

Structural Characteristic of One Dimensional Single Crystalline of InN Nanowires

Yun-Ki Byeun, Yong-Keun Chung, Sang-Hoon Lee,* and Sung Churl Choi[†]

Department of Ceramic Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

*Department of Environmental Engineering, Graduate School of Engineering,
Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received February 2, 2007; Accepted March 14, 2007)

1차원 InN 단결정 나노선의 구조특성에 대한 고찰

변윤기 · 정용근 · 이상훈* · 최성철[†]

한양대학교 신소재공학과

*한양대학교 공학대학원 환경공학과

(2007년 2월 2일 접수; 2007년 3월 14일 승인)

ABSTRACT

High-Quality 1-Dimensional InN single crystalline have been grown by Halide Vapor-Phase Epitaxy on the Au catalyst coated Si substrate using the vapor-liquid-solid growth mechanism. We have been grown 1-dimension InN nanowires having controlled the growth conditions for substrate temperature and gases flow rate. The grown InN nanowire of characteristics for morphologies, crystal structure, and element analysis were carried out by SEM, HR-TEM, and EDS respectively. And the defects of InN crystalline were analyzed by indexing of selective area diffraction pattern with attached HR-TEM. We have successfully obtained the defect-free 1-dimensional InN single crystalline nanowire at the atmosphere pressure.

Key words : InN nanowire, HVPE, Defect free single crystalline, HR-TEM

1. 서 론

3-5족 화합물 반도체는 직접 천이형 밴드갭 구조를 가지고 있어 광 발광 소자 및 광 검출 소자 등과 같은 광 전자소자에 널리 응용되고 있는 재료이다. 특히, InN를 포함하는 3-5족 질화물 반도체는 광전자소자(photronics)로 응용 될 뿐만 아니라 차세대 메모리 소자 등에 응용되어 전 세계적으로 많은 연구가 이루어지고 있는 재료이다.¹⁾ 그 이유는 III-V족 화합물 반도체 중에 InN가 가장 작은 유효질량(Effective mass, 0.07~0.14 m_0)과 가장 빠른 전자 유동 속도(Electron drift velocity, 4.2×10^7 cm/s)를 가지고 있어 high-speed, high-frequency 전자소자로 응용된다.²⁻⁴⁾ 최근 InN 박막연구에서 상대적으로 낮은 캐리어농도(carrier density, $10^{-8}/\text{cm}^3$)와 높은 전하이동도(electron mobility, $1200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$)를 가진다는 연구보고가 발표된 후 InN에 대한 학문적 또는 기술적 관심은 매우 빠르게 진행되고 있다.^{5,6)} 또한 스핀전자공학(spintronics)에서 InN는 상온 강자성을 가질 수 있는 spin transport로 알려지면서 전 세계적으로 많은 연구가 진행되고 있다.⁷⁾

그리고 전자소자에서의 고 집적화 및 소형화에 따른 나노소자의 나노구조체가 활발히 연구되고 있다. 이는 CNT의 발견 이후 1차원 나노 구조체(즉, nanotube, nanowire, nanorod, nanobelt 등 높은 종횡비를 가지는 구조체)에 대한 많은 관심을 가지게 되었고, 특히 1차원 나노구조체가 가지고 있는 양자효과 및 새로운 기능에 대해서 많은 연구가 진행되고 있다.⁸⁾ 이런 1차원 나노구조체에 대한 연구는 성장기술, 특성평가 기술, 소자응용 기술 등 많은 연구가 이루어지고 있다. 이 중에서 1차원 나노 구조체의 성장법은 laser ablation,⁹⁾ MOCVD,¹⁰⁾ Carbothermal¹¹⁾ 등과 같은 기상성장법과 AAO(Anodic Aluminum Oxide) template¹²⁾를 이용한 습식성장법등이 소개되었다. 하지만 이런 성장법은 고진공을 요구하며, 장치가 고가인 단점을 가지고 있다.

