도증가에 따라 입계의 산소농도가 증가하므로[23], 입계의 크기에 따른 극히 제한된 면적에 Ga이 증착하여 성장할 수 있기 때문이다. 이러한 제한된 면적에서의 산소공급과 연속적인 Ga 기체의 증착으로 일차원적인 결정성장이 계속되어 나노벨트가 형성된다고 생각할 수 있다. 반면 산소 분위기에서 열처리한 경우는 기화된 Ga 이 분위기가스로 사용되는 산소분자와 먼저 결합함으로써 알루미늄의 입계에 존재하는 산소와 반응을 해야 할 Ga 원소가 적어지고, 넓은 범위에서 형성되는 Ga 기체와 산소와의 반응은 화합물 자체의 표면적을 크게 하여 안정화하려는 구형태로 존재하게 되어 나노입자들이 합성되는 것으로 생각할 수 있다.

따라서 GaN 분말로부터 β -Ga₂O₃ 나노벨트가 합성되는 성장기구를 다음과 같이 설명할 수 있다. 연마된 GaN 분말은 930℃, 질소 분위기에서 열처리함으로써 Ga과 N으로 분해되고 이때 발생한 기체상태의 Ga은 알루미늄 보트 표면의 입계부분에 증착하고 지속적인 Ga 원소의 증착으로 말미암아 좁은 산소공급원으로 인해 일차원적인 성장이 발생한다. 또한 산소 분위기에서는 지속적으로 공급되는 산소와 시로 표면에서 기화되는 Ga이 결합함으로써 입자의 넓은 면적에서 고른 분포의 입자가 형성된다고 볼 수 있다. 이러한 열처리 분위기 변화에 따른 결정성장 형태의 제어는 균일하고 규칙

적인 산소공급원을 개발할 수 있다면 크기 및 형태의 고른 분포를 가진 여러 형태의 나노물질들을 제조할 수 있는 가능성을 제시하고 있다.

4. 결론

연마한 GaN 분말을 930℃에서 15시간동안 질소분위기와 산소분위기에 각각 열처리하여 β -Ga₂O₃ 나노벨트와 나노입자를 합성하였다. 질소분위기에서 얻어진 나노벨트는 사각기둥의 모양을 나타내었으며, 폭은 20~1000nm 이었으며, 두께는 10~100nm이었다. 그리고 다발형태의 나노벨트는 적어도 수 cm의 길이를 갖고 있었다. 또한 산소분위기에서 얻어진 나노입자의 경우는 입자의 직경이 20~50nm의 크기를 나타내었다. X선 회절분석기와 고분해능 투과현미경으로 분석한 결과 합성한 β -Ga₂O₃ 나노벨트와 나노입자의 결정구조는 단사정계의 구조임을 알 수 있었다. 또한 열처리 분위기에 따라 β -Ga₂O₃ 나노벨트와 나노입자로 결정성장 과정이 달라지는 이유를 기화한 Ga 원소와 결합하는 산소가 공급되는 경로에 의해 고찰하였다.

감사의 글

본 연구는 KOSEF (Korea Science and Engineering Foundation, 1999-2-302-017-5)의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] N. Hamada, S. Sawada, A. Oshiyama, "New one-dimensional conductors: graphitic microtubules", Phys. Rev. Lett., Vol. 68, pp. 1579-1581, 1992.
- [2] M. Bockrath, D.H. Cobden, P.L. Mceuen, N.G. Chopra, A. Zettl, A. Thess, R.E. Smally, "Single-electron transport in ropes of carbon nanotubes", Science, Vol. 275, pp. 1922-1925, 1997.
- [3] K. Bubke, H. Gnewuch, M. Hempstead, J. Hammer, M.L.H. Green, "Optical anisotropy of dispersed carbon nanotubes induced by an electric field", Appl. Phys. Lett., Vol. 71, pp. 1906-1908, 1997.

