

반도체 나노선의 소자 응용 현황

• 심성규, 김경환, 김상식 / 고려대학교 공과대학 전기공학과

서 론

현대 사회는 지식·정보화를 추구하며 변화하고 있다. 지식·정보화 사회는 개인, 기업 및 사회 모든 주체에 대하여 영상, 음성, 데이터 등의 다양한 정보의 교환을 극대화할 수 있는 인프라를 제공하게 될 것이며 이는 인간생활의 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. 그럼에도 불구하고 현재의 반도체 기술은 90nm 이하의 나노기술에 이미 진입하여 물리적인 한계(현재 70nm로 추정)에 근접하고 있다. 이러한 상황에서 소자기술의 고도화를 위해서 기존 소자의 지속적인 축소화 이외의 대안으로 Bottom-Up 나노소자 기술이 90년대 이후 새로운 패러다임으로써 활발히 연구되고 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 양자 구속 효과가 일어나게 된다. 이러한 양자 구속 효과는 충분히 직경이 작은 나노선에서 나타나는데 전자의 상태 밀도 함수 및 밴드갭의 변화를 일으키며, 광학적, 전기

적 특성을 크게 향상시키고 있다. 최근의 연구결과들은 양자 구속 효과가 나타나기 위해서 수 nm의 직경으로 나노선을 합성하여야 하는 등의 문제점을 서서히 극복하여 예견되었던 소자 성능의 향상을 보여주고 있다[1].

둘째, 높은 부피 대비 넓은 표면적을 가지고 있다. 나노선의 구조적인 특성상 작은 부피에 비하여 넓은 표면적을 가지며 이는 표면의 상태에 따라 나노선이 민감하게 전도특성이 민감하게 변화함을 의미한다. 이는 화학 및 바이오 센서에 응용 될 수 있으며 현재 많은 화합물 반도체 나노선을 센서로 이용하려는 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. 형성과정을 조작하기 어렵다는 단점에도 불구하고 나노 크기의 구조체를 만들기 위한 기존의 공정을 단순화할 수 있음은 물론 높은 결정성을 가짐으로써 상용화 시 큰 파급효과를 가지게 될 것이다.

근래의 활발한 연구와 함께 반도체 나노선은 field effect transistor (FET), photo-detector (광 검출소자), bio-chemical sensor뿐만이 아니라, p-type과 n-type 나노선을 이용한 rectifier, LED, diode logic device(논리 회로)등으로 응용의 폭을 넓혀왔다. 특히 최근에는 그

응용가능성을 평가하는 연구를 넘어서 앞에서 설명한 나노선 만의 향상된 특성을 실현하는 고성능 나노소자가 연구되기 시작하면서 고성능 소자발전의 한 축으로써 반도체 나노선이 주목 받고 있다. 본 글에서는 반도체 나노선의 대표적인 응용을 통하여 반도체 나노선을 이용한 고성능 나노소자 연구를 살펴보고자 한다.

본 론

가. 나노레이저(Nano-Laser)

반도체 나노선은 끝부분에서 일어나는 응집성 강한 나노 크기 발광 현상으로 인하여 연구가 진행되어 왔다[2-4]. 2001년 사파이어 기판 위에 성장된 ZnO 나노선에 대한 상온에서의 UV lasing 효과에 대한 연구결과가 발표되었다[3]. ZnO 나노선을 이용한 lasing 현상을 실험하기 위한 기본적인 방법은 그림 1(a)에서 보여

주고 있다. (001) 면을 갖는 hexagonal ZnO 나노선과 (110)면의 사파이어 기판 사이에 좋은 계면 상태를 갖기 때문에 사파이어 기판위에 수직성장된 ZnO 나노선은 나노 발광소자를 만들기엔 좋은 조건을 갖는데, 그림 1(b)는 ZnO 나노선에서 나타나는 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 그림에서와 같이 반치폭이 매우 좁은 피크가 나타나는 것을 알 수가 있다.

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 GaN발광 현상을 관찰하였다는 보고가 처음으로 있었고, 1990년대 초반에 이르러서는 상온에서 GaN 필름의 lasing 현상을 관찰하였다. 또한 수십 ~ 수백 μm 기둥모양으로 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. 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($\sim 700\text{J cm}^{-2}$) 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 볼 때, 반치폭이 매우 작은 나노선을 이용한 나노레이저는 광 컴퓨팅, 의료진단 및 치료에 정보저장등에 많이 이용될 것으로 예상된다.