이에 본 연구에서는 고품위 GaN 단결정 후막을 성장시키는 HVPE(Halide Vapor-Phase Epitaxy)법¹³⁾을 개량하여 상압 CVD공정으로 고품위 1차원 InN 단결정 나노선을 성장시키는 것을 연구하였다. 일반적인 HVPE 단결정 성장법은 높은 증착율을 가지기 때문에 후막공정에 많이 응용되고 있다. 이는 염화기상증착법이 기존의 화학증착법에 비해서 증착 Source를 빠르게 운반하기 때문이다.¹³⁾ 그리고 나노선의 성장 있어서 VLS(Vapor-Liquid-Solid) 성

[†]Corresponding author : Sung Churl Choi
E-mail : choi0505 @ hanyang.ac.kr
Tel : +82-2-2220-0505 Fax : +82-2-2291-6767

Table 1. HVPE Process Parameters Employed for the Growth of InN Nanowire

Sample ID	substrate	Total N ₂ gas flow [sccm]	F _{NH₃} /F _{HCl} ratio	Growth temperature [Substrate temperature]	InN nanowires obtained
EXP_1	Au@Si(100)*	1000	20	600 [450]	Poorly crystalline [fig. 3]
EXP_2	Au@Si(100)	1000	50	600 [560]	More stacking faults [fig. 4]
EXP_3	Au@Si(100)	1250	50	600 [560]	good crystalline [fig. 5]

*Using the Au catalyst for VLS growth coated on silicon with 5 nm thickness.

장기구를 많이 채택하고 있다.¹⁴⁾ 이는 낮은 용융점을 가지는 금속촉매를 이용하여, 반응 source를 촉매에 과포화시켜 이방성 결정성장을 유도하는 기구로써, 낮은 온도에서 나노선을 성장시킬 수 있고, 용융된 촉매금속 droplet의 크기에 따라 나노선의 직경을 조절 할 수 있을 뿐만 아니라 촉매금속을 특정 pattern을 통해 Selective pattern growth로 성장시킬 수 있는 장점을 가지고 있다.¹⁵⁾ 하지만, 현재까지 1차원 InN 단결정 나노선의 성장을 보고한 논문은 거의 없으며, 특히 상압공정을 통해 성장된 나노선은 연구가 아직 보고되지 않고 있다. 이는 InN가 다른 3-5족 질화물반도체 재료에 비해서 단결정 성장이 매우 어려운 재료로 고온 성장 중에 In 원소의 휘발로 인하여 화학양론조성에 맞는 성장이 어렵고 성장을 하더라도 많은 결정 전위(dislocation)을 발생시키는 것으로 보고되고 있다.¹⁶⁾

그러므로 본 연구는 고품위 1차원 InN 단결정 나노선을 성장시키기 위하여 특정 성장조건을 통해서 defect free 단결정 나노선을 성장시키는데 그 목적을 두고 있다.

2. 실험 방법

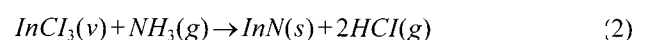
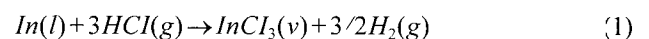
HVPE법을 이용하여 InN 단결정 나노선을 성장시키기 위해서 수평반응튜브 로를 사용하였으며, 반응관은 내부 직경 28 mm 석영관을 사용하였다. 이때 외부반응관 내부에 1/4인치 내부석영관을 사용하여 단계적인 반응을 유도하였다. 내부석영관 안에 In 금속분말(Aldrich, 99.999%)을 반응관 중심(Hot zone)에서 up-stream 방향 1인치 위치에 넣고, 석영관 내부로 HCl과 N₂가스를 동시에 주입하였다. 이때 사용된 HCl가스는 고압액상 가스이며, N₂는 순도 6N을 사용하였다. 그리고 외부석영관 전체에 NH₃와 N₂가스를 주입하여 내부석영관으로 나온 열화학 반응물과 질화반응을 유도하였다. 이때 사용된 NH₃가스는 고압액상가스이며, N₂가스는 순도 6N을 사용하였다. 사용된 N₂가스의 총유량을 500~1500 sccm으로 조절하였으며, 반응종의 유량비(F_{NH₃}/F_{HCl})는 10~100으로 조절하여 InN 나노선을 성장시켰다. 그리고 Hot zone에서 down-stream방향으로 1인치 간격으로 기판을 위치하여 기판의 온도를 조절하였다. 이때 사용된 기판은 sputter를 사용하여 Au를

