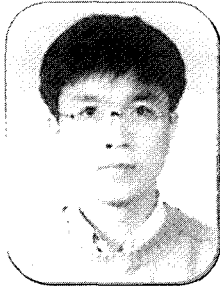
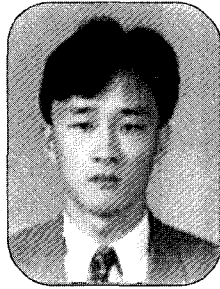


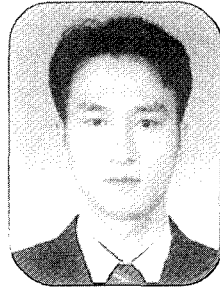
## 1차원 나노선의 응용



· 민병돈 ·  
고려대  
BK21 정보기술사업단  
계약교수



· 황주원 ·  
고려대  
전기공학과 석사과정



· 이종수 ·  
고려대  
BK21 정보기술사업단  
계약교수



· 김상식 ·  
고려대  
전기공학과 부교수

### 1. 서론

“18개월마다 반도체의 집적도가 배로 올라간다”라는 무어(Moore) 법칙에서 예견되었듯이 지난 30년간 전자산업은 한 개의 칩에 집적되는 트랜지스터의 수가 18개월마다 두 배씩 증가될 만큼 발전하여 왔다. 전자산업의 핵심부분인 반도체 산업분야는 점점 더 고집적화하는 방향으로 진행되고 있다. 과거에는 반도체 집적 회로가 마이크로 범위의 수준에서 제어되었지만 21세기에는 마이크로의 1/1000인 나노 범위내에서 소자들을 제어하는 나노 기술이 본격화 될 것으로 예상된다. 이러한 이유는 고집적화에 필수적인 회로의 선폭을 마이크로 수준에서 더 나아가 나노 단위까지 제어할 수 있는 나노 패터닝 기술이 개발되었기 때문이다. 나노 스케일로 접근하기 위한 소자공정기술은 크게 2가지 방법으로 나눌 수 있다. 그 중에 하나는 박막을 증착하고 리소그래피(lithography)와 에칭(etching)을 이용한 나노패터닝 기술을 통하여 접근하는 방식, 즉 벌크에서 시작하여 나노스케일의 소자를 형성하는 위에서 아래로의 접근(Top-Down)방식이다. 다른 방법은 자연에 존재하는 원자들 사이의 결합력을 이용하여 나노 크기의

입자를 형성하고 이러한 입자를 2차원 또는 3차원으로 배열하여 소자를 만드는 아래에서 위로의 접근(Bottom-Up)방법이 있다. 나노소자를 만들기 위한 이러한 2가지 공정기술의 접근방법은 서로 다른 장점과 단점을 가지고 있다. Top-Down 방식은 원하는 크기와 위치의 제어 등의 장점을 가지고 있지만, 광리소그래피가 100nm 이하에서는 해상도의 한계에 부딪쳐, 광리소그래피의 대안으로 전자빔 혹은 X-선 리소그래피를 이용하는 방법이 제안되었다. 하지만, 현재의 전자빔과 X-선등을 이용한 리소그래피 기술 역시 최소 길이의 한계를 가지고 있다. 이러한 이유로, Top-Down 방식은 반도체 집적 공정 기술의 개발에 따른 부대비용의 증가로 인하여 경제적인 효율성에서 큰 단점을 가지고 있다[1]. 따라서 Bottom-Up방식이 사람들이 자연스럽게 접근하는 방법이 되었다. 이 방식은 원자 몇 개로 이루어진 수 나노 크기까지의 작은 물질을 합성할 수 있기 때문에 Top-Down방식과 비교할 때 생산적인 측면에서 많은 장점을 갖고 있다. 하지만 위치나 크기의 제어, 형성된 입자크기의 불균일성 등의 문제점으로 인해서 소자의 집적화 등에 어려움을 겪고 있기 때문에 나노소자에 적용하기 위해서는 새로운 패러다임이 요구되고 있다.