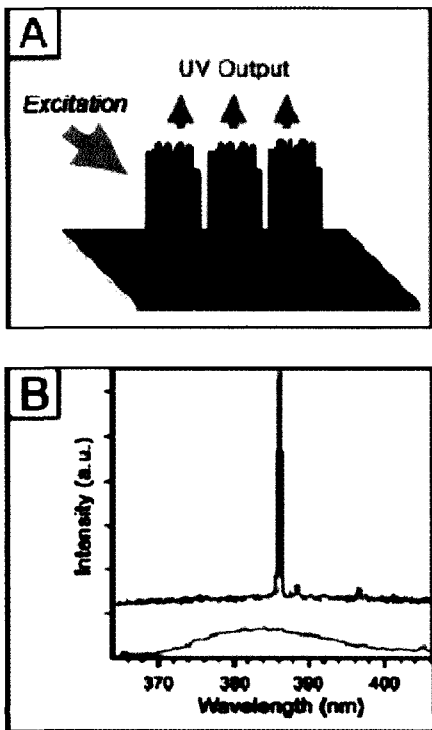


그림 1 (A) 레이저 특성을 보기위한 개략도, (B) ZnO 나노선으로부터 파워별로 측정된 발광 스펙트라.

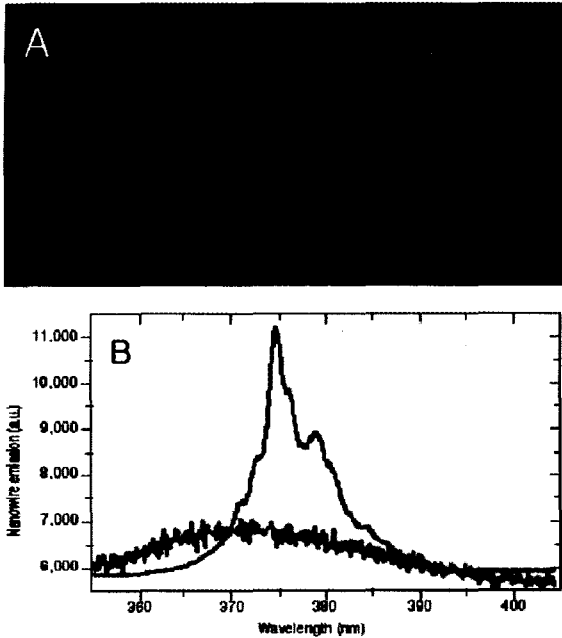


그림 2 (A) 한개의 GaN 나노선 레이저 Far-field 사진, (B) PL 스펙트럼.

나. 포토디텍터 및 광학스위치

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 3은 ZnO 나노선에 UV를 비출 때와 그렇지 않을 때의 I-V 그래프이다. 빛을 비추지 않았을 때에는 ZnO 나노선에는 약간의 암전류만 흐르기 때문에 절연역할을 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 532nm일 때는 광전류가 흐르지 않고 ZnO 밴드갭보다 큰 에너지인 365nm의 파장이 조사될 때는 광전류가 흐르는 것을 알 수가 있다. ZnO 에서의 광전류는

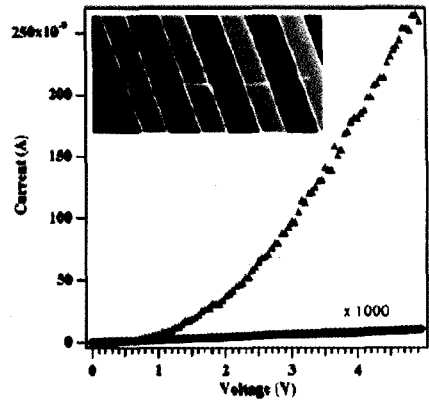


그림 3 한개의 ZnO 나노선에 365nm, 0.3mW/cm² UV 빛에 의한 암전류 및 광전류의 I-V곡선. (삽입)Au 전극위에 걸쳐있는 60nm ZnO 나노선의 SEM 사진.