5 nm 두께로 증착한 Si 웨이퍼를 사용하였다. Au는 InN 나노선 성장반응에 직접적으로 참여하지 않으며, 단지 VLS(Vapor-Liquid-Solid) 성장을 위한 촉매 역할만 수행한다. 단결정 InN 나노선을 성장시키기 위해서 Hot zone 온도 범위는 500~700°C에서 수행하였으며, 이때 유지시간은 30분으로 고정하였다. 단, 열처리 이전에 30분간 HCl을 제외한 모든 가스를 주입하여 반응튜브 내에 잔존 산소와 같은 불순가스를 제거하였다. 이와 같이 단결정 InN 나노선을 성장하기 위한 조건을 Table 1에 나타내었다.

성장된 InN 나노선의 미세구조는 SEM(Scanning Electron Microscopy, Hitachi, S-3000H)과 Field Emission-SEM(FEI XL-30 FEG)를 통해서 성장 조건에 대한 분석을 하였으며, HR-TEM(High Resolution Transmission Electron Microscopy, 400 kV, JEM-4010)를 통하여 나노선의 표면 및 내부결정성을 확인하였으며, 특히 SAED pattern을 이용하여 InN 나노선의 결정구조를 분석하였다. 그리고 HR-TEM에 부착된 고분해능 EDS(Energy Dispersive Spectrometer)를 이용하여 성분분석을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

1차원 단결정 InN 나노선을 성장하기 위해서 HVPE 법을 이용하였다. HVPE법은 금속입자를 열화학기상물로 반응시켜 기판까지 운반하는 것을 특징으로 하는 것으로 일반적으로 장치가 간단하며 빠른 증착율을 가지기 때문에 GaN, AlN 후막단결정 기판을 형성시키는데 많이 응용되고 있다.^{13,17,18)} 뿐만아니라 열화학기상물의 운반능력이 뛰어나 기판 전면적에 균일한 증착을 가질수 있는 장점을 가지고 있다.¹⁹⁾ 때문에 본 연구에서는 HVPE법을 개량하여 상압 하에서 단결정 나노선을 성장하였다. 성장된 InN 나노선은 다음과 같은 반응식을 통해 얻어진다.



반응식 (1)은 내부 석영관에서 일어나는 것으로 InN 나노선 성장온도에서 HCl을 통해서 In 금속을 InCl₃(v) 상태로 반응시켜 내부석영관을 지나 반응식 (2)와 같이 기판위

