미래선도기술
이슈분석보고서

나노 소재를 이용한 전자소자

나노튜브와 나노와이어를 이용한 전자소자로의 적용 현황 및 전망

박정원, 동향정보분석팀

KISTI 한국과학기술정보연구원
Korea Institute of Science and Technology Information
www.kisti.re.kr

미래선도기술 이슈분석보고서는 혁신형 중소기업 정보분석 지원사업의 일환으로 작성된 보고서로서, 유망 기술에 대한 이슈분석을 통해 국내 기업들이 자사에 적합한 사업아이템 발굴 기회를 극대화 하는데 목적이 있다. 이슈 분석 대상은 글로벌 동향 브리핑(GTB) 사업에서 축적한 약 10년간의 글로벌 모니터링 정보를 키워드 빈도분석 후 수요 조사를 통해 정하였다. 또한 국내외 연구개발동향, 산업동향 및 기술/실용화/파급효과 등의 측면에서의 이슈제기 및 분석을 해당분야 전문가와 공동으로 수행함으로서 수요자 중심의 보고서가 되도록 노력하였다.

2006 미래선도기술 이슈분석보고서

• 나노셀룰로오즈 보강 복합재료	• 광촉매 박막제조기술
• 차세대 하드디스크 HAMR	• 산업용 무선 필드버스
• 멀티페로익스(Multiferroics)	• P2P 네트워크
• 탄소나노튜브	• 센서네트워크 기술
• 휴대용 연료전지	• 온라인 게임
• 칩내장형 임베디드 기술	• 임베디드 기술
• 유전자 치료	• 십진 부동소수점 연산기
• 열화학적 복합전환 공정	• 게임산업
• 자기 냉장고	• 나노소재를 이용한 전자소자
• 유기 반도체 태양전지	• 유기반도체(Organic Semiconductors)
• 중전기기용 나노절연재료	• 공기오염센서
• 무선 통신망간의 간섭	• 위성항법시스템 시험장(GATE)
• 이동통신-무선랜 통합망의 보안	• 위성합법시스템 소프트웨어 수신기
• 해외선진국 반도체장비 기술동향	• 광촉매의 성능 및 응용 기술 현황
• 동유럽의 VoIP 사업현황	• 해외 선진국의 DMB/DAB 기술동향
• 지능형 자동차에 사용되는 텔레매틱스 기술동향	• 신약개발을 위한 RNAi 제품 현황
• 주요 선진국의 냉동•공조 기술 현황	• 해외 선진국의 위성항법 시스템 기술 동향
• 영상진단기기 및 초음파영상진단기기 제품 현황	• 최근의 게임시장 동향
• 해외 주요국의 디지털 전자제품 동향	•해외 주요국의 디지털 전자제품 동향

Contents

1 **서론**

기술/산업 개요 — 05
기술/산업의 종류 및 특성 — 06
이슈 분석의 필요성 — 07

2 **본론**

국내외 연구개발 동향 — 09
국내외 시장 동향 및 전망 — 11

3 **이슈분석**

나노튜브와 나노와이어를 이용한 전자소자 개발의 최근 또는 향후 이슈 — 20
실용화, 산업화를 위한 기술(산업)적 과제 — 27
산업적 응용분야 및 경제적 파급 효과 — 29

4 **결론** — 33

참고 문헌 — 34

서론

1

기술/산업 개요

기술/산업의 종류 및 특성

이슈| 분석의 필요성

1 서론

기술/산업의 개요

○ 나노기술에 대한 관심이 2000년대에 들어와 급부상하고 있음. 나노기술은 그 자체가 효율적이고 경제적이며 친환경적이므로 과학과 기술을 새로운 방향으로 발전시키면서 산업계에 막대한 영향을 미칠 수 있음. 현재 인류가 당면한 기술발전과 환경오염이라는 상반된 문제의 근본적인 해결책이 될 수도 있을 것으로 기대하고 있음.

○ 나노기술의 발전은 신소재, 생명공학이나 신약 개발에 크게 영향을 미치며 정보기술(IT)을 주체로 한 새로운 지식산업의 발전을 가속화 시켜 이에 따른 소프트웨어 산업도 한층 더 발전시킬 것으로 예상됨. 이러한 정보산업의 발전은 기타 유통산업이나 금융 산업에도 상당한 파급효과를 가져 올 것으로 예상됨.

○ 특히, 반도체 나노와이어(Semiconductor nanowires (NWs)) 및 나노 결정(nanocrystals)과 탄소 나노튜브(Carbon Nano Tube: CNT)는 작은 물질의 제조 공정(bottom-up paradigm)에 의한 어레이(arrays)와 나노 수준의 전자 소자에 제조에 다양한 가능성을 열어줄 것으로 보이기 때문에 각광받는 신기술 중의 하나임.

○ 나노기술의 개발이 중요한 것은 나노기술이 갖고 있는 무한한 잠재성에 있지만, 실제로는 나노기술이 갖는 특성이나 속성 때문으로, 미국을 비롯한 선진국에서는 이 나노기술에 의한 새로운 산업혁명의 도래를 예측하기도 함.

1 서론

기술/산업의 종류 및 특성

가. 기술/산업의 종류 및 특성

○ 세계적으로 나노기술은 아직 개발 초기 상태이며이며 따라서, 사업화된 예가 많지 않음. 나노소재 기술은 특정 분야에 국한된 기술이 아니며 기존 산업의 거의 전 분야는 물론 IT, BT, ET 분야에 기술혁신을 가져올 것으로 예측됨. 나노소재 관련 기술은 독점성이 강하며 대단히 큰 파급성을 갖고 있음. 나노소재가 갖는 특이한 물성은 신 규시장의 창출을 가능하게 하거나 기존 시장의 완전 대체를 가능하게도 함.

○ 이러한 나노 물질은 여러 기술분야에서 새로운 기능과 향상된 성능의 소자를 구현하였음. 이러한 나노 재료의 성능은 화학 조성(chemical composition)과 대상의 구조 및 크기, 모양(morphology)과 도핑에 의하여 좌우됨. 예를 들면, 카본 나노튜브는 기계적으로 쉽게 변형되지 않으며 화학적 안정성과 음의 전자 친화도(negative electron affinity; NEA)등의 많은 장점을 가지고 있으며, 이와 같은 장점으로 인해 전자소자로서 응용 가능성이 높아지고 있음.

1 서론

이슈 분석의 필요성

가. 이슈 분석의 필요성

○ 100nm 보다 작은 크기를 갖는 미소 구조물을 만들 수 있는 실용적인 방법의 개발은 현재 미소 구조물 응용 분야가 직면하고 있는 가장 큰 과제임. 기존의 탑-다운 (TopDown) 기술인 광 리소그래피 기술이나 바텀-업 (BottomUp) 기술인 자기조립 기술은 각자 독자적인 방법으로 50nm 이하의 피처 크기(Feature size)를 원하는 기능을 갖도록 패터닝하거나 제작하는 일은 매우 어려운 일로 간주되었음.

○ 전자 소자와 광학 소자는 가정에서부터 통신 시스템, 컴퓨터, 의료용 장비에 까지 많은 영향을 미치는 영역임. 현재 더욱 정밀하고 강력한 시스템 사양에 맞추기 위하여 나노 수준의 새로운 기능을 가지면서 효율이 높은 소자를 제조하는 것은 매우 중요함. 탄소 나노튜브와 반도체 나노와이어는 제어된 성장과 정렬을 통하여 새로운 나노 소자와 나노 광학 소자로의 응용에 새로운 장을 열어주고 있음. 따라서 여기서는 이러한 나노 수준의 전자 소자에 응용되는 전자 소자 및 광학 소자와 향후 응용을 위한 집적등에 대하여 다루고자 함.

○ 특히 탄소 나노튜브와 같은 나노 와이어들은 소재의 훌륭함에도 불구하고 만들어진 소재 자체를 TopDown 방식으로 패터닝하거나 조립하는 일은 거의 불가능하였음. 그러나 모든 연구자가 직경이 1nm인 탄소 나노튜브를 규소 웨이퍼(Wafer) 상의 미세 선에 대체할 수 있으면 기존의 리소그래피 기술로서는 도달할 수 없다고 판단되는 테라비트(Tera Bit) 급의 메모리를 구현할 수 있을 것으로 기대하고 있음. 특히 탄소 나노튜브가 가지고 있는 물리적, 전기적, 기계적 성질은 기존 리소그래 피 기술로 가공하여 만들 수 있는 어떤 소재에 비해서도 뛰어난 성능을 가지고 있으므로 이를 이용한 나노 디바이스를 제작 하는 것은 꿈의 기술로 여겨짐.

본론

2

- 국내외 기술 동향
- 국내외 시장 동향 및 전망

2 본론

국내외 기술 동향

가. 국내기술동향

○ 국내에서는 근래에 들어 일부대학에서 나노 와이어와 탄소 나노튜브의 이론연구와 합성에 대한 연구를 추진해 오고 있으며, 최근에는 나노 와이어와 탄소 나노튜브의 중요성에 대한 인식이 확산됨에 따라 여러 국립연구소와 민간기업연구소 등에서도 합성과 응용에 대한 연구를 추진하고 있음. 일부 연구팀에서는 탄소 나노튜브 합성과 전자 방출특성에서 큰 성과를 거두고 있지만, 아직도 나노 와이어와 탄소 나노튜브 응용 연구수준은 전반적으로 선진국에 비해 다소 떨어지는 편임.

○ 국내 대학의 탄소 나노튜브관련 연구 경향을 살펴보면, 최근 전북대에서는 마이크로파 플라 즈마 CVD법에 의한 탄소 나노튜브 합성과 FED 응용에 관한 연구를 추진 중이며, 성균관대에서는 Hot filament RF 플라즈마 CVD법에 의한 탄소나노튜브 합성과 FED 응용에 관한 연구를 진행중이며, 연세대에서는 열 CVD에 의한 탄소나노튜브 합성과 에미터 응용에 관한 연구를 추진중임. 또한 그 외의 연구팀들도 활발히 합성에 관한 연구를 진행하고 있음. 표1에 국내의 탄소나노튜브 합성 및 에미터 응용에 관한 연구 현황을 나타냈었음.