벌크와 비교하여 저차원 나노물질은 높은 부피당 표면적 비와 양자 구속효과로 인해서 벌크와는 다른 전기적, 광학적, 화학적, 열적 특성을 보이고 있다. 이와 같은 여러가지 특성을 보이는 많은 저차원 물질 중에서도 Bottom-Up 방식으로 합성된 1차원 나노구조, 즉 나노선이 그 중에서도 뛰어난 특성을 보여주고 있다. 1990년대에는 나노선에 관한 연구는 탄소나노튜브(CNT)에 편중되었지만, CNT를 소자에 적용하려는 많은 노력들에도 불구하고 CNT를 이용한 소자 개발은 아직은 미미할 정도로 특성에 많은 한계를 보이기 시작했다. 새로운 돌파구를 찾던 많은 연구자들은 CNT 외에도 다른 종류의 반도체 나노선에서도 뛰어난 물리적 현상들을 발견하게 되어서 2000년대 이후에는 여러 가지 종류의 반도체 나노선에 대해서 많은 연구가 이루어지고 있다. 반도체 나노선은 합성시 뛰어난 결정성을 보이며, 나노선 그 자체로서 채널역할을 할 수 있고, 탄소나노튜브에서는 할 수 없었던 도핑에 의한 전기전도도와 밴드갭 조절이 가능할 뿐만 아니라, 반도체 나노선을 이용하면 Top-Down 방식에서는 쉽게 할 수 없었던 이종접합(heterojunction) 나노구조를 손쉽게 합성할 수 있다. 그러므로 현재의 나노 크기의 소자들에 대한 연구는 대부분이 소자의 소형화에 필수적인 기술인 리소그래피를 통한 전극 형성과, Bottom-Up 방식으로 합성된 나노물질을 이용하여 소자화하기 위한 연구가 여러 분야에서 진행되고 있다. 본 논문에서는 나노 패터닝된 전극에 Bottom-Up 방식으로 합성된 1차원 반도체 나노선을 이용하여 주로 연구되고 있는 소자에 대한 연구내용을 전개하고자 한다.

표1. 나노선을 이용한 소자의 종류.

	특성	종류
광소자	광특성, 광자수송특성	나노레이저, 나노스위치, 나노광검출기, 나노LED 등
전자소자	전자수송특성	다이오드, BJT, 인버터, 논리소자, 메모리소자 등
센서	화학적, 생물학적 특성	화학센서, 바이오센서

## 2. 소자로의 적용

### 2.1 나노레이저(Nano-Laser)

1차원 나노선의 끝부분에서 응집성이 강한 나노 크기의 발광 현상에 대한 연구 결과들이 최근 들어 보고되고 있다[2-4]. 2001년 사파이어 기판 위에 ZnO 나노선을 성장시켜 상온에서의 UV lasing 효과에 대한 연구결과를 발표하였다[3]. ZnO는 3.37eV의 넓은 에너지 갭을 갖는 화합물 반도체이며 청색 발광 소자에 적합한 물질로서 잘 알려져 있다. 또한, ZnO 엑시톤의 결합에너지가 약 60meV로서 상온에서의 열에너지(26meV) 보다 매우 크므로 ZnSe (22meV), GaN (25meV) 등과 비교했을 때 매우 안정적인 발광 현상을 갖는 물질이다. ZnO 나노선을 이용한 lasing 현상을 실험하기 위한 기본적인 방법은 그림 1(A)에서 보여주고 있다. (001) 면을 갖는 hexagonal ZnO 나노선과 (110)면의 사파이어 기판 사이에 좋은 계면 상태를 갖기 때문에 사파이어 기판위에 수직성장된 ZnO 나노선은 나노 발광소자를 만들기 좋은 조건을 갖는데, 그림 1(B)는 ZnO 나노선에서 나타나는

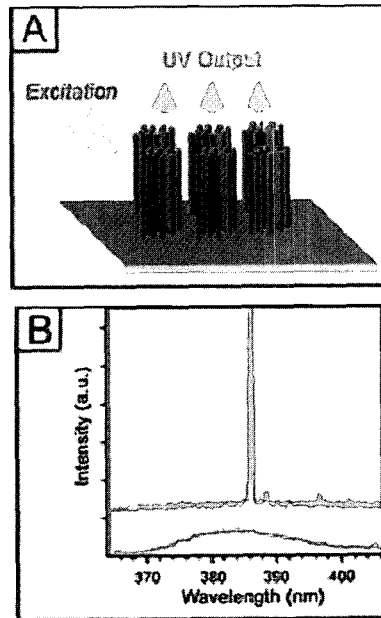


그림 1. (A) 레이저 특성을 보기위한 개략도, (B) ZnO 나노선으로부터 파워별로 측정된 발광 스펙트라.