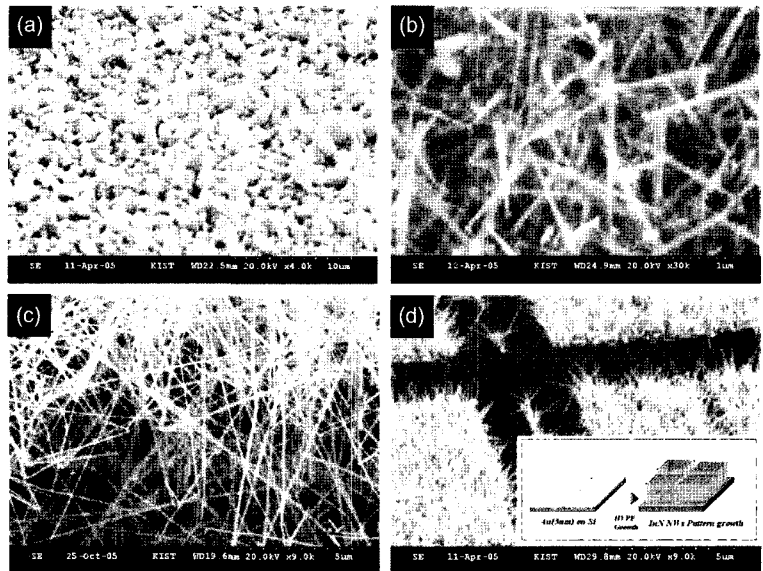


Fig. 1. Typical SEM tilted image of InN grown on Au coated Si substrates. (a) The pillar shaped particle of InN, (b) needle shaped InN nanorods, (c) InN nanowire with high aspect ratio, and (d) pattern growth of InN nanowires, well-aligned on the substrate perpendicularly. Inset image is schematic diagram for process of pattern growth.

에서 NH₃와 반응하여 InN 초기 핵생성이 이루어지고, 이런 핵은 기판 위의 용융된 Au 나노입자에 확산되고, 계속 확산된 InN 핵은 포화 되어 이방성장하여 나노선으로 성장된다. 이와 같은 성장법은 VLS 성장기구를 따른다.¹⁴⁾

본 연구에서 성장된 InN 나노선의 미세구조 사진을 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1은 InN 성장에서 있어서 기판온도와 F_{NH₃}/F_{HCl}의 유량비율 및 전체 분압에 따라 여러 가지 미세구조를 가지는 것으로 확인 되었다. 특히 Fig. 1(a)는 pillar 형태의 InN를 얻을 수 있었다. 이는 총유량이 500 sccm 이하 또는 성장온도 650°C이상에서 나타나는 것으로 반응중

의 분압(i.e., $R_{flow} = P_{InCl_3} + P_{NH_3} / P_{N_2}$)이 증가하고 성장온도가 높아 Au가 촉매역활을 할 수 없을 만큼 빠른 증착이 일어난 것으로 사료된다. 그러나 (b)는 (a)의 성장조건 중에 성장온도와 NH₃와 HCl의 유량을 고정하고 전체 N₂ 유량을 증가시켜 얻어진 미세구조 사진이며, (a)의 성장조건에 비해 반응종의 유량이 희석된 가스 분위기이다. 이와 같은 결과는 촉매내부의 InN의 확산과 포화속도가 증착속도보다 작아야 이방성으로 성장하는 나노구조체를 형성할 수 있음을 확인할 수 있었다.^{20,21)} Fig. 1의 (c)는 Table 1과 같은 조건에서 성장된 InN 나노선의 미세구조를 얻을 수 있었다.

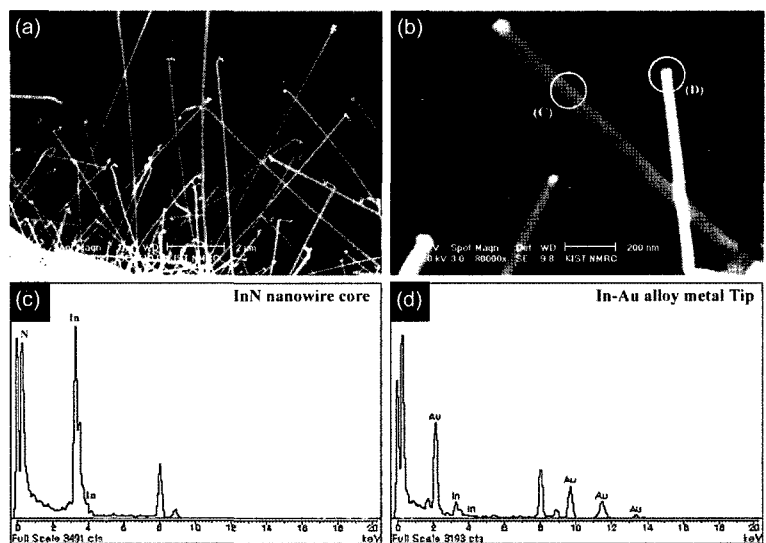


Fig. 2. FE-SEM image and EDX pattern of InN nanowires. (a) Tilted view at low magnified morphology of InN nanowire, (b) high magnified morphology with remaining catalytic metal tips. EDX patterns of InN nanowire for (c) part of core, and (d) tips.