○ 삼성종합기술원에서는 탄소나노튜브를 이용한 FED 제작연구를 착수하여 스크린 프린팅(screen printing) 방법으로 9인치 FED의 동영상구현에 성공하였는데, 저전압에서 기존의 FED보다 높은 휘도(1,800 cd/cm2 at 3.7 V/㎛)를 보여주였음. 그러나 FED 제작에 실제로 사용된 탄소 나노튜브는 주로 외국에서 합성한 것을 구입하여 사용한 것이여서 핵심기술에 있어서는 여전히 해외 의존적임.

○ 한편 국내의 에미터 응용기술 개발은 지금까지 주로 FED 응용에 관심이 집중되어 있었음. 현재 국내 연구팀의 CVD를 이용한 탄소나노튜브의 합성기술은 부분적으로는 선진국과 거의 동등한 수준에 도달했지만, 대량생산 기술과 single-walled 탄소나노튜브 합성법 등에서는 전반적으로 아직도 뒤쳐진 상태임. 최근에 보고된 9인치 크기의 스크린 프린팅법에 의한 초기수준의 FED 개발은 외국에 비해 손색이 없는 수준이지만 전반적인 에미터 응용을 비롯한 각종 응용연구 수준은 아직도 선진국에 비해 크게 뒤진 상태임. 국내외적으로도 기판에 수직배향된 탄소나노튜브를 이용한 FED 개발은 보고된 바 없으며, FED 이외의 다른 전자 방출 시스템(백색광원, LCD back light, CRT 전자방출원, VFD 등)에 대한 연구는 아직 거의 시작단계에 머무르고 있는 실정임.

표1. 국내의 탄소나노튜브의 합성과 에미터 응용에 관한 연구

년도	소 속	연 구 자	연 구 성 과	구 분
1998	서울대	임지순	CNT의 emission 특성에 대한 이론적 연구	에미터
1998	군산대, 전북대	이철진,이영희	전기방전법으로 MWNT 합성	합 성
1999	군산대	이철진	열 CVD법으로 MVNT 수직배향 합성	합 성
1999	군산대	이철진	RF 플라즈마 CVD법으로 MWNT 수직배향 합성	합 성
1999	군산대	이철진	열 CVD법으로 대면적 기판위에서 고순도 MWNT 수직배향 합성 및 전계전자방출 성공	합성, 에미터
1999	군산대	이철진	열 CVD법으로 유리기판 위에서 MWNT 저온합성 성공 (550도)	합성
1999	전북대	이영희	마이크로파 플라즈마 CVD 법으로 MWNT 합성 및 전계전자방출 성공	합성, 에미터
1999	삼성종기원	김종민,최원봉	Screen printing 법으로 9인치 기판에서 FED 제작	에미터
1999	성균관대	유지범	Hot flament RF 플라즈마 CVD법으로 MWNT 합성 및 전계방출 성공	합성, 에미터
1999	서울대	서정상	알루미나기판의 구멍에 MWNT 수직합성	합성
1999	연세대	백홍구	열 CVD법으로 MWNT 수직배향합성 및 전계전자방출 성공	합성, 에미터
1999	경희대	장진	RF 플라즈마 CVD법으로 MWNT 수직배향 합성	합성
1999	광주과기원	이성훈	레이저증착법으로 SWNT합성	합성
2000	군산대	이철진	CRT의 전자방출원으로 수직 배향된 MWNT의 적용평가	에미터
2000	ETRI, 군산대	이철진,이진호	수직배향된 MWNT를 이용한 TFT controlled FED 성공	에미터
2000	군산대	이철진	기상합성법으로 MWNT 대량합성 성공	합성

2 본론

국내외 산업동향

나. 해외기술동향

○ 나노 소재와 관련한 기술은, 현재까지는 선진국에서 우위를 점하고 있음. 소재가 가지는 기초 과학력에 대한 요구도 있지만 사용 부분에 대한 인지도가 선진국에서 높게 나타나기 때문에 아직은 이렇다할 상품화가 이루어지지 않았음에도 불구하고 이에 대한 연구가 많이 진행되고 있는 실정임.

○ 탄소 나노 튜브는 21세기 선도기술로 주목 받고 있는 나노미터 크기의 극미세 영역을 기반으로 하는 나노 테크놀러지를 대표하는 전략 핵심 소재 중의 하나로서, 최근에 이를 소재로서 이용뿐만이 아니라 적용 제품을 통해서도 실용화와 연결시키려는 노력이 활발히 진행 되고 있음. 탄소 나노 튜브를 전자 방출원으로써 적용한 광소자, 즉 전계 방출 디스플레이(Field Emission Display: FED)와 형광 표시관(Vacuum Fluorescent Display: VFD)과 같은 전계 방출 평판 표시 소자(Field Emission Devices) 분야와 광원(Light source)이 주목을 받고 있음.

○ 현재 전지 및 복합체분야 등에 이용할 목적으로 CVD 방식을 이용하여 합성되는 비교적 저급소재의 경우, 대량생산 기술을 보유하고 있는 곳이 이미 세계적으로 약 4개 회사가 있으며, 기술수준도 이미 기존에 사용되고 있는 탄소소재를 대체할 수 있을 정도의 경쟁력을 가지고 있음. 전계방출 분야에 이용할 수 있는 고급소재의 경우에는 현재까지 합성기술이 현저히 앞서있는 기업은 없음. 미국의 Carbolex 및 CNI사, 일본의 Showa-Denko사, 한국의 일진나노텍등이 전계방출용 CNT 분야에 연구개발을 집중하고 있음. 표 2는 국외 소재 관련 개발 현황을 보여 주고 있음.

○ 상업적 제품의 생산이 원활하지 않음에도 불구하고 탄소계 나노소재를 생산, 판매하는 회사는 전 세계적으로 약 60여개 정도가 있으며, 기술력의 한계로 인하여 대부분 한 가지 품목의 소재를 집중 생산하고 있음.

○ 외국의 경우 많은 그룹이 카본 나노 튜브를 이용한 전계방출 소자에 대한 활발한 연구를 진행하고 있으며, 일본의 경우 노리타케 철강사 (Noritake Itron Corp.;Ise Electronic)의 CNT를 이용한 냉음극 벌브형 램프 및 열화학기상증착법(thermal CVD)로 CNT를 성장시켜 3.7인치 패널(화소 1mm x1mm)을 제작하여 RGB 그래픽 이미지를 선보였음(그림 2).

○ 현재 오사카 대학에서는 전기 영동법(electrophoresis)을 이용한 FED 및 LCD-backlight를 개발 중이며, 미쯔비시 전자는 스크린 프린팅 방법을 이용한CNT lighting tube (Large-scale Tield Display ; 64 pixels, 256 dots, 휘도 3000cd/㎡) 개발 결과를 발표하였음 (그림 3).

○ 또한 미에대학과에서는 탄소 나노튜브를 전자총으로 이용한 CRT 전자방출원 연구 개발하고 있으며, 이는 기존의 고온 가열방식의 전자총보다 2배 이상 높은 휘도와 7,000시간 이상 안정된 전류방출 특성을 나타내는 것으로 알려졌음. 일본의 한 업계에서는 문자구동이 가능한 4인치급 탄소나노튜브 3전극 FED를 개발하였으나 아직은 해상도 및 안정성 등의 문제가 있는 것으로 알려져 아직 상업화에는 성공하지 못하고 있음. 전체적으로 일본의 기업연구소 및 국립연구소에서 탄소나노튜브를 이용한 FED 또는 CRT emitter에 관한 연구논문을 최근에 많이 발표하고 있는 실정임.

표 2. 국외 탄소 나노튜브 소재 관련 개발 현황

회 사 명	생 산 품 목	생 산 량 (/년)	응 용 처
Hyperion Catalysis Interantional (USA)	MWNT (CVD)	2000 - 1.5 t 2001 - 5.0 t	대전방지, 도료, 전도성 플라스틱
Carbon Nanotechnologies Incorporated (USA)	SWNT (HiPCO, Laser)	2000 - 12 Kg 2001 - 100.0 t	Nanocomposites
Carbolex (USA)	SWNT (ARC)	2000 - 1.8 Kg 2001 - 12 Kg	FED
BUCKY USA (USA)	Fullerene MWNT,SWNT	2000 - 5.0 t 2001 - 10.0 t	Non-linear optics Pharmaceuticals
Mitsui (Japan)	MWNT	2002 - 120 t	연료전지, 도료용
Mitsubishi (Japan)	Fullerene	2007 - 1500 t 예정	의료용
Nikkiso (Japan)	MWNT (CVD)		
Showa-Denko (Japan)	VGCF (CVD) MWNT (CVD)	VGCF - 수백 t MWNT - 수백 t	이차전지, 복합체
Honjo chemical (Japan)	Fullerene, CNT (ARC)	대량합성	
청화대학 (China)	MWNT	30 t 120 t 규모가능	

○ 미국의 경우는 에스아이 다이아몬드 (SI Diamond)에서 출자한 어플라이드 나노텍 (Applied Nanotec)에서 CNT를 이용한 광원, 옥외광고판 및 Field emission display (Hybrid FED: HyFE)개발 중이며 (그림 4), 모토로라 (Motorola) 와 듀폰사(Dupont) 등에서도 연구를 진행 중임. 유럽의 경우는 스위스 EPFL에서 CNT를 이용한 형광 램프 (luminescent lamp)를 개발하였으며, EC(European Commission)를 중심으로 CNT 전계방출 표시소자의 개발을 위한 컨소시엄 형태로 연구 (CANADIS, TAKOFF등)를 진행하고 있음. 러시아의 이론 및 실험 물리 연구소 (Institute of Theoretical and Experimental Physics, Moscow State University) 에서는nano-carbon (nC) thin film를 이용한 직관형 이극관 램프를 제작한 바 있음. 그외 중국의 중한 대학 (Zhongshan University) , 싱가포르 나양 기술 대학 (Nanyang Technological Uniersity) 와 대만의 산업 기술 연구소 (Industrial Technology Research Institute) 등에서 간단한 문자 표시용 평면형 광원을 발표한 바 있음.