PL 스펙트라를 보여주고 있다. 그림 1(B)에서 넓은 반치폭을 갖는 아래 그림은 펌핑파워가 문턱전압보다 작기 때문에 나타나는 피크이며, 엑시톤의 재결합 과정인 엑시톤-엑시톤의 충돌과정을 통해서 나타나는 피크이다. 펌핑 파워가 문턱전압 (threshold)를 넘어서게 되면 그림 1(B)의 위의 그림에서 보여지듯이 반치폭이 매우 좁은 피크가 나타나는 것을 알 수가 있다.

최근에는 미국의 Saykally 그룹은 하나의 단결정 GaN 나노선에서 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 $\mu\text{m}$  기둥모양으로 이루어진 구조에서  $200\text{kWcm}^{-2}$  정도의 낮은 문턱전압에서 lasing에 성공하였는데, 이 구조에서는 발광 파장  $\lambda$ 가 GaN 막대의 반지름보다 훨씬 작았다. 그러나 나노선을 이용하는 경우는 발광 파장  $\lambda$ 가 나노선의 반경

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

## 2.2 포토디텍터 및 광학스위치

나노소자가 응용될 수 있는 여러가지 분야에서 나노스위치는 메모리 혹은 논리소자등에 매우 중요한 응용 분야 중의 하나이다. 나노 혹은 분자 크기의 전기적 스위치는 이미 나노튜브 트랜지스터에서 보여진 것처럼 게이트 포텐셜을 통해서 구현이 되었다.

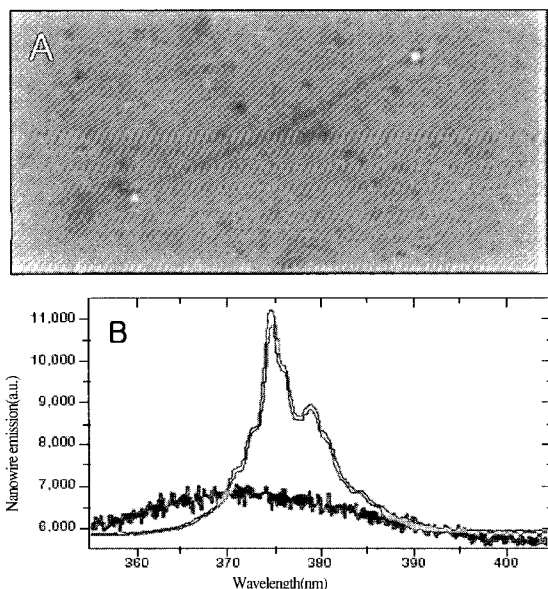


그림 2. (A) 한개의 GaN 나노선 레이저 far-field 사진, (B) PL 스펙트럼.

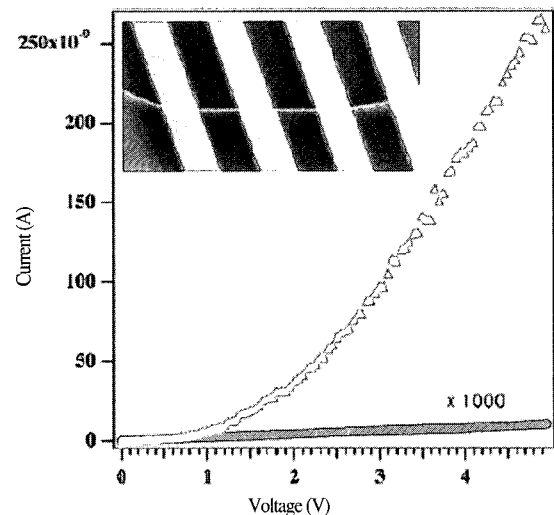


그림 3. 한개의 ZnO 나노선에  $365\text{nm}$ ,  $0.3\text{mWcm}^{-2}$  UV 빛에 의한 암전류 및 광전류의 I-V 곡선, (삽입) Au 전극위에 걸쳐있는  $60\text{nm}$  ZnO 나노선의 SEM 사진.

최근에 전 세계적으로 여러 그룹들에 의해서 한 개의 나노선을 이용하여 전기적 스위치에 응용될 수 있는 가능성이 제기되고 있다[5-6]. Yang 그룹은 전자빔 리소그래피를 통해서 전극을 만들고, 그 전극 위에 ZnO 나노선을 형성하여 ZnO 나노선의 전기전도도가 UV에 굉장히 민감하게 반응한다는 것을 발견하였다[5]. 그림 3은 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.