그리고 (d)와 같이 VLS 성장기구를 이용하여 Selective Pattern Growth를 수행하였다. (d)의 삽입그림은 pattern growth의 개략도 이다. 금속 mask를 이용하여 Si 기판위에 Au를 5 nm 두께로 pattern 증착 후 HVPE를 통해 성장시켰다.

Fig. 2는 HVPE법으로 성장시킨 1차원 InN 나노선의 FE-SEM 그림이다. (a)는 InN 나노선의 평균직경 50~70 nm 이며, 길이가 10 μm 인 것으로 분석된다. 특히 (b)와 같이 나노선 끝부분을 확대하여 분석한 결과 금속 tip이 형성되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 이는 Au를 촉매로 하여 성장한 전형적인 VLS 성장기구를 따를 것으로 판단된다. 더욱더 정확한 성분 분석을 위하여 HR-TEM에 부착된 EDS를 이용하여 Fig. 2의 (c)와 (d)에 나타내었다. (c)의 EDS 결과와 같이 나노선 중심부에는 In 원소와 N 원소가 검출되며, (d)와 같이 나노선 tip 부분은 In, Au를 주성분으로 포함되어 있는 것으로 확인되었다. 뿐만아니라 금속 tip의 크기와 나노선의 직경이 유사한 것으로 보아 최초 Au 촉매의 용융 droplet의 크기를 조절한다면 성장된 나노선의 직경을 조절할 수 있을 것으로 사료된다.

HVPE법으로 성장시킨 1차원 InN 나노선의 결정구조와 표면 구조와 내부 crystalline을 분석하기 위해서 HR-TEM을 사용하였으며, Bright image 및 전자빔 회절 pattern을 Figs. 3~5에 나타내었다. 특히 전자회절 pattern은 individual 나노선의 결정구조와 결정성을 확인할 수 있는 유용한 분석 tool이며, 뿐만아니라 얻어진 pattern은 나노선의 성장방향을 확인할 수 있다. Figs. 3~5의 (a) 삽입그림에 전자회절 pattern을 나타내었으며, 모든 샘플의 측정 회절의 zone axis는 [100] 반향이다. pattern indexing 결과 hexagonal wurzite 결정구조를 가지는 것으로 확인되었으며, 모든 나노선 샘플의 성장방향은 [002] 방향을 가지는 것으로 분석되었다. Fig. 3에 Table 1의 EXP_1번 실험 조건에서 얻어

진 것으로 최초 나노선 성장이 일어난 샘플의 HR-TEM 결과이다. (a)에서 확인할 수 있듯이 나노선의 표면에 비정질 산화물 층과 같은 전기적 특성에 악영향을 끼치는 layer가 형성되지 않았다. 하지만 (b)와 같이 내부 crystalline의 형상에는 lattice의 규칙성이 많이 떨어지며, cluster와 같은 crystalline을 형성하는 것을 알 수 있었으며, 그의 회절 패턴에서도 Single crystalline 아니 poly crystalline의 pattern 구조가 나오는 것을 확인할 수 있었다. 이는 기판의 온도가 450°C 정도로 crystal growth 또는 lattice rearrangement 할 수 있는 thermal energy가 충분하지 않은 것으로 판단되며, F_{HCl} 에 대한 F_{NH_3} 의 유량 비율이 낮아 Nitrogen vacancy의 영향이 발생하는 것으로 사료된다. 이에 본 연구에서는 나노선의 성장되는 기판의 온도를 증가시키기 위해서 NH_3/HCl 유량비를 증가하는 Table 1의 EXP_2의 성장조건으로 변경하여, 성장된 InN 나노선의 HR-TEM 사진을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4의 (a)는 부드러운 표면은 가지지 못하였지만, 내부의 lattice crystalline은 비교적 규칙적인 배열을 가지고 있는 것을 확인할 수 있었다. 이로써 성장 시 기판의 온도가 높을수록 결정의 배열은 규칙성을 가지는 것으로 확인할 수 있었다. 하지만 전자회절 pattern으로 알 수 있듯이 결정내 응력에 의해 선명한 streak를 관찰할 수 있으며, (b)와 같이 나노선 내부에 많은 stacking fault가 형성되는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 성장 기판의 온도를 상승시키기 위해 반응종의 분압을 증가시켜 얻어진 결과로써, 1차원 단결정 InN 나노선 형성에 있어서 기판온도의 영향을 확인할 수 있었다. 그러나 EXP_2의 조건으로 성장시킨 InN 나노선은 여전히 InN 나노선 내부 결함이 존재한다. 이런 나노선 내부의 결함은 전기적, 광학적 특성에 아주 밀접한 영향을 가지기 때문에 defect free single crystalline 나노선이 요구된다. 이를 해결하기 위해서 본 연구에서는 제안하는 EXP_3의 조건으로