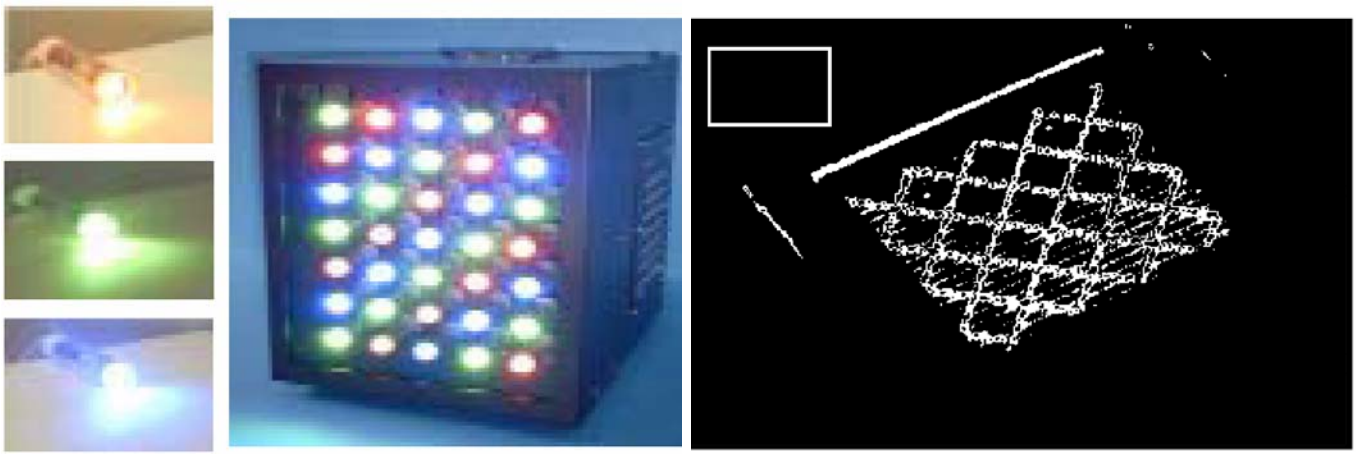

그림 1. 냉음극 벌브형 램프와 3.7인치 패널 RGB 그래픽 이미지(Noritake Itron)

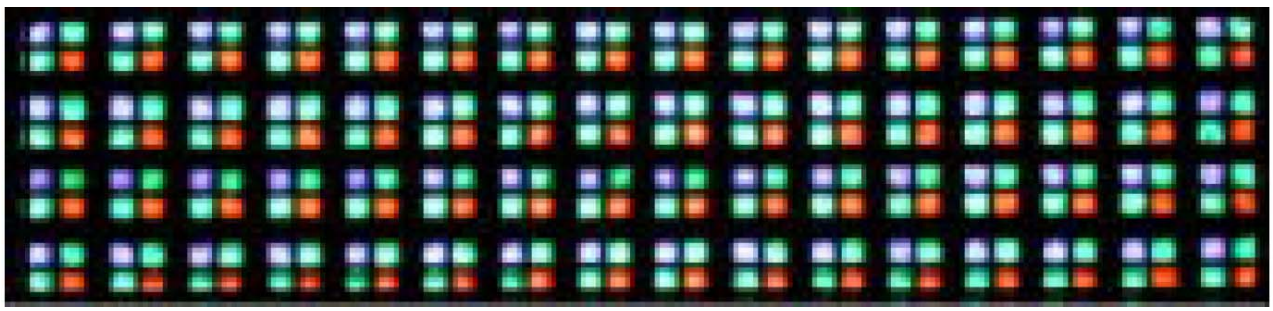

그림 2. 탄소 나노 튜브 광원 튜브 (Mitsubishi Electric)

○ 미국의 경우에는 대학을 중심으로 나노 소재 관련 연구가 활발한 편이다. 일례로 노스 캐롤라이나 (North Carolina) 대학에서는 탄소나노튜브의 방출(emission)에 관한 연구결과를 많이 발표하고 있으며, 미국에서는 수많은 대학연구실과 국립연구기관에서 탄소나노튜브의 방출 및 FED 소자 응용에 관한 연구결과를 발표하고 있음. 표3에 탄소나노튜브 합성과 에미터 응용에 관한 외국의 중요한 연구결과를 나타냈었음.

표 3. 외국의 탄소나노튜브의 합성과 에미터 응용에 관한 연구

연 도	국 가	소 속	연 구 자	연 구 성 과	구분
1991	일본	NEC	Ijima	전기방전법으로 MWNT 합성	합성
1993	미국	caltech	Bethune	전기방전법으로 single-walled CNT 합성	합성
1995	미국	라이스 대학	Samlley	탄소나노튜브 FED의 전자방출능력 증명	에미터
1995	스위스	이콜폴리텍	De Heer	탄소나노튜브 FED 를 최초로 설계	에미터
1996	미국	라이스 대학	Samlley	레이저증착법으로 single-walled CNT 대량합성	합성
1997	영국	Sussex 대학	Kroto	열분해법으로 CNT 수평배향 합성	합성
1998	미국	Northwestern 대학	Chang	screen printing에 의한 FED matrix 설계	에미터
1998	일본	Me 대학	Satio	MWNT를 이용한 FED 제작성공	에미터
1998	미국	SUNY (Buffalo)	Ren	RF 플라즈마 CVD법으로 MWNT 수직배향 합성	합성 Smally
1998	인도	인도과학원	CNR Rao	열분해법으로 SWNT 합성	합성
1999	미국	Boston college	Ren	나노크기 패턴위에서 MWNT 수직합성	합성
1999	캐나다	Toronto 대학	Li	알루미나 기판의 미세구멍에서 MWNT 합성	합성
1999	미국	라이스 대학	Samlley	기상합성법으로 SWNT 대량합성	합성
1999	인도	인도과학원	Li	기상합성법으로 SWNT, NWNT 대량합성	합성
1999	미국	켄터키 대학	Rao	기상합성법으로 NWNT 대량합성	합성
2000	일본	Meyo 대학	Ando	Arc plasma jet 법으로 SWNT 대량합성	합성
2000	미국	Berkely 대학	Jettl	Liquid nitrogen Arc discharge 법으로 MWNT 대량합성	합성
2000	미국	Oak Ridge 연구소	Merkubv	점 및 선형 패턴 위에서 MWNT 수직배향합성	합성

○ 반도체 메이커인 인피니언(Infineon)이나 삼성전자, NEC 등에서는 탄소 나노튜브를 이용한 메모리 연구를 계속하고 있으며, 이미 난테로(Nantero Inc., 미국)에서는 탄소 나노 튜브를 사용한 비휘발성 메모리(Non-volatile memory)의 초기 원형(Prototype)을 완성하여 발표하기도 했음.

○ 또한 디스플레이 분야에서 삼성전자, 일본의 아세 전자 (Ise Electronics), LG 전자 등은 나노소재를 이 용한 FED 등에 대한 연구를 하고 있음.

○ 탄소 나노튜브의 합성과 에미터 응용에 관한 연구는 미국, 영국, 독일, 일본 등 선진각국에서 국내 연구팀보다 수년 앞서서 다양한 합성법 및 각종 응용연구를 활발히 수행하고 있음.

○ 우리나라에서도 '나노기술 종합 발전 계획'의 수립하고 이를 추진하고 있으며, 특히, 21세기초까지 나노기술 선진 5대국 입지확보를 위한 10개년 종합발전 계획으로 국가과학기술위원회에서 확정하고, 국가 정책에서도 부처간 역할분담과 협조·연계를 위해 ' 국가과학기술위원회'에서 각 부처의 정책과 계획을 검토·조정토록 하고 있음.

2 본론

국내외 시장 전망 및 동향

가. 국내 시장 전망 및 동향

○ 전계 방출에 기반한 탄소 나노 튜브 신광원 개발은 국내 CNT 응용 기술 확산과 기존 조명기기를 대체할 수 있음. 또한 절전형 기기 개발로 인해 열악한 에너지 환경 속에서 범국가적 차원의 원천적인 에너지 절약 및 새롭게 강화되고 있는 국제적인 환경 규제 움직임에 능동적인 대응을 가능하게 하는 등 대규모의 파급효과를 가져올 수 있음.

○ 전계 방출에 기반한 탄소 나노 튜브 신광원 개발은 국내 CNT 응용 기술 확산과 기존 조명기기를 대체할 수 있음. 또한 절전형 기기 개발로 인해 열악한 에너지 환경 속에서 범국가적 차원의 원천적인 에너지 절약 및 새롭게 강화되고 있는 국제적인 환경 규제 움직임에 능동적인 대응을 가능하게 하는 등 대규모의 파급효과를 가져올 수 있음.

○ 나노기술에 있어서는 국내 업계에서도 많은 심혈을 기울여 개발에 박차를 가하고 있으며, 예를 들어, 삼성 SDI는 스크린 프린팅 (screen printing)법으로 탄소나노튜브를 전자총으로 사용하는 7인치 FED를 개발해 2001년에 일본 오사카에서 열린 심포지엄에서 선보인바 있고, 현재에는 32″ FED를 개발한 바 있음. (그림 5)

그림 3. 32인치 3극형 탄소 나노 튜브 전계 방출 디스플레이 패널의 동작 모양 (삼성)

○ KIST와 일진나노텍은 2002년부터 공동으로 탄소 나노 튜브를 이용한 평면형 광원을 연구하여 오고 있음(그림 6). 이때 사용되는 탄소 나노 튜브 음극은 화학 기상 증착법(Chemical Vapor Deposition)에 의한 성장이나 합성 후에 스크린 프린팅을 이용하여 제작되며, 양극으로는 음극선관용 형광체가 도포된 유리 기판을 적용하였음. 휘도는 15,000cd/m2 이상을 얻을 수 있다. 또한 (주)새한에서의 2년간의 연구, 신규법인 나노퍼시픽으로 창업후 1년간의 개발 등 총 3년간의 연구 개발의 결과로 스크린 프린팅법으로 최근 4.5″ 및 5.7″ CNT-평면 광원의 Prototype을 시제작하는 데 성공하였고, 최대 발현 휘도 20,000cd/㎡를 보였음(그림 7).