이처럼 빛에 의해서 ZnO 나노선은 절연특성에서 전도특성으로 바뀌는 과정에 의해서 OFF/ON 상태가 되는 스위치로 사용이 가능한데 그러한 특성은 그림 4에서 보여주고 있다. 그림 4(A)는 ZnO 나노선의 파장 선택성을 보여주고 있는데, 나노선에 조사된 빛의 파장이 532nm 일 때는 광전류가 흐르지 않고 ZnO 밴드갭보다 큰 에너지인 365nm 파장이 조사될 때는 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 음이온화된 산소가 ZnO 표면에 흡착되는데, 이때 ZnO 나노선의 표면 근처에서는 전자가 없는 결핍층이 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 결핍층으로 이동하여 결핍층을 얇게 해서 ZnO 나노선에 흐르는 전도도의 현저한 증가를 가져오게 됨을 나타내고 있다.

하버드 대학의 Lieber 그룹은 한 개의 InP 나노선을 Si 기판위에 뿌리고 그 위에 전자빔 리소그래피를 통해서 전극을 형성한 후에, InP 나노선에 편광된 레이저를 입사시켜서 행한 컨덕턴스 실험을 하였는데, 이에 대한 개략도가 그림 5(A)에서 보여주고 있다 [6]. 그림 5(B)는 InP 나노선에 레이저의 파워를 증가

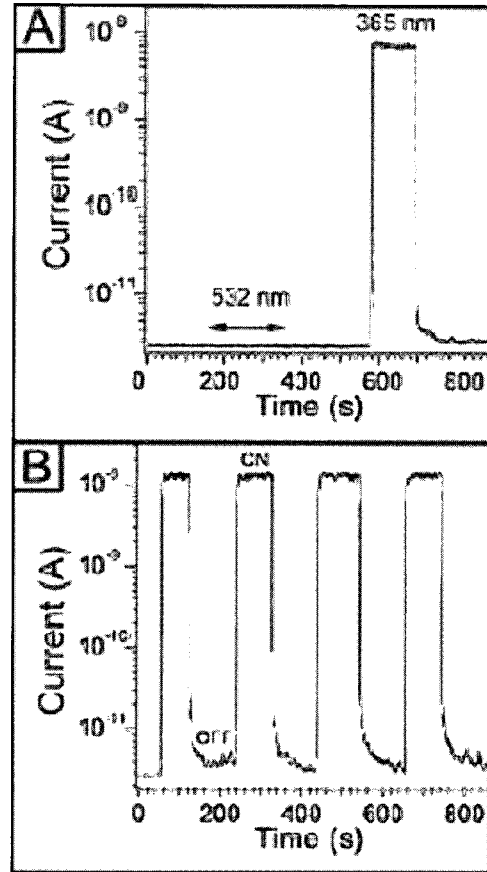


그림 4. (A) 532nm, 365nm의 파장의 빛을 노출시켰을 때 ZnO 나노선의 광응답의 감도, (B) 작은 크기의 UV 램프를 ON, OFF 시켰을 때의 높고 낮은 ZnO 나노선의 전도성 상태의 스위칭 효과.

함에 따라서 컨덕턴스가 증가하는 것을 보여주고 있다. InP 나노선에 평행하게 편광된 빛을 조사하였을 때는 컨덕턴스가 증가하는 것을 보여주고(a), 수직하게 편광된 빛을 조사하였을 때에는 컨덕턴스의 변화가 거의 없는 것을 확인하였다(b). 이와같은 결과들은 광에 의한 단일 나노선의 컨덕턴스의 변화와 광전류를 제어할 수 있게 됨으로써 나노선을 이용한 나노크기의 광 게이트 스위치 뿐만 아니라 화학적, 생물학적 센서로서 활용할 수 있음을 보여주었다.

