

반도체 나노선 전자소자 및 광전소자응용

길상철, *심성규, *김상식

한국과학기술정보원, 고려대학교 전기공학과

Electronic and optical devices based on semiconductor nanowires

Sangcheol Kil, *Sung-Kju Sim, *Sangsig Kim

Korea Institute of Science and Technology Information

*Department of Electrical Engineering, Korea University

Abstract

During the last few years, there have been many efforts on the fabrication of electronic and optical devices based on semiconductor nanowires. Room-temperature ultraviolet lasing in GaN nanowire, ultraviolet light sensing in ZnO nanowire, and dramatically improved hall mobility in Si nanowire have been demonstrated in this article. The studies on semiconductor nanowire based electronic and optical device is reviewed.

Key Words : 나노선, 자발적 형성, 양자구속효과, ZnO, GaN

1. 서론

현대 사회는 지식·정보화를 추구하고 영상, 음성, 데이터 등의 다양한 정보의 교환을 극대화할 수 있는 인프라를 제공하게 될 것이며 이는 인간 생활의 새로운 혁신을 예고하고 있다. 한편 이러한 지식 정보화는 고도의 정보 저장 및 통신기술이 필수적으로 요구되며 현재보다도 더욱 고속, 대용량의 정보처리가 가능한 소자로의 발전을 요구하고 있다.

반도체 나노선이란 현재 가장 활발히 연구되고 있는 Bottom-Up 나노소재 중 하나로 1차원 나노구조의 반도체이다. 수 nm의 직경과 수십 μm 의 길이를 가지고 있으며 self assembly(자발적인 형성)에 의해서 형성된다. 이러한 반도체 나노선은 단순히 크기에 의한 고집적화 이외에도 다양한 특성을 지니고 있다.

첫째, 소재의 물리적인 성질의 변화 이른바 양자구속 효과가 일어나 소자 성능의 향상을 보여주고 있다[1].

둘째, 높은 부피 대비 넓은 표면적을 가지고 있어 화학 및 바이오 센서에 응용 될 수 있으며 현재 많은 화합물 반도체 나노선을 센서로 이용하려

는 움직임이 활발하다.

이러한 물리적, 구조적 특성 이외에도 반도체 나노선은 비교적 간단한 방법으로 높은 결정성의 나노소재를 합성하는 것이 가능하다. 이는 기존의 반도체 소자와는 다르게 자발적인 형성에 의하여 간단한 열화학 증착법 등의 방법으로 만들어지기 때문이며 이러한 방식은 나노기술의 새로운 트렌드로 자리잡고 있다.

근래의 활발한 연구와 함께 반도체 나노선은 field effect transistor (FET), photo-detector (광검출소자), bio-chemical sensor뿐만 아니라, p-type과 n-type나노선을 이용한 rectifier, LED, diode logic device(논리 회로)등으로 응용의 폭을 넓혀왔다. 본 글에서는 반도체 나노선의 대표적인 응용을 통하여 반도체 나노선을 이용한 고성능 나노소자 연구를 살펴보고자 한다.

2. 본론

2.1 나노레이저

반도체 나노선은 끝부분에서 일어나는 응집성 강한 나노 크기 발광 현상으로 인하여 연구가 진행되어 왔다[2-4]. 최근 미국의 Saykally 그룹은

하나의 단결정 GaN 나노선에서도 UV lasing 이 나타남을 관찰하였는데[4], GaN 역시 ZnO와 마찬가지로 넓은 밴드갭을 갖고 있으므로 발광 다이오드, 레이저 및 포토디텍터 등에 사용될 정도로 폭넓은 응용범위를 갖고 있다. 1970년도에 저온에서 GaN 발광 현상을 관찰하였다는 보고가 처음으로 있었고, 1990년대 초반에 이르러서는 상온에서 GaN 필름의 lasing 현상을 관찰하였다. 또한 수십 ~ 수백 μm^2 기등모양으로 이루어진 구조에서 200kWcm^{-2} 정도의 낮은 문턱전압에서 lasing에 성공하였는데, 이 구조에서는 발광 파장 λ 가 GaN 막대의 반지름보다 훨씬 작았다. 그러나 나노선을 이용하는 경우는 발광 파장 λ 가 나노선의 반경 d 보다 큰 발광현상을 보였다.