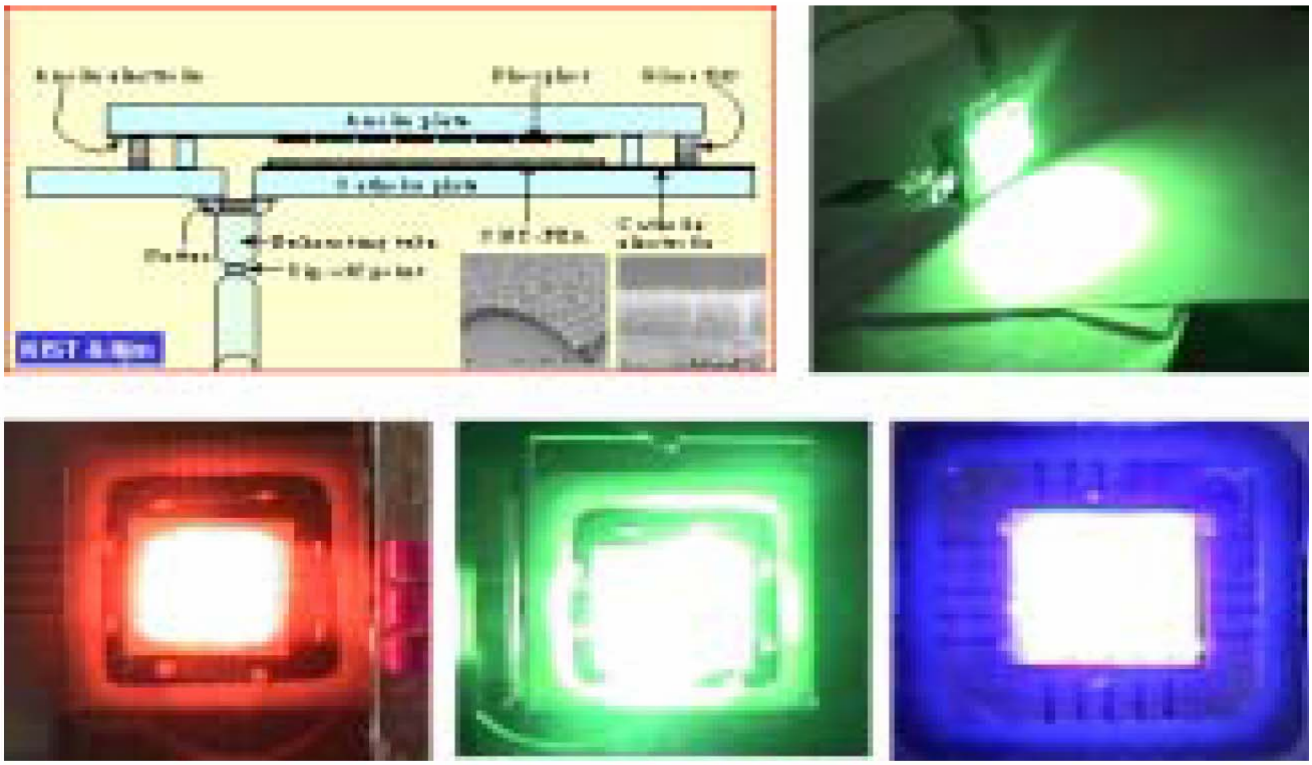

그림 4. 평면형 광원의 구조 및 동작 모양 (KIST & 일진나노텍)

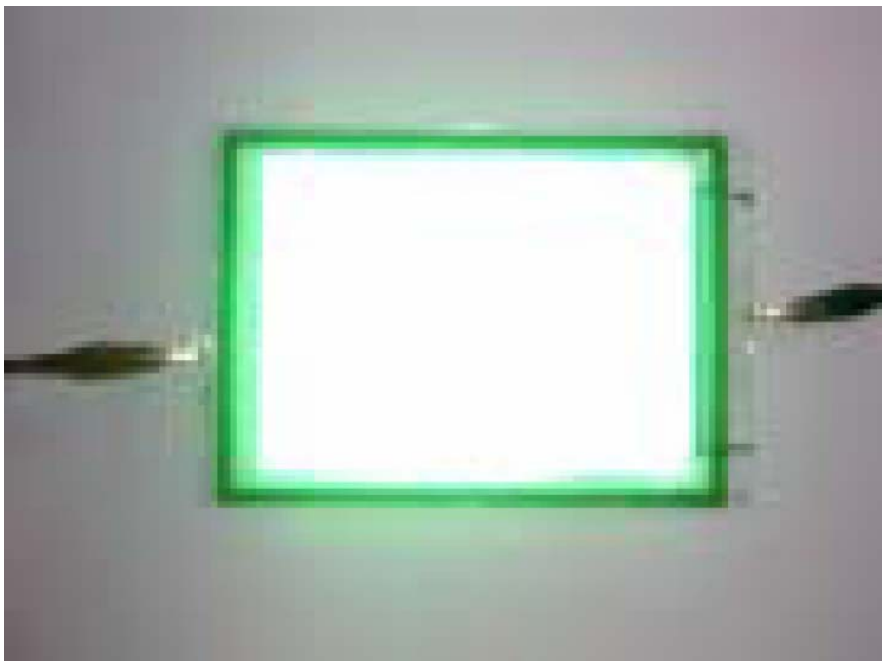

그림 5. 5.7″ CNT - 평면 광원의 Prototype 발광 사진(나노퍼시픽)

나. 해외시장동향 및 전망

○ 미국을 위시하여 일본, 독일, 프랑스, 영국 등에서 21세기 첨단전자 정보산업분야의 경쟁력확보와 고기능성 복합소재의 경쟁력 확보차원에서 국가적인 지원아래 탄소나노튜브의 합성 및 응용에 대한 연구가 추진되고 있으며, 특히, 에미터 및 디스플레이 응용, 2차 전지 및 연료전지, 나노 부품 및 시스템, 고기능 복합체 등에 관한 응용 연구는 앞으로 더욱 활발하게 진행될 예정임.

○ 현재 FED는 본격적인 시장이 형성되지 않은 도입단계로 2002년에는1,800만 달러의 미미한 시장규모였으나 2006년까지 연평균 76.6% 성장하여 6,500만 달러의 시장을 형성할 것으로 예상됨.

○ 해외시장 개척을 위한 국내 기업의 활동으로 LG전자는 20 인치FED 제품개발에 성공하여 20 인치대 제품 생산을 위한 시험라인 가동을2004년 착수할 예정임. 삼성전자는 생산원가 절감이 가능한 탄소나노튜브(CNT) 기술을 적용한FED개발에 성공30 인치급 디지털TV를 2004년까지 상업화하기 위하여 고휘도/ 저가격/ 대형 평판소자의 개발을 진행 중임.

○ 소니사 (Sony)는 미국의 칸데슨트 (Candescent)사와 제휴하여 13.2 인치FED를 이미 개발하였으며 15~40인치 FED를 2003년에 상업화할 목표로 공동 개발 중이며, 도시바와 캐논은 합작법인을 설립하여32인치 FED Photo Type을 공동 개발하는 등 수년 전부터 FED 개발을 진행해 왔으며 상용화 제품을 내놓을 계획을 갖고 있음.

이슈 분석

3

- 나노튜브와 나노와이어를 이용한 전자소자 개발의 최근 또는 향후 이슈
- 실용화, 산업화를 위한 기술(산업)적 과제
- 산업적 응용분야 및 경제적 파급 효과

3 이슈 분석

| 나노튜브와 나노와이어를 이용한 전자소자 개발의 최근 또는 향후 이슈

○ 지난 수십년간 실리콘 마이크로 소자의 발달은 매우 고무적이었음. 이러한 기술로 인하여 컴퓨터, 통신 장비와 자동화 기술은 우리의 삶을 정보 시대(information age)로 변화시켰음. 이러한 기술은 지속적으로 미세화되고 있지만 실리콘을 이용한 소자는 향후 이러한 선폭의 한계가 곧 도래할 것으로 보고 있음.

○ 현재 반도체 기술에 있어서 향후 10년간 새로운 기술과 소자의 선폭에 대한 로드맵이 잘 설정되어 있음. 국제 반도체 기술 로드맵(International Technology Roadmap for Semiconductors) 에서는 탄소 나노튜브와 나노 와이어와 같은 1차원적인 구조를 가지는 소자에 대한 실제적인 목표치를 제시하였음. 하지만 이러한 소자는 아직도 산업체의 측면에서 보면 연구 단계이기 때문에 기존의 금속-산화물-반도체 (complementary metal-oxide-semiconductor ;CMOS)에 버금가는 성능을 보여주느냐가 가장 큰 이슈임. 반도체 산업의 역사를 보면, 대면적으로 집적이 가능하였을 때만이 실제 효용가치가 있는 것이 사실임.

○ 일례로 전 세계적으로 반도체에 관심이 있는 나라들이 지난 2005년 9월 유럽연합내에서 반도체 나노 와이어 기술이 실험실 수준에서 산업에 응용 가능한 수준으로 발전할 수 있을지에 대한 심도 있는 토의가 있었음. 그들이 지적한 기술 응용과 이전에 대한 여러 문제점과 이슈에 대하여 여기서 다루고자 함.

가. 나노튜브를 이용한 전자 소자 개발과 이슈
탄소 나노튜브 트랜지스터(Carbon nanotube field-effect transistors)

○ 최초의 탄소 나노튜브 트랜진스터는 1988년에 제조되었음. 초기의 탄소 나노튜브 트랜지스터는 100-200 나노미터 정도의 실리콘 산화물 위에 두개의 금속 전극을 연결한 후면 게이트(back gate) 구조로 만들었음. 이러한 소자는 아주 낮은 성능과 높은 접촉 저항을 가졌음. 여기서 약간 더 발전 된 형태로 탄소 나노튜브 위에 전극을 증착하고 열처리하여 스위치 전류의 비를 106의 형태로 만들었음. 아래 그림은 후면 게이트 구조와 그에 따른 전기적 특성을 보여주고 있음.