### 2.3 센서

1차원 나노구조를 이용한 또 다른 주요한 응용분

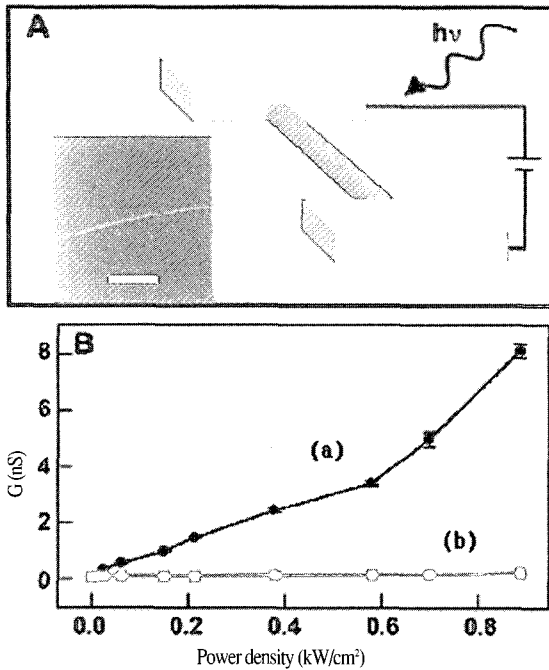


그림 5. 한개의 InP 나노선을 이용한 편광 광디텍션 (A) 나노선 광디텍터 개략도, (삽입) 전극에 부착되었 있는 20nm의 지름을 갖는 나노선의 SEM 사진, (B) 여기 power density 에 따른 전도도의 변화, 편광된 빛이 나노선에 평행하게 조사되었을 때(a)와, 수직하게 조사되었을 때(b).

야는 의학적, 환경적 혹은 안전 검사등의 목적으로 분자를 감지하는 센서로서의 응용이다. 일반적으로 나노구조, 즉 나노입자 혹은 나노선은 벌크에 비해서 굉장히 높은 부피당 표면적 비를 가지므로 표면에 흡착되는 물질들에 대해서 전기적인 특성들이 극단적으로 변하게 된다[7-9]. Lieber 그룹은 나노선을 이용한 화학적, 생화학적 센서로서의 특성을 확인하였는데[7], 반도체 나노선의 표면 성질을 바꿔서 PH와 생물학적 종에 대해서 감지할 수 있는 높은 감도를 갖는 센서에 대해서 연구했다. 또 한 예로써 Yang 그룹은 최근에 한 개의 SnO<sub>2</sub> 단결정 나노선과 나노리본을 이용하여 상온에서 동작하는 광화학 NO<sub>2</sub> 센서를 제작하였다[9].

나노결정 SnO<sub>2</sub>의 전기전도도는 결정표면에 흡착된 분자와 그에 따른 공핍층의 변화에 크게 의존한다. 대기층의 오존과 스모그 형성에 중요한 역할을

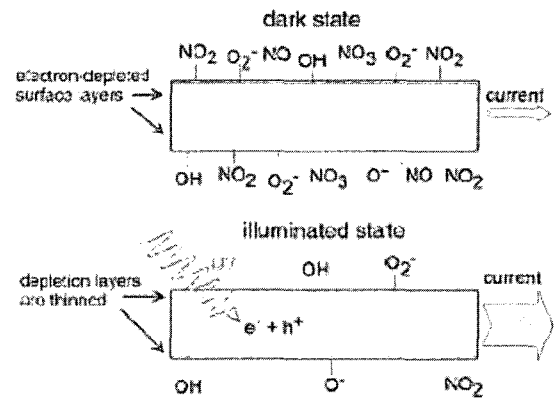


그림 6. SnO<sub>2</sub> 단결정에서의 광탈착을 보여주는 개략도.

하는 가스인 NO<sub>2</sub>는 SnO<sub>2</sub> 표면에 강하게 화학 흡착을 하여 전자를 붙잡아두는 역할을 하기 때문에 SnO<sub>2</sub>의 컨덕턴스를 측정함으로써 NO<sub>2</sub>를 감지할 수 있게 된다. 그런데 센서의 표면에 흡착된 NO<sub>2</sub> 가스를 제거하여 센서의 감도를 유지하기 위해서는 300~500°C 정도의 고온에서 센서를 작동하여야 하는데, 고온에서 작동하는 것은 폭발위험이 있는 환경에서는 바람직하지 않다. 그러나 SnO<sub>2</sub> 단결정의 밴드갭과 비슷한 에너지의 UV를 조사했을 때 나타나는 단결정 SnO<sub>2</sub> 나노리본의 뛰어난 광전 특성을 이용하면 상온에서도 흡착-탈착 현상을 일으킬 수가 있으므로 상온 작동이 가능하다. UV를 쬐어주면 SnO<sub>2</sub> 내에 전자와 홀이 형성되는데, 그러면 광에 의해서 형성된 홀은 표면에서 NO<sub>2</sub> 등의 분자에 의해서 구속된 전자와 재결합하고 그 과정에서 NO<sub>2</sub>와 그외에 다른 가스가 탈착하게 된다. 그 결과로 나노리본의 공핍층이 줄어들어서 전기전도도가 증가하게 되는데, NO<sub>2</sub>가스 농도는 빛이 쬐여진 상태에서 컨덕턴스의 변화를 측정함으로써 알 수 있다. 그림 6에 이에 대한 그림이 나타나 있다.