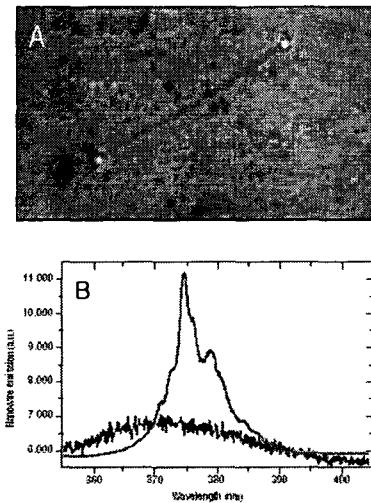


그림 1. GaN 나노선의 (A) lasing 현상과 (B) PL 스펙트럼.

단일 GaN 나노선에서의 lasing 현상이 그림 1(A)에서 볼 수 있다. 이때 GaN 나노선은 반지름이 최고 300 nm 정도이고 길이는 최고 40 μm 정도인데 나노선 끝부분에서의 발광 현상에서 볼 수 있듯이 나노선이 광도파로 역할을 하는 것을 보여주고 있다. 그림 1(B)는 GaN 나노선의 PL 스펙트럼이다. ZnO와 마찬가지로 lasing이 일어나는 문턱전압($\sim 700\text{J cm}^{-2}$) 아래에서는 그림 1(B)에서 볼 수 있듯이 폭이 넓은 피크를 보이며, 문턱전압 근처에서는 반치폭이 1 nm 이하인 매우 날카로운 모양의 피크를 보여주고 있다. 위와 같은 연구 결과 등으로 볼 때, 반치폭이 매우 작은 나노선을 이용한 나노레이저는 광 컴퓨팅, 의료진단 및 치료에

정보저장등에 많이 이용될 것으로 예상된다.

2.2 포토디텍터

P. Yang 그룹은 전자빔 리소그래피를 통해서 전극을 만들고, 그 전극 위에 ZnO 나노선을 형성하여 ZnO 나노선의 전기전도도가 UV에 굉장히 민감하게 반응한다는 것을 발견하였다[5]. 그림 2는 ZnO 나노선에 UV를 비출 때와 그렇지 않을 때의 I-V 그래프이다. 빛을 비추지 않았을 때에는 ZnO 나노선에는 약간의 암전류만 흐르기 때문에 절연 역할을 하는 것을 알 수 있고, UV를 비추어 주었을 때에는 UV에 의해서 가전자 대역에서 존재하던 전자가 전도대역으로 펌핑이 되면서 광전류가 흐르게 됨을 알 수가 있다.

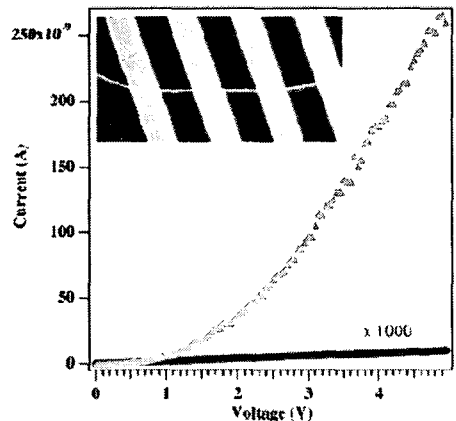


그림 2. 한개의 ZnO 나노선에 365nm, 0.3 mWcm^{-2} UV 빛에 의한 암전류 및 광전류의 I-V 곡선, (삽입) Au 전극위에 걸쳐있는 60nm ZnO 나노선의 SEM 사진.

이처럼 빛에 의해서 ZnO 나노선은 절연특성에서 전도특성으로 바뀌는 과정에 의해서 OFF/ON 상태가 되는 스위치로 사용이 가능한데 그러한 특성은 그림 3에서 보여주고 있다. 그림 3(A)는 ZnO 나노선의 파장 선택성을 보여주고 있는데, 나노선에 조사된 빛의 파장이 532nm일 때는 광전류가 흐르지 않고 ZnO 밴드갭보다 큰 에너지인 365nm의 파장이 조사될 때에는 광전류가 흐르는 것을 알 수가 있다. ZnO에서의 광전류는 광에 의해 형성된 전자, 정공과 ZnO 표면에 흡착된 산소와 관련이 있다고 알려져 있다. 즉, 광을 조사하지 않았을 때에는 공기중의 산소가 n-type ZnO 반도체에 존재하는 전자를 받아서 음 이온화된 산소가 ZnO

표면에 흡착되는데, 이때 ZnO 나노선의 표면 근처에서는 전자가 없는 공핍층이 형성된다. 이 ZnO 나노선에 자외선 광을 조사하면 광에 의해서 전자와 정공이 생기는데, 정공은 나노선의 표면으로 이동하여 산소 음이온과 결합하고 산소는 나노선의 표면에서 탈착하게 된다. 동시에 전자는 공핍층으로 이동하여 공핍층을 얇게 해서 ZnO 나노선의 전기전도도를 현저하게 증가시키고 있다.