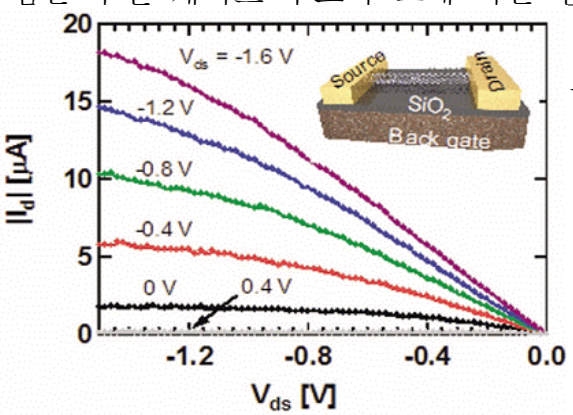

그림6. 600 nm 길이와 1.8 nm 직경을 가지는 탄소 나노튜브 전계 효과 트랜지스터의 후면 게이트 구조 및 전기적 특성

○ 대부분의 후면 게이트 구조를 가지는 탄소 나노튜브 전계효과 트랜지스터는 제조하기에 매우 간단하기에 많은 연구가 진행되었음. 하지만 이러한 구조는 특히 개별적으로 하나하나씩 게이트 전압을 가하기 힘들기 때문에 대면적으로 집적하기에는 한계가 있음. 이런 문제를 극복하기 위하여 IBM에서는 상단 게이트(top-gate) 구조와 얇은 유전체 박막을 이용하여 실리콘 소자와 필적할 만한 연구 결과를 보였음. 또한 더욱 나노 튜브의 효율을 높이기 위하여 이중 게이트(double-gate) 구 조로 만들 어서 스위칭 효율 및 제어를 용이하게 하였음. 하지만 이러한 노력에도 불구하고 아직도 대면적화에 따른 개별적인 소자의 동작에는 걸음마 단계임.

도핑을 통한 탄소 나노튜브의 극성 변화 (Doping of nanotubes)

○ 탄소 나노 튜브가 CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor) 반도체 소자에 적용되기 위해서는 p-타입과 n-타입이 모두 필요함. 하지만 탄소 나노튜브는 기존의 반도체 공정에 응용된 이온 주입 법(ion implantation) 으로는 도핑이 되지 않음. 또한 아주 작은 직경을 가진 탄소 나노튜브는 붕소(B)나 질소(N)와 같은 도펀트(dopant)의 높은 응력에 의하여 결정 격자에 결함을 유발함. 이러한 이유로 전하를 전도하는 도핑법(charge-transfer doping)을 사용함. 전하를 전도하는 도핑법은 주로 양극성 소자(ambipolar devices)를 p-타입 소자로 바꾸거나, p-타입 소 자를 n-타입 소자로 바꾸는 데 사용됨. 예를 들면 칼륨(K) 원자들이나 아민이 함유된 분자들 (amine- containing molecules)이 대표적인 예임. 아래 그림은 이들을 이용한 p-타입과 n-타입의 전기적 거동을 보여줌. 또한 화 학적 도핑 외에 다중 게이트(multiple gates)를 이용하여 정전기 도핑(electrostatic doping)을 통하여 쇼트키 장벽(SB)를 조절하여 p-i-n 구조나 n-i-n 구조를 만들었음.

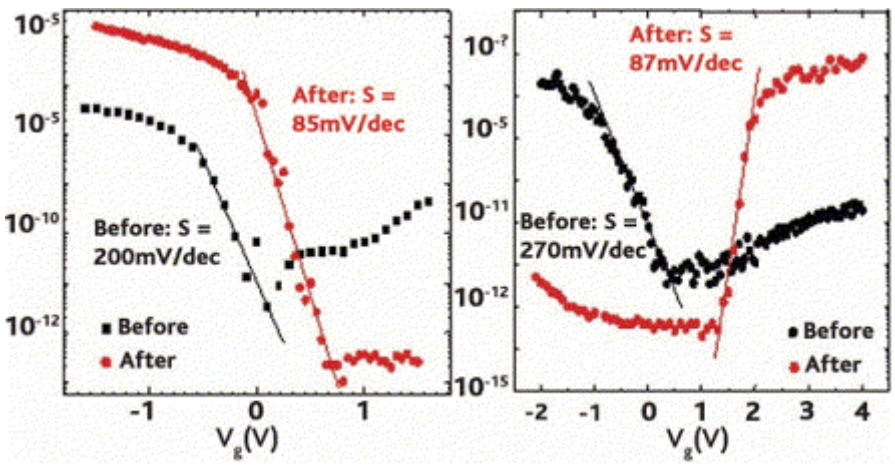

그림7. (a) Triethyloxonium hexachloroantimonate (C2H5)3O+SbCl6- (OA)을 이용하여 도핑 한 탄소 나노튜브 트랜지 스터의 전기적특성, (b) Hydrazine 을 이용하여 도핑한 탄소 나노튜브 트랜지스터의 전기적 특성

탄소 나노튜브 집적(Integrated nanotube electronic circuits)

○ 다음의 이슈로는 개개의 탄소 나노튜브의 또 다른 최적화 조건으로 사용되기 위하여 논리 회로(logic circuits)로의 집접이 매우 중요함. 최초의 탄소 나노튜브 논리 소자는 NOT 게이트 구조로 IBM의 연구진들에 의해 구현되었음. 그들은 탄소 나노튜브를 패턴한 후에 p-타 입과 칼륨에 의하여 도핑된 n-타입을 이용하여 인버터(inverter) 소자를 만들었음. 이러한 초기 연구를 바탕으로 각각의 전계효과 트랜지터(FET)를 이용한 논리 소자를 구현하였음.

○ 최근에는 더욱 복잡하고 발전된 소자를 위해서 5단계 링-오실레이터(five-stage ring-oscillator ;RO)를 하나의 탄소 나노튜브에 집적하였음. 이러한 탄소 나노튜브는 5 쌍의 p-타입과 n-타입으로 구성된 CMOS를 가지고 있으며, 팔라디움(Pd)를 전극으로 사용하였음. 이에 따라 문턱 전 압(threshold voltages) 의 특성을 이용하여 팔라디움 전극을 p-타입 탄소 나노튜브에 사용하고 알루미늄 전극을 n-타입 탄소 나노튜브에 사용하였음. 이러한 새로운 접근법으로 도핑을 통한 문제를 해결 하였음. 또한 고유전 물질인 알루미늄 산화물(AlOx) 을 게이트 전극으로 사용하여 성능을 높혔음. 그림에서 보는 바와 같이 이 러한 5단계 소자에 동작 조 건의 최적화를 위하여 2개의 인버터를 더 집적하였음.

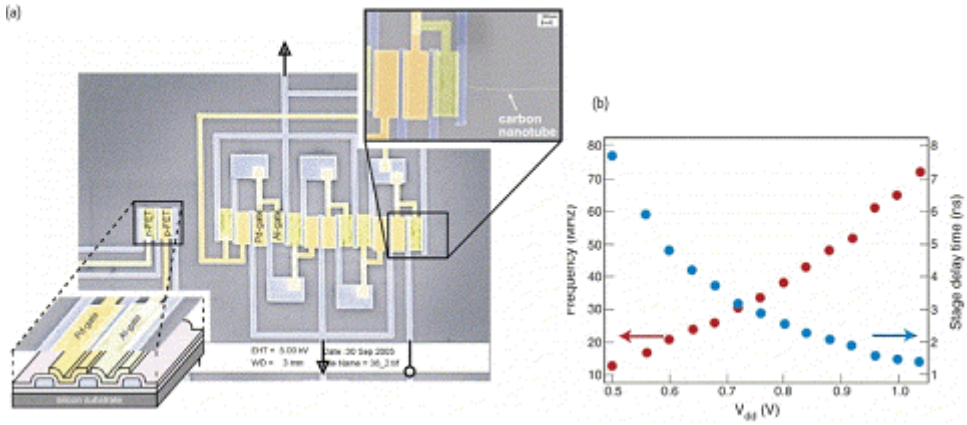

그림 8 . (a)하나의 긴 탄소 나노 튜브분자에 형성된 5 단계 링 오실레이터 회로의 주사전자 현미경 사진과 (b)전기적 특성

○ 이러한 회로에서 70 메가 헤르쯔(MHz)에서 동작이 가능하고 지연 시간 1.4 나노초(ns per stage)의 성능을 얻었음. 이는 기존의 탄소 나노 튜브를 이용한 오실레이터에 비하여 매우 띄어난 성능을 보이지만, 현재 사용되는 실리콘 수준의 집적도와 성능을 가지기 위해서는 더욱 많은 연구와 노력이 필요할 것임.

광전자 소자(Optoelectronic devices)로써의 탄소 나노튜브

○ 반도체에서 전자와 전공은 여러가지 메카니즘에 의하여 재결합됨. 이러한 경후 광자(phonons)라는 에너지로 방출하여 빛을 발산함. 이러한 메카니즘으로 고체 상태의 발광 다이오드(as light-emitting diodes ;LEDs)가 만들어짐. 양극성 탄소 나노 튜브는 전 자와 전공 을 동시에 발생시켜서 이러한 발광 현상을 이용한 소자를 구현하였음. 특히 탄소 나노튜브의 전기형광(electroluminescence)의 특징은 매우 흥미로운 특징을 가지고 있음. 발광은 탄소 나노튜브를 따라서 강하게 분극되고, 탄소 나 노튜브의 직경과 구 조(chirality)에 따라 다르게 나타남.

○ 짧은 탄소 나노튜브는 전체에 걸쳐서 발광 현상이 나타나고, 반면에 긴 탄소 나노튜브는 국부적인 곳에서 발생된다. 또한 발광 현상이 나타나는 곳은 게이트 전압에 의하여 위치를 변화시킬 수도 있음(그림11. 참조). 따라서 이러한 탄소 나노튜브 LED는 소자 내에서 이동성이 가능한 발광원으로 사용이 가능함.