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 표

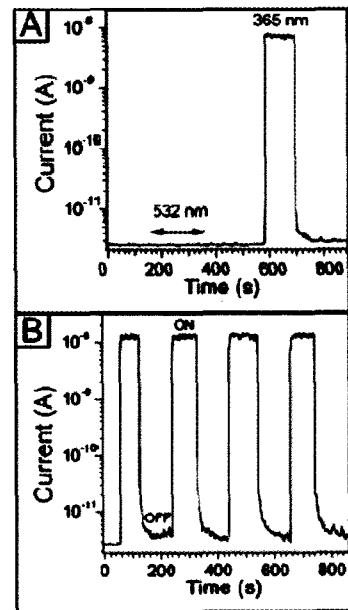


그림 4 (A) 532nm, 365nm의 파장의 빛을 노출시켰을때 ZnO 나노선의 광응답의 감도, (B) 작은 크기의 UV 램프를 ON, OFF 시켰을때의 높고 낮은 ZnO 나노선의 전도성 상태의 스위칭 효과

면에 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.

하버드 대학의 Lieber 그룹은 한개의 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 증가함에 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). 이와 같은 결과들은 광에 의해 단일 나노선의 컨덕턴스의 변화와 광전류를 제어함으로써 나노선을 이용한 나노크기의 포토디텍터 및 광학 스위치

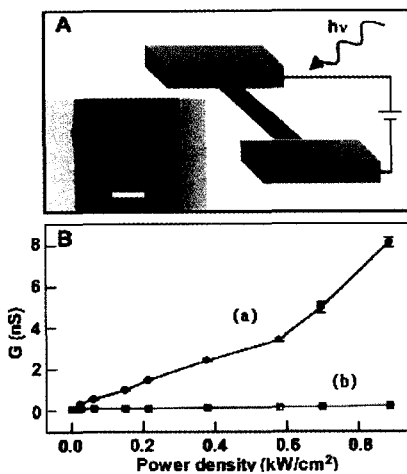


그림 5 한개의 InP 나노선을 이용한 편광 광디텍터 (A) 나노선 광디텍터 개략도(삽입) 전극에 부착되었는 20nm의 지름을 갖는 나노선의 SEM 사진. (B) 여기 power density에 따른 전도도의 변화, 편광된 빛이 나노선에 평행하게 조사되었을때(a)와, 수직하게 조사되었을때(b).

가 가능함을 시사하고 있다.

다. 센서

반도체 나노선의 넓은 표면적을 이용하는 응용분야로써 의학적, 환경적 혹은 안전 검사등의 목적으로 분자를 감지하는 센서가 있다. 일반적으로 나노구조, 즉 나노입자 혹은 나노선은 벌크에 비해서 굉장히 높은 부피당 표면적 비로 인하여 표면에 흡착되는 물질의 존재 유무에 따라 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 P. Yang 그룹은 최근에 한 개의 SnO₂ 단결정 나노선과 나노리본을 이용하여 상온에서 동작하는 광화학 NO₂ 센서를 제작하였다(9).

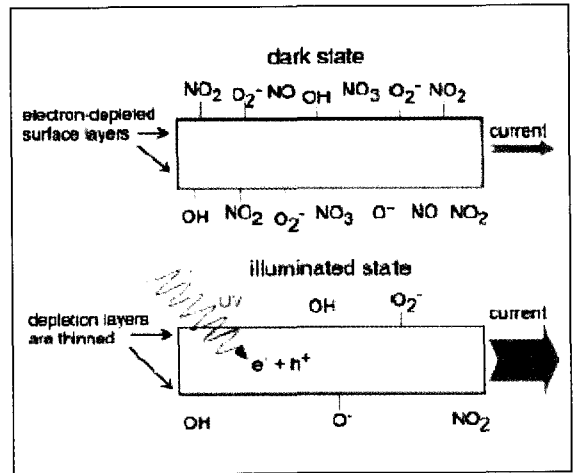


그림 6 SnO₂ 단결정에서의 광탈착을 보여주는 개략도

나노결정 SnO₂의 전기전도도는 결정표면에 흡착된 분자와 그에 따른 공핍층의 변화에 크게 의존한다. 대기층의 오존과 스모그 형성에 중요한 역할을 하는 가스인 NO₂는 SnO₂ 표면에 강하게 화학 흡착을 하여 전자를 붙잡아두는 역할을 하기 때문에 SnO₂의 컨덕턴스를 측정함으로써 NO₂를 감지할 수 있게 된다. 그런