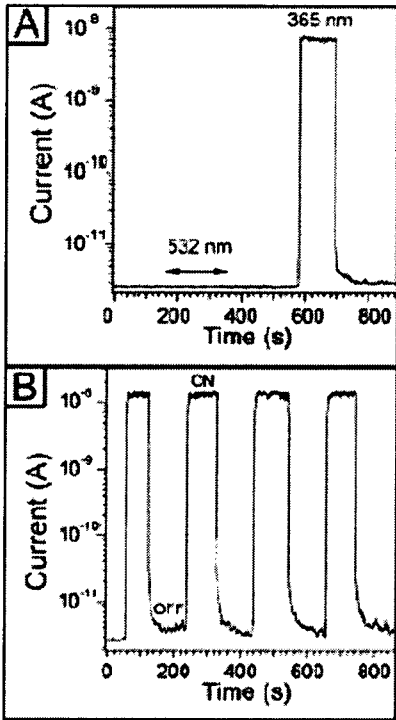


그림 3. (A)532nm, 365nm의 파장의 빛을 노출시켰을 때 ZnO 나노선의 광응답의 감도, (B) 작은 크기의 UV 램프를 ON, OFF 시켰을 때의 높고 낮은 ZnO 나노선의 전도성 상태의 스위칭 효과.

2.3 전자소자

반도체 나노선을 나노크기의 전자소자에 응용하고자 하는 시도가 활발히 이루어져 왔다. 그리하여 반도체 나노선을 "Bottom-Up" 방식으로 만든 간단한 다이오드와 트랜지스터의 빌딩블록으로 사용하여 더 복잡한 나노전자소자를 제작하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 최근 미국의 나노분야의 신생 기업인 Nanosys사는 나노선 및 나노벨트를 기판상에 배열하여 전도 채널로 이용한 Thin Film

Transistor(TFT)를 개발하여 보고하였다[10]. 이 보고는 최근의 반도체 나노선 전자소자기술 연구 동향의 큰 전환점의 양상을 나타내어 주목되고 있다. 현재까지의 반도체 나노선 전자소자의 응용이 다양한 기술적 시도의 단계였다고 한다면 이후의 단계에서는 나노선을 이용한 고성능 소자의 출현이 예상되고 있다.

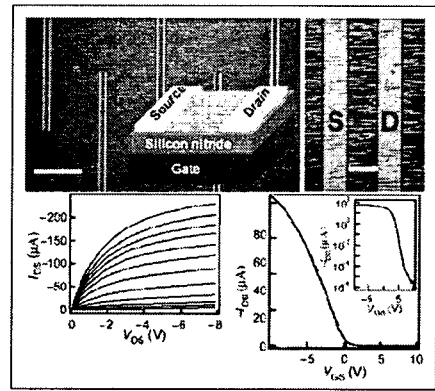


그림 4. 나노선을 전도 채널로 이용한 TFT 소자와 특성.

그림 4는 나노선을 이용한 TFT를 나타내고 있다. 이러한 구조의 나노선을 이용한 TFT의 경우 전도채널에 나노선이 사용되고 있다. 이는 나노선의 향상된 전기 전도 특성을 기존의 소자에 적용하여 성능의 진보를 이루려는 시도로써 성능의 향상을 보고하고 있다. 본 구조에서 사용된 p-type Si 나노선 채널의 정공 이동도는 약 $119\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{S}^{-1}$ 로써 이는 현재의 TFT에서 사용되고 있는 비정질 Si에서의 $<1\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{S}^{-1}$ 및 차세대 TFT의 다결정 Si의 $120\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{S}^{-1}$ 와도 견줄만한 수치이다. 이러한 값은 아직 나노선이 최적화된 도핑농도와 표면 처리 공정을 거치지 않았다는 점에서 큰 의미를 가지고 있다.

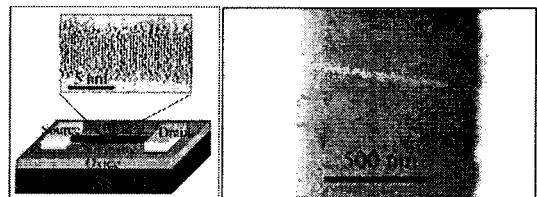


그림 5. 실리콘 단일 나노선을 이용한 FET 소자.