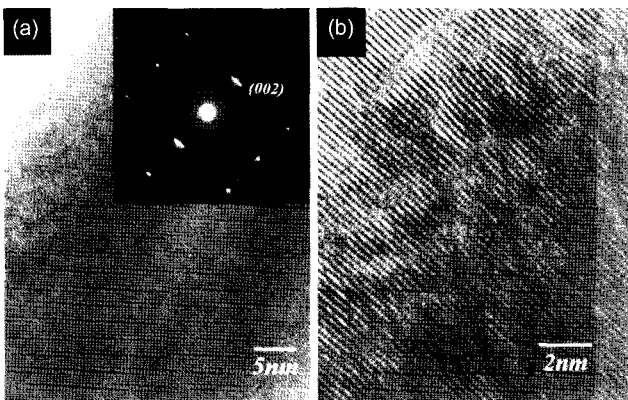


Fig. 3. HR-TEM image of 1-D crystalline InN nanowire (a) Bright field images of InN. The corresponding electron diffraction patterns are taken along the [100] zone axis at the inset. (b) Higher magnified lattice in the InN nanowire for the EXP_1 sample.

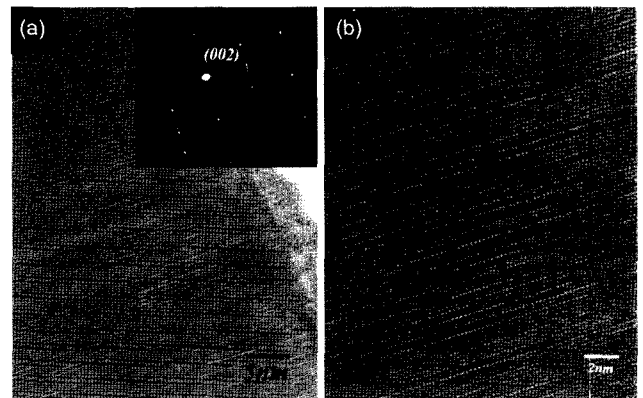


Fig. 4. HR-TEM image of 1-D crystalline InN nanowire for the EXP_2 sample (a) Bright field images and (b) Higher magnified lattice in the InN nanowire with more stacking faults.

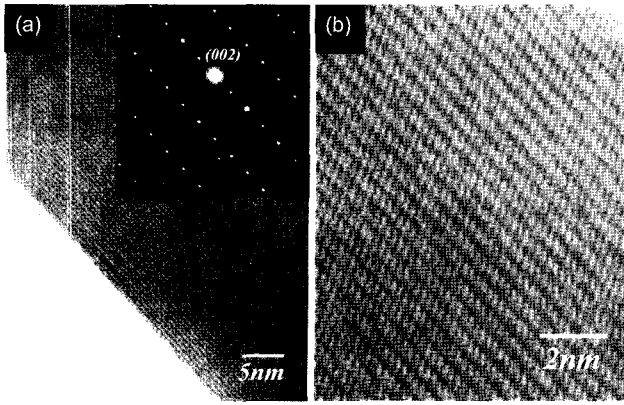


Fig. 5. HR-TEM image of 1-D crystalline InN nanowire for the EXP_3 sample (a) Bright field images and (b) Higher magnified lattice of defect free single crystalline InN nanowire.