- [4] A. Heilmann, P. Jutzi, A. Klipp, U. Kreibig, R. Neuendorf, T. Sawitowski, G. Schmid, "Photoluminescent siloxenes in nanoporous aluminum oxide", *Adv. Mater.*, Vol. 10, pp. 398-401, 1998.
- [5] J.H. Jean, T.A. Ring, Processing "Monosized TiO_2 powders generated with HPC dispersant", *J. Am. Ceram. Soc.* Vol. 65, pp. 1574-1577, 1986.
- [6] M.T. Harris, R.R. Brunson, C.H. Byers, "Base-catalyzed hydrolysis and condensation reactions of dilute and concentrated TEOS solutions", *J. Non-Cryst. Solids*, Vol. 121, pp. 397-403, 1990.
- [7] W.Y. Wang, Y.p. Xu, D.F. Zang, X.L. Chen, "Synthesis and dielectric properties of cubic GaN nanoparticles", *Mater. Res. Bull.*, Vol. 36, pp. 2155-2162, 2001.
- [8] N.G. Chopra, R.J. Luyken, K. Cherrey, V.H. Crespi, M.L. Cohen, S.G. Souie, A. Zettl, "Boron nitride nanotubes", *Science*, Vol. 269, pp. 966-967, 1995.
- [9] Z. Sieh, K. Weng, N.G. Cherrey, X. Chopra, Y. Blas, A. Miyamoto, M.L. Rubio, S.G. Cohen, A. Louie, R. Zettl, "Synthesis of $\text{B}_x\text{C}_y\text{N}_z$ nanotubules", *Phys. Rev. B*, Vol. 51, pp. 11229-11232, 1995.
- [10] P.D. Yang, C.M. Lieber, "Nanorod-superconductor composites: a pathway to materials with high critical current densities", *Science*, Vol. 273, pp. 1836-1840, 1996.
- [11] X.L. Xu, D.P. Yu, S.Q. Feng, X.F. Zhang, Z. Zhang, "TEM characterization of calcium-oxygen nanorods", *Nanostructured Mater.*, Vol. 8, pp. 373-375, 1997.
- [12] W.Q. Han, S.S. Fan, Q.Q. Li, Y.D. Hu, "Synthesis of gallium nitride nanorods through a carbon nanotube-confined reaction", *Science*, Vol. 277, pp. 1287-1289, 1997.
- [13] M.H. Huang, Y. Wu, H. Feick, N. Tran, E. Weber, P. Yang, "Catalytic growth of zinc oxide nanowires by vapor transport", *Adv. Mater.*, Vol. 13, pp. 113-116, 2001.
- [14] Z.R. Dai, Z.W. Pan, Z.L. Wang, "Ultra-long single crystalline nanoribbons of tin oxide", *Solid State Commun.*, Vol. 118, pp. 351-354, 2001.
- [15] J.Y. Li, X.L. Chen, Z.Y. Qiao, Y.G. Cao, Y.C. Lan, "Formation of GaN nanorods by a sublimation method", *J. Cryst. Growth*, Vol. 213, pp. 408-410, 2000.
- [16] H.H. Tippins, "Optical absorption and photoconductivity in the band edge of beta- Ga_2O_3 ", *Phys. Rev.*, Vol. 140, pp. A316-319, 1965.
- [17] D.D. Edwards, T.O. Mason, F. Goutenoire, K.R. Poepelmeier, "A new transparent conducting oxide in the Ga_2O_3 - In_2O_3 - SnO_2 system", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 70, pp. 1706-1708, 1997.
- [18] S.D. Wolter, S.E. Mohny, H. Venugopalan, "Kinetic study of the oxidation of gallium nitride in dry air", *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 145, No. 2, pp. 629-632, 1998.
- [19] JCPDS card no. 02-1078
- [20] JCPDS card no. 11-0370
- [21] H.Z. Zhang, Y.C. Kong, Y.Z. Wang, X. Du, Z.G. Bai, J.J. Wang, D.P. Yu, Y. Ding, Q.L. Hang, S.Q. Feng, " Ga_2O_3 nanowires prepared by physical evaporation", *Solid State Commun.*, Vol. 109, pp. 677-682, 1999.
- [22] J.Y. Li, Z.Y. Qiao, X.L. Chen, Y.G. Cao, Y.C. Lan, C.Y. Wang, "Morphologies of GaN one-dimensional materials", *Appl. Phys. A* Vol. 71, pp. 587-588, 2000.
- [23] G.H. Jonker, "Some aspects of semiconducting barium titanate", *Solid-state Electron.*, Vol. 7, pp. 895-903, 1964.
- [24] 류호진, 장건익, 정성희, "Ni 박막 촉매 Etching 조건에 따른 탄소나노튜브 성장", *전기전자재료학회논문지*, 14권 9호, pp. 751-756, 2001.
- [25] 반응병, "나노전자재료와 응용", *전기전자재료*, 14권 9호, pp. 5-11, 2001.
- [26] 천진우, "나노 재료 형성기술과 응용", *전기전자재료*, 14권 9호, pp. 12-18, 2001.