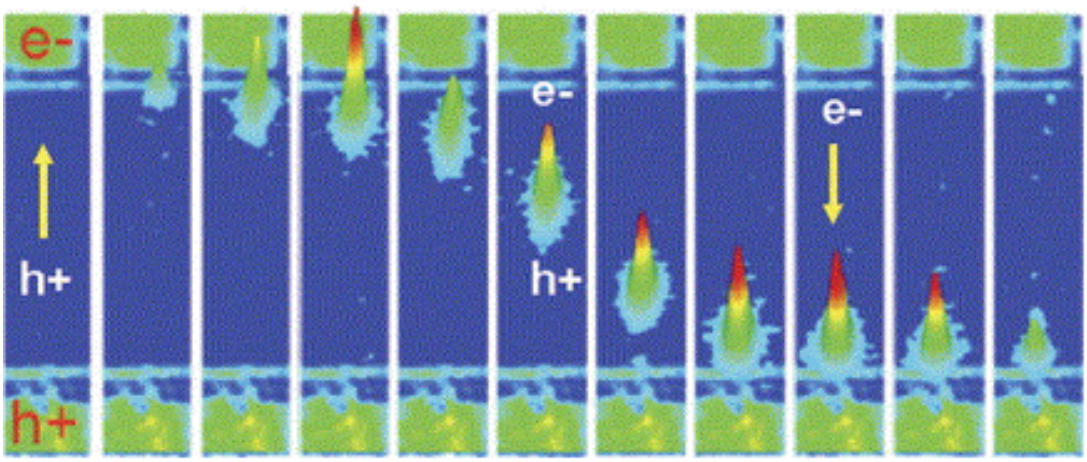

그림9. 양극성 탄소 나노튜브내에서 게이트 전압에 따른 발광 현상

○ 또한 이러한 발광 현상은 전자와 전공의 결합이 가능한 결 함(defects), 절연체 내의 갇힌 전하(trapped charges)와 전압 이 불규칙 한 장소과 같은 특정한 장소에서도 발생되었음. 이러한 현상을 이용하여 탄소 나노튜브 내에서 인위적으로 발광 장소를 만들 수 있는 장점이 있음.

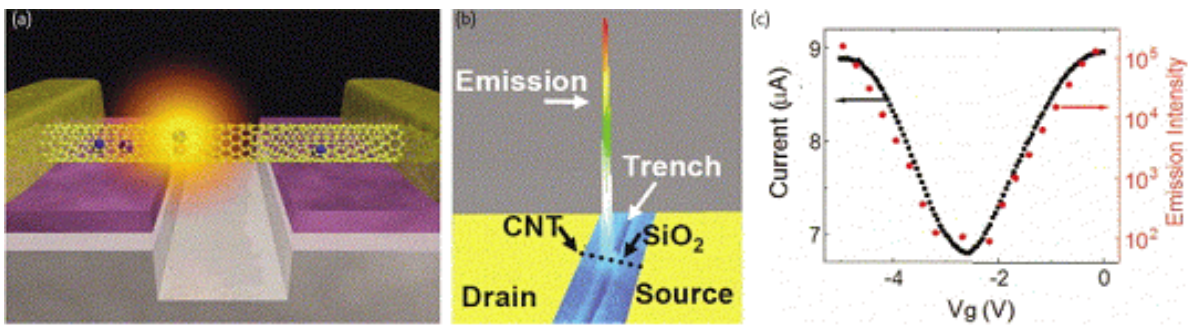

그림 10. (a) 탄소 나노튜브내에서 국부적인 발광 현상을 보 여준 모식도,
(b) 광학 현미경을 통한 발광현상 사진, (c) 게이트 전압에 따른 발광 강도

○ 따라서 다양한 동작 모드를 이용하여 탄소 나노튜브를 이용한 트랜지스터(CNT-FET)는 트랜지스터, 발광 소자, 광 검출기 등으로 응용이 가능함. 또한 탄소 나노튜브의 우수한 전기전도 특성을 이용하여 전계효과 디스플레이(FED)를 제조하여 실제 가정용 TV에도 응용이 가능함.

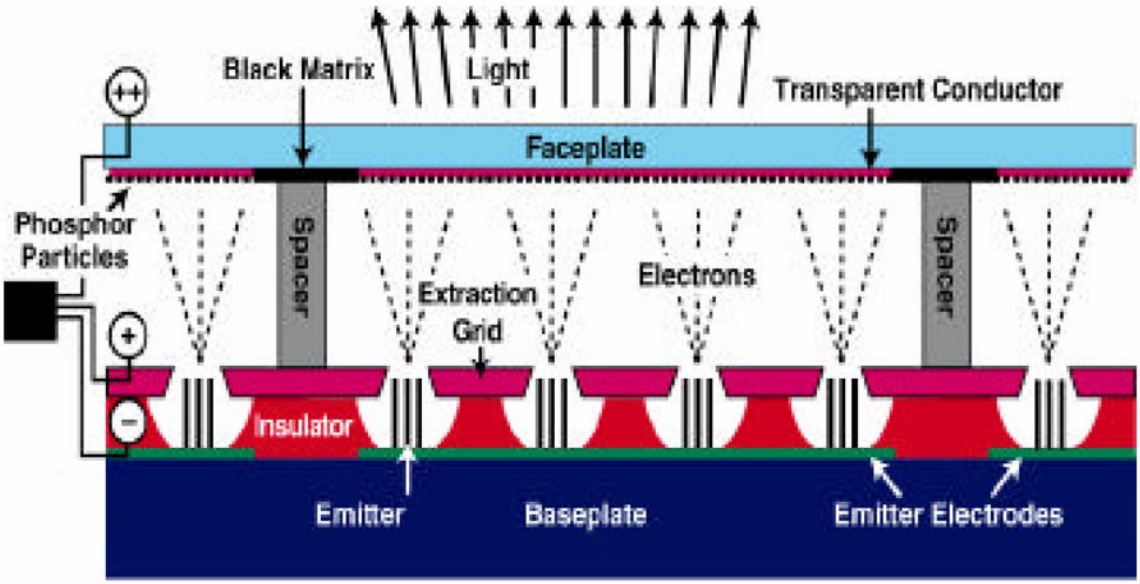

그림 11. 탄소나노튜브 에미터를 이용한 3전극 FED의 구조도

나. 나노와이어를 이용한 소자 (Nanowire devices) 개발과 이슈

○ 전자 소자는 집적 회로의 가장 기본적인 구성 요소임. 이는 증폭기와 신호 정류기, 논리 소자나 디지털 메모리 소자로 이용됨. 이러한 기본적인 전기 특성외에 발광 소자, 열 제어 소자나 심지어 생물학적 유체 흐름을제어하는 소자로 응용됨. 매우 작은 나노 와이어 소자는 새로운 연구 분야 및 응용분야로 떠오르고 있음.

나노와이어를 이용한 전계 효과 트랜지스터 (Field-effect transistors)

○ 이러한 다양한 가능성 주에서 전계 효과 트랜지스터(FET)는 반도체 산업에서 매우 중요함. 따라서 나노 와이어를 이용하여 FET를 만드는 것에 초점을 두는 것도 당연한 현실임. 그림에서 보는 바와 같이 균일하게 도핑된 나노 와이어는 우수한 트랜지스터의 성능을 보여줌.

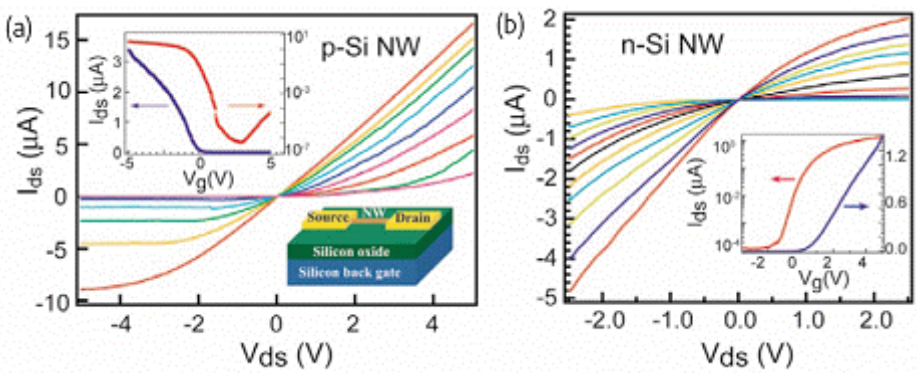

그림 12. (a) 20 나노미터 직경의 p-타입 실리콘 나노 와이어 구조도 및 전기적 특성
(b) 20 나노 미터 직경을 가지는 n-타 입 실리콘 나노 와이어의 전기적 특성

○ 또한 수직형(vertical nanowires)의 트랜지스터를 제조하고자 하는 노력을 하고 있음. 수직형은 소자의제조에 있어서 더욱 복잡하지만 3차원 구조로 더욱 집적도를 높힐 수 있다는 장점을 가지고 있음.