### 2.4 전자소자

서론에서 언급한 것처럼 컴퓨팅 속도가 급격하게 증가함에 따라서 전자소자의 축소화가 Top-Down 방식으로 시도되었지만 100nm 아래의 크기로 접근하면서 소자 제작 비용이 커다란 문제로 대두되었다.

나노선과 나노튜브는 전자와 엑시톤을 효과적으로 수송하므로 이들은 나노크기의 전자소자에 쓰일 수 있는 아주 훌륭한 이상적인 빌딩블록이 된다. 그리하여 최근에는 탄소나노튜브나 반도체 나노선을 “Bottom-Up” 방식으로 만든 간단한 다이오드와 트랜지스터를 빌딩블록으로 사용하여 더 복잡한 나노 전자소자를 제작하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 그런데 개개의 소자들의 크기가 급격히 작아짐에 따라서 전자 수송의 특성 연구가 중요한 문제로 대두되었다[11-15]. 금속 나노선은 지름이 특정값 이하로 작아짐에 따라서 금속성에서 반도체성 물질로 변하는 것을 확인하였는데 대표적인 그룹으로 Dresselhaus 그룹은 단결정 Bi 나노선이 52nm이하의 지름에서는 금속성이 반도체성으로 변환한다는 것을 확인하였고, Choi 그룹은 40nm이하의 지름을 갖는 단결정 Bi 나노선이 온도가 감소함에 따라서 저항이 증가하여 반도체성과 절연체의 특성을 갖게 된다고 보고했다. 이것은 양자구속 효과의 결과로서

전도대와 가전도대가 서로 반대방향으로 움직여서 밴드갭이 넓어진 결과이다. 이러한 물질에서는 나노선의 길이 방향으로 운반자가 구속되고 나노선 표면 결합 때문에 운반자의 이동도가 줄어든다.

나노선을 전자소자에 응용하기 위해서 필요한 또 다른 문제는 이러한 나노선을 어떻게 조합해서 다양한 소자구조를 만드는 가에 있다. Lieber 그룹은 반도체 나노선을 조합해서 전기적 특성을 제어할 수 있는 p-n 접합과 접합 어레이를 만들었다. 단결정 InP 나노선에 Te와 Zn를 도핑하여 n-과 p-형 InP 나노선을 만들었다. 그림 7에서 보여지는 것처럼 InP 나노선의 컨덕턴스는 n형과 p형 나노선에서 게이트 전압이 변함에 따라서 서로 반대로 응답하는 특성을 보였다. 또한 Si 나노선을 이용하여 n+형, n형 Si 나노선을 p형과 교차함으로써 n+-p-n 바이폴라 접합 트

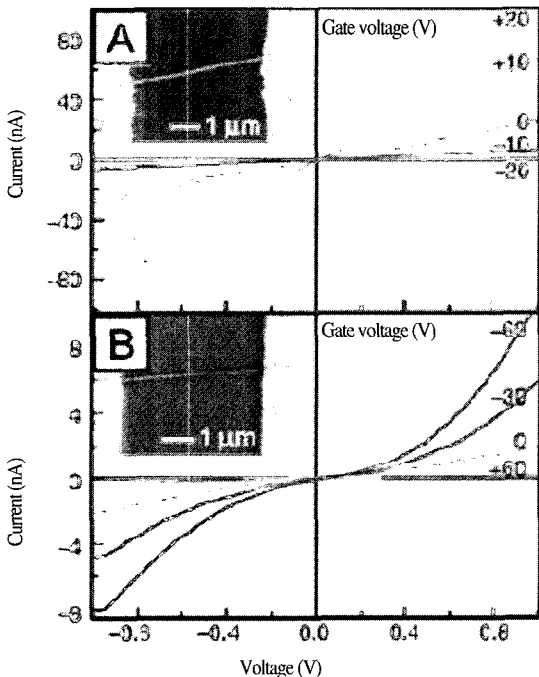


그림 7. InP 나노선의 전기적 transport, (A) Te가 도핑된 나노선의 I-V 곡선, (B) Zn가 도핑된 나노선의 I-V 곡선.