성장한 1차원 단결정 InN 나노선의 HR-TEM 사진을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5의 (a)와 같이 나노선의 표면은 아주 깨끗한 Single Crystalline을 형성하고 있으며, 회절 pattern의 결과 또한 아주 미세한 streak만이 존재하는 것을 관찰할 수 있다. 특히 (b)와 같이 나노선 내부 lattice crystalline은 결함이 존재하지 않는 defect free single crystalline을 형성한 것을 관찰할 수 있었다.

그러므로 본 연구에서 제안하는 defect free single crystalline InN 나노선의 성장에 있어서 성장 시 기판의 온도와 반응 가스의 유량비 및 전체 N_2 분압과 반응가스의 유량비가 매우 중요한 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있었으며, 고 품질 1차원 InN 나노선 성장에 미치는 인자의 상관관계를 고려할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 개량된 HVPE법을 이용하여 defect free 1차원 InN 단결정 나노선을 성장 할 수 있었다. 이때, Au 촉매를 코팅한 Si 기판위에 VLS 성장 기구를 이용하여 InN 단결정 나노선을 성장시켰다. 성장된 InN 나노선은 기판온도와 전체 가스 유량에 따라 다양한 morphology를 갖는 1차원 구조의 나노구조체를 성장시킬 수 있을 뿐만 아니라 특정 성장조건을 통하여 결정 내 내부결함이 존재하지 않는 완전한 single crystalline InN 나노선을 성장시킬 수 있었다. 이에 본 연구는 1차원 InN 단결정 나노선의 성장에 있어서 미치는 인자를 고려할 수 있었으며, 이를 조절하여 고품위 단결정 나노선을 제조할 수 있었다. 그러므로 이를 이용하여 다양한 나노소자에 응용할 수 있을 뿐만 아니라 고품위 단결정 나노선의 응용성을 향상시키는데 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다. 또한 high velocity 메모리 소자, photonics 그리고 spintronics와 같은

차세대 전자 소자분야에 큰 기여를 할 것으로 예상된다.

Acknowledgement

이 논문은 산업자원부에서 시행하는 대학전력연구센터 육성지원사업에 의해 작성되었습니다.