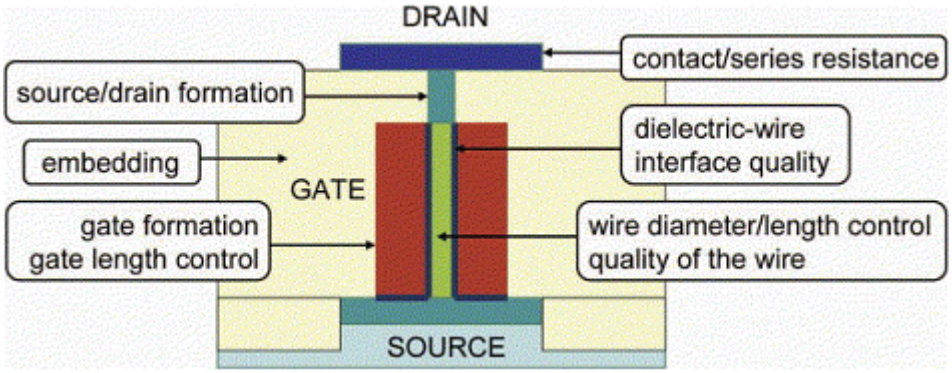

그림 13. 나노 와이어를 이용한 수직형 트랜지스터 구조도

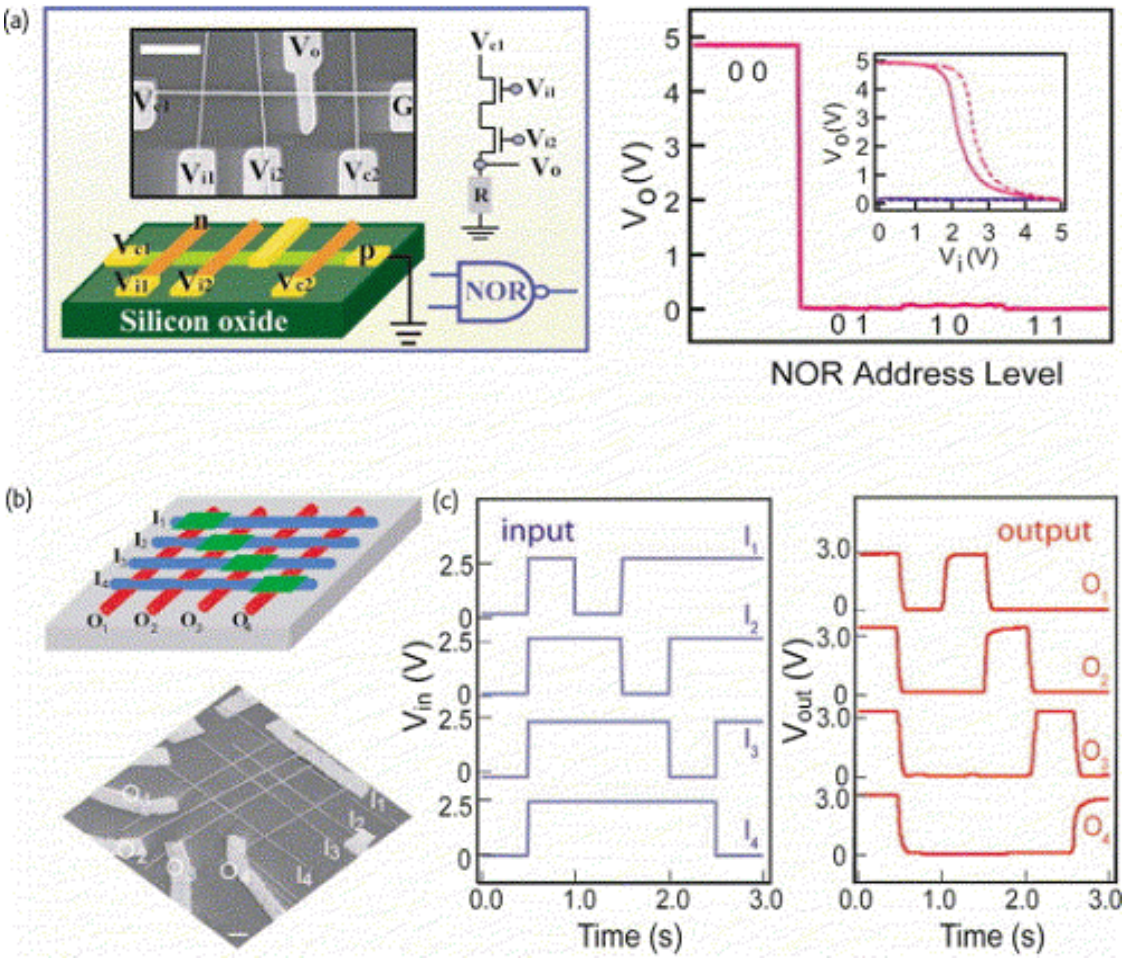

그림 14. 논리 소자로 집적된 응용한 실리콘 나노 와이어의 구조도 및 전기적 특성

○ 또한 전계 효과 트랜지스터외에 그림에서 보여주는 바와 같이 높은 주파수 영역에서 작동되는 고주파 트랜지스터(radio-frequency transistor)로도 제조가 가능함. 이러한 소자는 향후 휴대폰이나 통신 장비에 응용이 가능함. 또한 이러한 나노 와이어를 이용하여 광학 소자로도 응용이 가능.

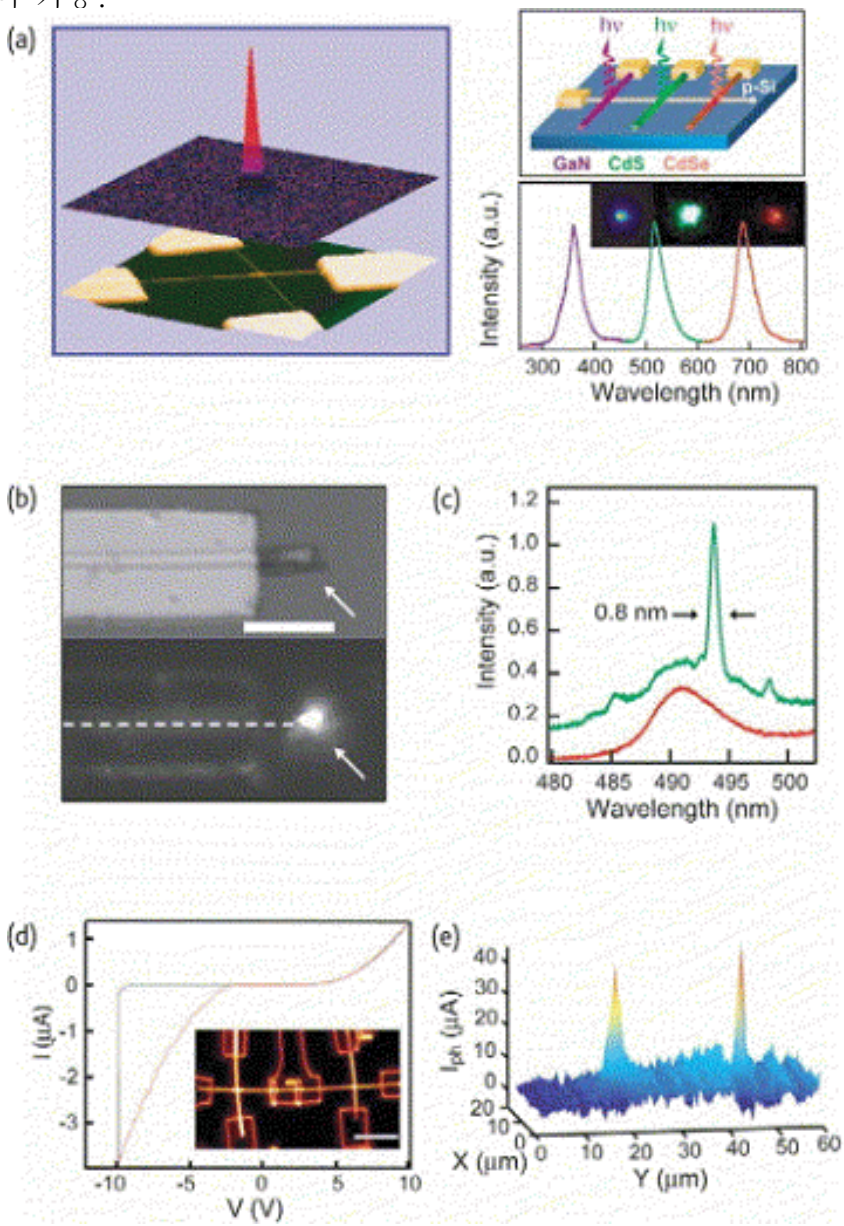

그림 15. 광소자로 응용한 나노 와이어 사진 및 광학적 특성

3 이슈 분석

실용화, 산업화를 위한 기술(산업)적 과제

○ 이러한 메모리, 디스플레이 분야에서 나노소재를 대량으로 정밀하게 조립하는 기술은 현재 상업화를 가로막는 중대 한 기술적인 걸림돌이 되고 있음. 따라서 이를 해결할 수 있는 나노소재의 조립 및 패터닝 공정 기술의 개발은 국가의 산업경쟁력을 바꿀 수 있을 만큼의 지대한 영향을 끼칠 수 있는 분야라고 할 수 있음.

○ 국내외적으로 탄소나노튜브 합성에 있어서 고품질 탄소나노튜브의 구조제어된 수직배향 합성기술, 저온 합성기술, 대면적 합성기술, 대량 합성기술, 단일면 (single-walled) 탄소나노튜브의 대량합성기술 등을 실현시키기 위해서는 아직도 해결해야 할 문제점들이 많음.

○ 아래는 국내외 주요 나노기술을 이용한 연구동향으로 향후 5년이내의 실용화 산업화를 위한 기술적 산업적으로 각 기업 과제 및 학계 등의 목표치임.

(1) 나노소자기술분야

○ 탄소나노튜브를 이용한 전계효과트랜지스터(CNT-FET) 연구
- 반도체 성질을 갖는 나노튜브를 제작을 통해 CNT-FET 시제품 개발(IBM)
  → 3~5년후 평면디스플레이 등에 실용화(IBM)
- single-CNT를 이용한 Top-gate형 수직구조 CNT-FET 제작 및 30K 동작확인에 성공 (삼성)
- 20나노미터 크기의 초고속(20GHz 현재속도의 15배), 초절전(전기소모량 1V) 실리콘 트랜지스터를 개발(인텔)

○ 대용량 나노정보저장장치 연구
- 현재보다 40배 고집적화를 위해 플라스틱에 원자크기의 홈을 파는 디스크 드라이브를 개발중이며, 2년후 상업화 전망(IBM)
- 1입방센티미터에 37테라비트의 정보를 써넣을 수 있고 반복기록이 가능한 광메모리 소자 개발(교또대학)
- 탄소나노튜브에 플러렌 분자를 넣어 정보기억용량을 1,000배 이상 향상시킬 수 있는 나노기억매체 프로토타입 개발(서울대)

○ 기타 나노소자 연구동향
- 극미세 전자소자 구현에 필요한 0.4nm 선폭의 초고집적 나노선 배열 합성
  → 전자소자간 연결선으로 활용가능(포항공대)
- 50nm급 상보성 실리콘 트랜지스터(CMOS) 개발(KAIST), 4Gb급 Si기반 단전자메모리 (SEM) cell 개발(삼성, 서울대)

(2) 나노소재기술분야

○ 저온 경량, 고강도, 고내성 특성을 갖는 첨단의 열가소성 올레핀 나노복합소재 개발 → 자동차 외장소재로 활용가능(GM)

○ 직경 2~3nm의 실리콘 결정 나노구체 제작 성공 → 나노와이어와 나노체인 제작에 응용 가능(오사카대)