데 센서의 표면에 흡착된 NO₂ 가스를 제거하여 센서의 감도를 유지하기 위해서는 300~500°C 정도의 고온에서 센서를 작동하여야 하는데, 고온에서 작동하는 것은 폭발위험이 있는 환경에서는 바람직하지 않다. 그러나 SnO₂ 단결정의 밴드갭과 비슷한 에너지의 UV를 조사했을 때 나타나는 단결정 SnO₂ 나노리본의 뛰어난 광전 특성을 이용하면 상온에서도 흡착-탈착 현상을 일으킬 수가 있으므로 상온 작동이 가능하다. UV를 쬐어주면 SnO₂ 내에 전자와 홀이 형성되는데, 그러면 광에 의해서 형성된 홀은 표면에서 NO₂ 등의 분자에 의해서 구속된 전자와 재결합하고 그 과정에서 NO₂와 그 외에 다른 가스가 탈착하게 된다. 그 결과로 나노리본의 공핍층이 줄어들어서 전기전도도가 증가하게 되는데, NO₂가스 농도는 빛이 쬐여진 상태에서 컨덕턴스의 변화를 측정함으로써 알 수 있다. 그림 6에 이에 대한 그림이 나타나 있다.

라. 전자소자

반도체 나노선을 나노크기의 전자소자에 응용하고자 하는 시도가 활발히 이루어져 왔다. 그리하여 반도체 나노선을 “Bottom-Up” 방식으로 만든 간단한 다이

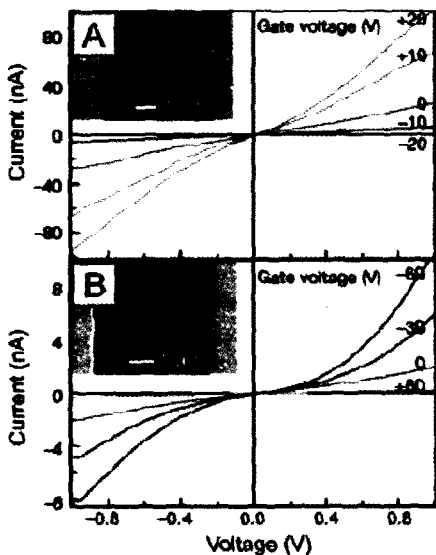


그림 7 InP 나노선의 전기적 transport, (A)Te가 도핑된 나노선의 I-V 곡선, (B)Zn가 도핑된 나노선의 I-V 곡선.

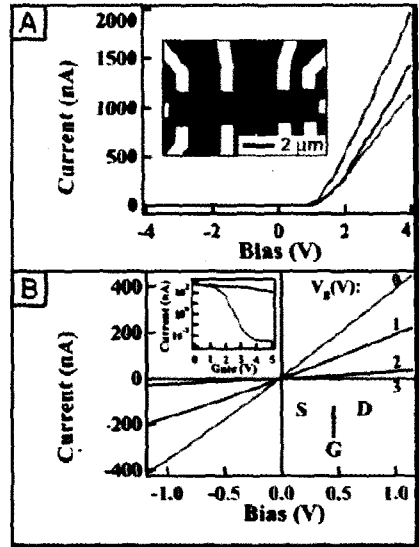


그림 8 A) 4개의 p-type Si 나노선과 1개의 n-type GaN 나노선 사이에 형성된 다중접합 어레이에 대한 I-V 곡선. 4개의 곡선은 4개의 접합 각각에 대한 I-V 특성을 나타낸다. B) 게이트 전압 변화에 따른 나노선 FET의 I-V 특성 곡선.

오드와 트랜지스터의 빌딩블록으로 사용하여 더 복잡한 나노전자소자를 제작하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

C. M. 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 트랜지스터를 제작하였다. 이러한 접합을 이용해서 그림 8과 같은 집적 나노 FET 어레이를 만들었다. 여기에서 나노선은 채널과 게이트 전극으로 사용되었는데, 나노선 p-n 접합과 나노선 FET 를 이용하면 논리 회로와 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 가

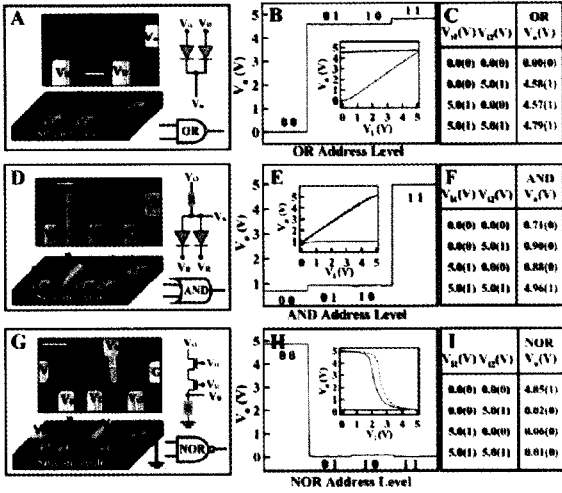


그림 9 나노선 나노논리 게이트.