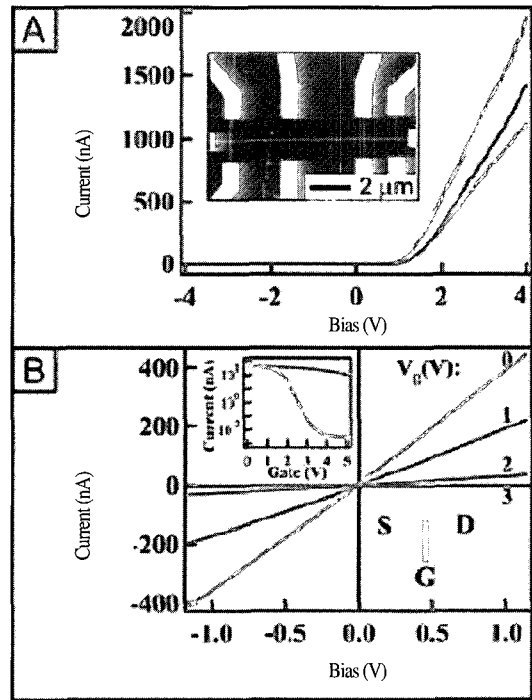


그림 8. A) 4개의 p-type Si 나노선과 1 개의 n-type GaN 나노선 사이에 형성된 다중접합 어레이에 대한 I-V 곡선. 4개의 곡선은 4개의 접합 각각에 대한 I-V 특성을 나타낸다. B) 게이트 전압 변화에 따른 나노선 FET의 I-V 특성 곡선.

랜지스터를 제작하였다. 이러한 접합을 이용해서 그림 8 같은 집적 나노 FET 어레이를 만들었다. 여기에서 나노선은 채널과 게이트 전극으로 사용되었는데, 나노선 p-n 접합과 나노선 FET 를 이용하면 논리회로와 같은 더 복잡하고 기능적인 전자소자를 Bottom-Up 방식으로 만들 수가 있다. 그림 9는 나노선 p-n접합을 이용한 OR, AND, NOR 게이트에 관한 그림이 그려져 있다. 이러한 나노선 빌딩블록은 100nm 이하로 제작 가능하여 단일 칩에 소자의 고집적화를 가져올 수 있으며, 필요한 소자의 기능에 맞는 재료를 선택할 수 있는 장점이 있다.

### 3. 결론

지금까지 그동안 세계적으로 활발히 연구중인 나노선을 이용한 소자로의 응용이 어떻게 진행되고 있는지에 대한 내용을 살펴보았다. 위에서 언급한 나노선의 특성을 이용한 연구 이외에도 나노선의 독특한 기계적 특성을 활용하여 나노핀셋, 나노저울 등 나노스케일의 도구가 제작이 되어 활용에 대한 많은 연구 또한 진행중이다. 나노선의 소자로서의 응용에 대해 다시한번 정리해보면, 1차원 나노선은 원통형 모양의 기하학적인 구조를 가지고 있고, 높은 부피당 표면적 비와 양자 구속효과의 가능성 때문에 기

존의 벌크와는 전혀 다른 특성을 나타내고 있어서 최근에 많이 주목받고 나노구조이다. 이러한 나노선을 이용해서 나노 소자를 구현하기 위해서 현재 접근하는 방식은 두가지 방법이다. 그중 한가지는 Top-Down 방식의 접근방법이다. Nano-CMOS나 MRAM 등과 같이 많은 분야가 아직까지 이 방식을 이용하고 있지만, 이 방법은 경제적 효용성에서 한계를 보이는 치명적인 결함을 가지고 있다. 나머지 방법은 Bottom-Up 방식의 접근기술이다. 그러나 이 방법 또한 지금 당장 소자에 응용할 수 있을 만큼 소재의 특성이 규명되지 않았으며, 새로운 설계 기술 등이 필요하다는 어려운 점을 많이 가지고 있다. 그러나 성공하였을 경우에는 저가의 재료로 커다란 부가가치를 창출할 수 있다는 점에서 많은 부분에서 연구가 진행중이다. 불과 몇 년전만 하더라도 나노선의 특성에 대한 연구가 많이 진행이 되었는데, 최근에는 나노선을 이용한 소자에 대한 연구가 활발히 연구중이다. 탄소나노튜브가 1991년 Ijima에 의해 발견된 뒤로 약 10년이 지나서야 소자에 대한 연구가 진행되는 것에 비하면 굉장히 빠른 진보라 할 수 있다. 그러나 최근에 연구되고 있는 나노선에 대한 연구는 전기적인 특성을 확인하기 위해서는 전극형성이 필수적인 요소인데 이러한 방법은 Top-Down 방식을 사용하고, 채널을 이루는 부분은 Bottom-Up 방식으로 합성된 나노선을 이용하는 소자가 주로 연구되고 있다. 이처럼 지금까지는 나노스케일로 접근하는 두가지 방식이 함께 적용이 되어서 좋은 결과들이 많이 보이고 있지만, 앞으로 나노선을 소자로서 적용함에 있어서 더 좋은 결과를 창출하기 위해서는 위에서 언급한 두가지 접근방식에 대한 보다 확실한 제조명이 필요할 것이다.