그림 5은 단일 나노선 FET구조를 나타내고 있다. C. M. Lieber 그룹은 연구에서 Si 나노선에 대하여 표면 패시베이션 및 열처리를 통하여 전극의 접촉을 향상시켰다[1]. 그 결과 Si 나노선의 전기 전도도와 전하이동도에서 평면형 반도체 소재인 SOI 기판을 활용한 FET와 비교하여 월등한 성능을 나타내었다. 전하의 이동도는 약 $230\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{S}^{-1}$ 에서 최대 $1350\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{S}^{-1}$ 를 나타내었으며 전기전도도는 SOI FET와 비교하여 평균 약 7배정도의 성능 향상을 보고하였다. 이러한 사실은 나노선의 무한한 가능성을 보여주는 단적인 예로써 향후 반도체 나노선을 이용한 고성능 소자의 출현을 예감하게 한다.

3. 결 론

최근 많은 기술적인 시도들을 통하여 반도체 나노선이 고성능 나노소자 실현의 한가지 방법으로 자리잡아가고 있다. 하지만 반도체 나노선을 소자에 응용하기 위해서는 해결해야 할 과제들이 많이 남아있다. 반도체 나노선이라는 소재의 특성을 당장 소자에 이용될 수 있을 만큼 기술적인 과제가 해결되어있지 않으며 bottom up 방식을 기반으로 하는 보다 새로운 구조의 설계기술과 이를 뒷받침할 수 있는 제조 및 성장 제어기술이 필요하기 때문이다.

하지만 불과 십여 년 전에 보고되기 시작한 탄소나노튜브 소재가 현재 미국에서 3년 내에 비휘발성 메모리 시작품 제작을 목표로 연구가 진행되고 있다. 이는 나노과학이 단지 꿈이 아닌 현실임을 말하고 있으며 현재가 나노소자의 높은 잠재력을 깨우고 있는 단계임을 나타낸다. 반도체 나노선 또한 현재의 많은 문제점을 극복하기 위한 연구가 계속되어야 하며 다양한 접근과 시도를 통하여 미래의 고성능 소자에서 하나의 큰 축으로 성장하리라 믿는다.

참고 문헌

[1] Y. Cui, Z. Zhong, D. Wang, W. U. Wang, C. M. Lieber, "High performance silicon nanowire field effect transistors", *Nano Lett.*, Vol. 3, No.2, p. 149, 2003.
 [2] X. Duan, Y. Huang, R. Agarwal and C. M. Lieber, "Single-nanowire lectrically driven lasers", *Nature*,

Vol. 421, p. 241, 2003.
 [3] M. H. Huang, S. Mao, H. Feick, H. Yan, Y. Wu, H. Kind, E. Weber, R. usso, and P. Yang, "Room-Temperature Ultraviolet Nanowire Nanolasers", *Science*, Vol. 292, p. 1897, 2001.
 [4] J. C. Johnson, H. -J. Choi, K. P. Knutsen, R. D. Schaller, P. Yang, and R. J. Saykally, "Single gallium nitride nanowire lasers", *Nature Materials*, Vol. 1, p. 106, 2002.
 [5] H. Kind, H. Yan, B. Messer, M. Law, and P. Yang, "Nanowire Ultraviolet Photodetectors and Optical Switches", *Adv. Mater.*, Vol. 14, p. 158, 2002.
 [6] J. Wang, M. S. Gudiksen, W. Duan, Y. Cui, C. M. Lieber, 'Highly Polarized Photoluminescence and Photodetection from Single Indium Phosphide Nanowires', *Science*, Vol. 293, p. 1455, 2001.
 [7] Y. Cui, Q. Wei, H. Park, and C. M. Lieber, "Nanowire Nanosensors for Highly Sensitive and Selectrive Detection of Biological and Chemical Species", *Science*, Vol. 293, p. 1289, 2001.
 [8] E. C. Walter, R. M. Penner, H. Liu, K. H. Ng, M. P. Zach, and F. Favier, "Sensors from electrodeposited metal nanowires", *Surf. Interface Anal.*, Vol. 34, p. 409, 2002.
 [9] M. Law, H. Kind, B. Messer, F. Kim, and P. Yang, "Photochemical Sensing of NO₂ with SnO₂ Nanoribbon Nanosensors at Room Temperature", *Angew. Chem Int. Ed.*, Vol. 41, p. 2405, 2002.
 [10] X. Duan, C. Niu, V. Sahi, J. Chen, J. W. Parce, S. Empedocles, J. L. Goldman, "Thin-film transistors (TFTs) are the fundamental building blocks for the rapidly growing field of macroelectronics", *Nature*, Vol. 425, p. 274, 2003.