REFERENCES

1. S. N. Mohammad and H. Morkoc, "Progress and Prospect of Group-III Nitride Semiconductors," *Prog. Quant. Electr.*, **20** [5/6] 361-525 (1996).
2. J. Wu, W. Walukiewicz, W. Shan, K. M. Yu, J. W. Ager III, E. E. Haller, H. Lu, and W. J. Schaff, "Effects of the Narrow Band Gap on the Properties of InN," *Phys. Rev. B* **66** [20] 201403 (2002).
3. A. Kasic, M. Schubert, Y. Saito, Y. Naishi, and G. Wagner, "Effective Electron Mass and Phonon Modes in N-Type Hexagonal InN," *Phys. Rev. B* **65** [11] 115206 (2002).
4. B. E. Fortz, S. K. O'Leary, M. S. Shur, and L. F. Eastman, "Transient Electron Transport in Wurtzite GaN, InN, and AlN," *Appl. Phys.*, **85** 7727-34 (1999).
5. J. Wu, K. M. Yu, J. W. AgerII, E. E. Haller, H. Lu, W. J. Schaff, Y. Saito, and Y. Nanish, "Unusual Properties of the Fundamental Band Gap of InN," *Appl. Phys. Lett.*, **80** [21] 3967-69 (2002).
6. M. Higashiwaki and T. Matsui, "Epitaxial Growth of High-Quality InN Films on Sapphire Substrates by Plasma-Assisted Molecular-Beam Epitaxy," *J. Crystal Growth*, **252** [1-3] 128-135 (2003).
7. T. Dietl, H. Ohno, and F. Matsuoka, "Hole-Mediated Ferromagnetism in Tetrahedrally Coordinated Semiconductors," *Phys. Rev. B* **63** [19] 195205 (2001).
8. S. Iijima, "Helical Microtubules of Graphitic Carbon," *Nature*, **354** [7] 56-58 (1991).
9. A. M. Morales and C. M. Lieber, "Coaxial Nanocable: Silicon Carbide and Silicon Oxide Sheathed with Boron Nitride and Carbon," *Science*, **281** [5379] 973-975 (1998).
10. W. I. Park, D. H. Kim, S.-W. Jung, and G.-C. Yi, "Metalorganic Vapor-Phase Epitaxial Growth of vertically Well-Aligned ZnO nanorods," *Appl. Phys. Lett.*, **80** [22] 4232-34 (2002).
11. X. T. Zhou, N. Wang, H. L. Lai, H. Y. Peng, I. Bello, N. B. Wong, C. S. Lee, and S. T. Lee, "β-SiC Nanorods Synthesized by Hot Filament Chemical Vapor Deposition," *Appl. Phys. Lett.*, **74** [26] 3942-44 (1999).
12. C. R. Martin, "Nanomaterials: A Membrane-Based Synthetic Approach," *Science*, **266** [5193] 1961-66 (1994).
13. T. Shibata, H. Sone, K. Yahashi, M. Yamaguchi, K. Hiramatsu, N. Sawaki, and N. Itoh, "Hydride Vapor-Phase Epitaxy Growth of High-Quality GaN Bulk Single Crystal by Epitaxial Lateral Overgrowth," *J. Crystal Growth*, **189-190** [15] 67-71 (1998).
14. C. M. Lieber, "One-Dimensional Nanostructures: Chemistry, Physics & Applications," *Solid State Commun.*, **107**

- [11] 607-16 (1998).
15. Y. Zhang, K. Yu, S. Ouyang, and Z. Zhu, "Patterned Growth and Field Emission of ZnO Nanowire," *Mater. Letters*, **60** [4] 522-26 (2006).
 16. S. Gwo, C.-L. Wu, C.-H. Shen, W. -H. Chang, T. M. HSu, J.-S. Wang, and J.-T. Hsu, "Heteroepitaxial Growth of Wurtzite InN Films on Si(111) Exhibiting Strong Near-Infrared PhotoLuminescence at Room Temperature," *Appli. Phys Lett.*, **84** [19] 3765-67 (2004).
 17. J. Chanudhuri, C. Ignatiev, S. Stepanov, D. Tsvetkov, A. Cherenkov, V. Dmitriev, and Z. Rek, "High Quality GaN Layers Grown by Hydride Vapor Phase Epitaxy - a High Resolution X-ray Diffractometry and Synchrotron X-ray Topography Study," *Mater. Sci. and Eng. B* **78** [1] 22-27 (2000).
 18. R. J. Molnar, "Growth of Gallium Nitride by Hydride Vapor-Phase Epitaxy," *J. Crystal Growth*, **178** [1-2] 147-56 (1997).
 19. M. A. Mastro, D. Tsvetkov, V. Soukhoveev, A. Usikov, V. Dmitriev, B. Luo, F. Ren, K. H. Baik, and S. J. Pearton, "Hydride Vapor Phase Epitaxy-Grown AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistors," *Solid-state Electronics*, **47** [6] 1075-79 (2003).
 20. Y.-K. Byeun, K.-S. Han, and S.-C. Choi, "Single Crystal Growth of One-Dimensional GaN Nanostructures by Halide Vapor-Phase Epitaxy," *J. Electroceram.*, **17** 903-07 (2006).
 21. Y. Wu, and P. Yang, "Direct Observation of Vapor-Liquid-Solid Nanowire Growth," *J. Am. Chem. Soc.*, **123** [13] 3165-66 (2001).