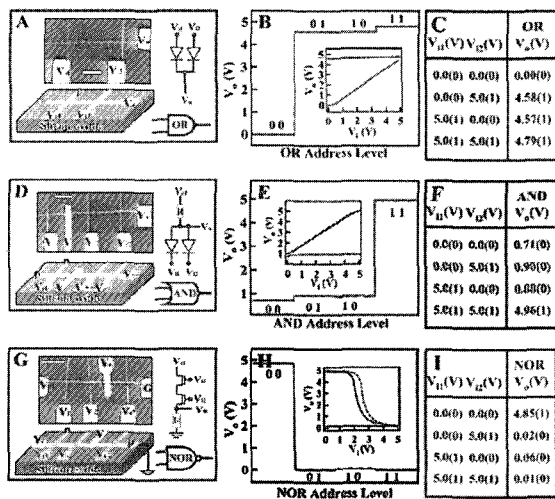


그림 9. 나노선 나노-논리 게이트.

### 참고 문헌

- [1] "2001 Silicon Nanoelectronics Work shop", June 10 ~11, 2001, Kyoto, Japan.
- [2] X. Duan, et al., Nature, Vol. 421, p. 241, 2003.
- [3] M. H. Huang, et al., Science, Vol. 292, p. 1897, 2001.
- [4] J. C. Johnson, et al., Nature Materials, Vol. 1, p.

106, 2002.  
 [5] H. Kind, et al., Adv. Mater., Vol. 14, p. 158, 2002.  
 [6] J. Wang, et al., Science, Vol. 293, p. 1455, 2001.  
 [7] Y. Cui, et al., Science, Vol. 293, p. 1289, 2001.  
 [8] E. C. Walter, et al., Surf. Interface Anal., Vol. 34, p. 409, 2002.  
 [9] M. Law, et al., Angew. Chem. Int. Ed., Vol. 41, p. 2405, 2002.  
 [10] Z. Zhang, et al., Phys. Rev., Vol. 61, p. 4850, 2000.  
 [11] Y. Huang, et al., Science, Vol. 291, p. 630, 2001.  
 [12] Y. Cui, and C. M. Lieber, Science, Vol. 291, p. 851, 2001.  
 [13] S. H. Choi, et al., J. Cac. Sci. Technol. A, Vol. 18, p. 1326, 2000.  
 [14] X. Duan, et al., Nature, Vol. 409, p. 66, 2001.  
 [15] Y. Huang, et al., Science, Vol. 294, p. 1313, 2001.

· 저 · 자 · 약 · 력 · . . . . .

**성명 : 민병돈**

❖ 학 력

- 1985년 2월 고려대 물리학과 이학사
- 1987년 8월 고려대 대학원 물리학과 이학석사
- 1998년 8월 고려대 대학원 물리학과 이학박사

❖ 경 력

- 2000년 2월-2001년 10월  
일진나노텍 책임연구원
- 2002년 2월-현재  
고려대 BK21 정보기술사업단 계약교수

**성명 : 황주원**

❖ 학 력

- 2002년 2월 건국대 전기공학과 공학사
- 2002년 3월-현재  
고려대 대학원 전기공학과 석사  
과정

**성명 : 이종수**

❖ 학 력

- 1994년 2월 전북대 금속공학과 공학사
- 1996년 2월 전북대 대학원 금속공학과 공학석사
- 1999년 2월 전북대 대학원 금속공학과 공학박사

❖ 경 력

- 2001년 8월-현재  
고려대 BK21 정보기술사업단 계약교수

**성명 : 김상식**

❖ 학 력

- 1985년 2월 고려대 물리학과 이학사
- 1987년 2월 고려대 대학원 물리학과 이학석사
- 1996년 2월 Columbia Univ. 응용물리학 박사

❖ 경 력

- 1996년 3월-1999년 2월  
Univ. of Illinois at Urbana-Champaign 전기공학과
- 1999년 3월-현재  
고려대 전기공학과 부교수