저울 수 있으며, 필요한 소자의 기능에 맞는 재료를 선택할 수 있는 장점이 있다.

최근 미국의 나노분야의 신생 기업인 Nanosys사는 나노선 및 나노벨트를 기판상에 배열하여 전도 채널로 이용한 Thin Film Transistor를 개발하여 보고하였다 [10]. 이 보고는 최근의 반도체 나노선 전자소자기술 연구 동향의 큰 전환점의 양상을 나타내어 주목되고 있다. 현재까지의 반도체 나노선 전자소자의 응용이 다

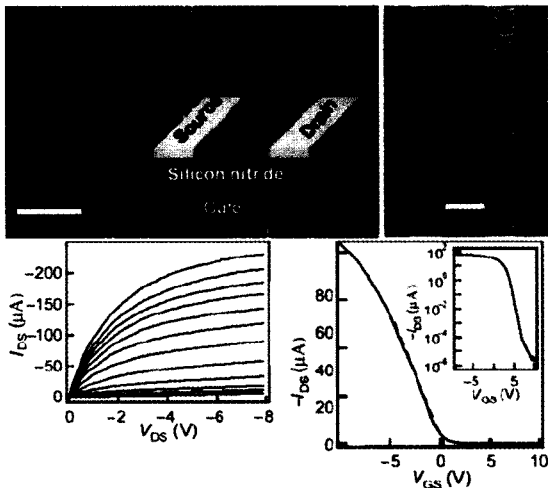


그림 10 나노선을 전도 채널로 이용한 TFT 소자와 특성.

양한 기술적 시도의 단계였다고 한다면 이후의 단계에서는 나노선을 이용한 고성능 소자의 출현이 예상되고 있다.

그림 10은 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 시도로서 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 $\langle 1\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{S}^{-1}$ 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 11은 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 230에서 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.

결론

최근 많은 기술적인 시도들을 통하여 반도체 나노선이 고성능 나노소자 실현의 하나의 방법으로 자리잡아

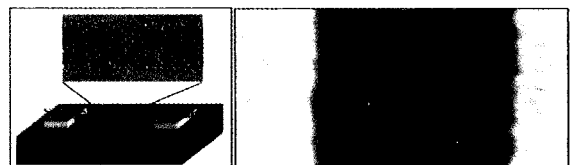


그림 11 실리콘 단일 나노선을 이용한 FET 소자.

가고 있다. 이제는 제법 낮익은 나노과학은 단순한 크기의 축소에 의한 집적화 이외에도 크기의 축소에 의해 새롭게 생겨나는 양자현상이라는 새로운 물리적 특성을 이용하며 활발한 연구가 진행 중에 있으며 반도체 나노선은 앞서 언급하였던 연구 동향을 비롯하여 나노선의 독특한 기계적 특성을 활용하여 나노핀셋, 나노저울 등 나노스케일의 도구가 제작이 되어 활용에 대한 많은 연구 또한 진행 중이며 다양한 분야에서 활발한 시도가 이루어지고 있다.

하지만 반도체 나노선을 소자에 응용하기 위해서는 해결해야 할 과제들이 많이 남아있다. 반도체 나노선이라는 소재의 특성을 당장 소자에 이용될 수 있을 만큼 최적화 하는 기술적인 과제가 해결되어있지 않으며 bottom up 방식을 기반으로 하는 보다 새로운 구조의 설계기술과 이를 뒷받침 할 수 있는 제조 및 성장 제어 기술이 필요하기 때문이다. 하지만 그럼에도 불구하고 반도체 나노선은 소자화 할 경우 저가로 고성능의 소자를 개발할 수 있다는 점에서 큰 이점을 가지고 있어 많은 부분에서 연구가 진행되고 있으며 점차 문제점을 해결하며 소자 제작에 한 걸음씩 나아가고 있다.

불과 십여 년 전에 보고되기 시작한 탄소나노튜브 소재가 현재 미국에서 3년 내에 비휘발성 메모리 시제품 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.

참고문헌

[1] Y. Cui, Z. Zhong, D. Wang, W. U. Wang, C. M. Lieber, "High performance silicon nanowire field effect transistors", Nano Lett., Vol. 3, 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, 02002.
 [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 electro-deposited 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.