○ 암 치료약 및 연료전지 등에 응용 가능한 플러렌(fullerene)의 월 100톤 이상 양산체제 확립(미쓰비시화학)
직경 6nm 희토류 금속산화물 함유 나노튜브 합성 → 영구자석, 광자기 디스크, 고온초전도체 등 첨단소재로 활용(사가대학)

○ 연료전지 성능향상, 휴대폰 밧데리 수명연장(1개월), 촉매화학반응속도 증진(10배이상)이 가능한 신기능 탄소나노물질 개발(KAIST)

○ 10nm크기의 황화카드늄(CdS) 반도체 입자와 코발트-백금(CoPt) 합금 자성물질 합성(KAIST)

○ 천연점토, 폴리아미드, 폴리에틸렌, 폴리스틸렌, 에폭시 수지, 규소고무 등을 원료로 고강도 나노플라스틱 개발(중국과학원)

(3) 나노바이오·환경·에너지기술분야

○ 암치료, AIDS 검사 등에 사용될 수 있는 바이오센서 기능을 갖는 금도금 나노입자 개발(라이스대학)

○ 탄소나노튜브를 전극으로 이용한 휴대기기용 소형연료전지 개발 → 자동차용 연료전지나 가정용 발전기의 실용화에 기여예상 (NEC)

○ MEMS기술을 이용하여 1㎝ 크기의 실리콘칩 위에 단백질 약 1만5000여개를 담을 수 있는 단백질칩 개발(서울대)

(4) 나노공정·장비기술분야

○고유전율의 세륨산화물을 실리콘위에 성장시켜 0.38nm 실리콘 산화물 gate 절연막 제작에 성공(도시바)

○ 현재보다 출력을 5배 높여 가공효율이 크게 향상된 "클러스터 이온빔 발생 장치" 개발(일본 시마즈 제작소)

○ 가시광을 이용해 100nm 미세패턴을 형성할 수 있는 리소그라피 기술 개발(일본산업기술연구소)

○ 위의 자료에서 보듯이 나노 기술을 응용한 많은 분야들은 국가적 차원에서 지원받고 있으며 적극적으로 추진되고 있으며 많은 기술적으로 해결해야 할 과제가 있음.

3 이슈 분석

산업적 응용분야 및 경제적 파급 효과

가. 나노 소재기술의 응용 분야 및 파급효과

○ 나노기술이 미칠 파급효과는 정보분야, 재료(소재)분야, 에너지분야, 환경분야, 의학분야, 국방분야 등 사회 전분야에 걸쳐 커다란 파급효과가 있을 것으로 기대됨. 나노기술은 산업 전반에 사용될 재료 자체의 변화를 초래하는 하는 만큼 사회경제 모든 분야에서 상상을 초월하는 변화를 몰고 올 것으로 보고 있음. 이러한 나노기술 발달을 위해서는 무엇보다도 탄탄한 기초과학 기반이 요구됨. 이를 바탕으로 하여 전자공학, 컴퓨터 공학, 재료공학, 화학공학, 생명공학과 같은 다른 학문과의 교류가 이루어지는 것임.

○ 이에 따라, 미국을 중심으로 한 전 세계의 많은 국가들이 나노기술 개발에 대한 조직적이고 과감한 투자를 기울이고 있음. 예를 들어 차세대 메모리의 경우, 2010년을 기준으로 1조 6,000억, 분자소자의 경우에는 2조 2,000억, 탄소 나노튜브를 이용한 FED는 7,500억이 예상되며, 연료전지 등의 에너지환경 분야에서는 2조 5,000억~4조 원의 시장이 형성되리라 추측됨. 또한 투명전극 시장은 2003년 현재 약 5조원 정도이며, 매년 약 50% 이상씩 성장을 하고 있음. 탄소 나노튜브를 통해 이를 대체할 수 있을 것으로 보고 있으며, 나노 튜브를 이용하여 렌즈에 사용하는 원자 현미경 팁 시장은 현재 3,000억 원 정도로 매년 30% 이상의 성장을 보이고 있다. FED, 백라이트, 램프를 포함한 디스플레이 시장은 현재 수십조 원이 넘을 정도로 규모가 큰 시장이며, 백라이트의 경우 휴대전화용으로 사용되는 것만도 국내 시장만 1조 원이 넘는 시장임. 그 외에 바이오 분야의 센서 시장은 DNA 탐지를 중심으로 하여 급성장 하고 있는 추세임.

○ 나노 부품을 대량으로 조립하게 되면, 나노 기술이 적용되는 대부분의 분야에서 그 파급효과가 매우 크다고 할 수 있음. 나노소재의 조립 기술은 기능성 나노소재를 원하는 위치에 원하는 형태로 조립할 수 있는 기술로서 기능성 나노소재를 이용해 만들 수 있는 각종 디바이스의 원천기술이 될 것임.

○ 현재까지는 나노 부품을 다루는 방법이 직접 손으로 하나씩 옮기는 방식을 써 왔지만 이를 대량으로 조립하게 되면, 원자 수준에서 성질이 조작된 물질들을 결합시켜 구조물을 만들 수 있으므로 그 활용분야는 무궁무진할 것임. 특히 디스플레이, 센서, 메모리 등을 중심으로 산업분야에서 나노 기술을 적용한 신상품 및 신산업을 일으킬 수 있는 산업 동력원으로서 역할을 할 수 있을 것으로 기대됨.

○ 국내의 경우 나노 사출 성형을 중심으로 발전하고 있는 추세이며, 기존의 금형 제작, 공정 최적화 및 원소재 기술 등을 기반으로 나노 사출에 필요한 핵심 공정 기술의 개발을 통해 나노 기술이 접목된 혁신 제품의 실용화 및 시장 형성을 크게 앞당길 수 있을 것으로 판단됨. 나노 사출 성형과 관련하여서는 2010년도에 6조 원 이상 규모의 시장이 형성될 것으로 예측되고 있어 고기능 디스플레이에 필수적인 차세대 도광판을 비롯한 기능성 표면 제품에서의 시장 선점 효과 및 경쟁력 확보에 크게 기여할 수 있다고 판단됨.

○ 디스플레이의 경우에는 FED, 램프, 백라이트 등과 같은 분야에서 현재 상품화를 위한 연구가 진행되고 있으며, 이 상품화 기술들의 핵심 난제인 탄소 나노튜브나 나노와이어의 수직 조립기술은 각종 제품의 상용화를 앞당기는 핵심 공정기술이 될 것임.

○ 센서 측면에서는 메커니컬 센서, 가스 센서, 바이오센서 등에서 연구가 진행되고 있으며, 마찬가지로 이를 상용화하기 위해서는 개별 나노소재의 제어 및 조립이 핵심 공정 기술이 됨. 따라서 이 공정을 개발하면, 향후 이 분야의 상용화를 앞당기는 결과를 가져올 것임.

○ 메모리, 논리 디바이스 등에서는 나노소재를 기존의 실리콘 패턴의 대체품으로 고려하고 있지만 이를 대량으로 정밀하게 조립하는 기술의 부재 때문에 어려움을 겪고 있음. 소재 조립 기술은 각종 바이오, 광, IT 소자들을 하나의 칩에 통합하는 연구 등에 활용될 수 있을 것임.

○ 이 외에도 나노소재를 BottomUp 기술로 정밀하게 조립하는 기술은 원자 현미경 팁, X 선 튜브, 전자빔 소스, EMI 실딩(shielding), ESD(Electrostatic diffusion), 전자 페인팅 (Electric painting) 등 많은 새로운 분야의 핵심 공정 기술로서 활용이 가능함.

○ 또한 국방, 환경, 정보통신, 가전 뿐 아니라 사회 전 분야에 걸쳐 기존 나노 물질을 이용하는 대부분의 분야에 생산성 있는 기능성 나노소재의 활용 방법을 제공해 줄 것으로 보임.

나. 기술의 산업적 응용분야 및 파급효과

○ 나노 공정의 개발은 미래형 대 용량 정보 저장이나 고기능 정보 표시 장치의 대량 생산을 통한 실용화를 가능하게 함으로써 사회, 문화적 측면에서 의 변혁과 함께 막대한 규모의 산업을 창출할 것 임. 나노 기술의 발전은 현재 외국의 대 기업들이 주도하고 있는 광 저장 장치 산업의 주도권을 확보하여 막대한 경제적 효과를 기대할 수 있음.

○ 또한 디스플레이 분야에서 현재 및 향후 상당 기간 그 수요가 가장 클 것으로 예상되는 새로운 부품의 실용화 및 대량 생산이 가능할 것으로 판단된다. 결과적으로 현재 세계 시장에서 비교 우위를 가지는 국내의 디스플레이 산업의 경쟁력 을 더욱 강화하여 막대한 관련 경제 효과를 기대할 수 있음.

○ 나노 기술은 나노 스케일의 소자를 저가로 대량 생산하는 것을 가능하게 하여, 반도체 분야에서 이룩한 국내의 기술력을 더욱 발전시킴으로써, 초고집적화가 가속되고 있는 정보처리, 저장과 관련된 신기능 소자 개발을 가능케 하 여 세계적인 기술 우위를 지속적으로 확보하는 데 기여함.

○ 나노 기술은 현재 학 계의 연구 분야를 넘어 산업체에서 활용 가능한 산업기술로 발전되고 있기 때문 에 본 기술의 제반 문제점을 극복하여 산업체 적용이 가능한 기술로 개발하는 것은 세계적으로 경쟁이 치열한 나노 기술의 산업화 분야를 선점하는데 있어 매우 중요하다 할 수 있음.

○ 나노 전자 및 광소자는 기존 물질이 가질 수 없는 다양한 신기능, 신 공정 적용을 통한 가격 우위를 통해 산업적으로 중요한 위치를 점해 가고 있음. 나노 와이어와 탄소 나노튜브를 이용한 광 통신 부품, 메모리 및 디스플레이를 위한 플라스틱 일렉트로닉스, 바이오센서 및 바이오칩 등의 개발을 위한 핵심기술이 될 것이며, 이러한 소자들이 창출하는 부가가치는 막대할 것임.

○ 나노 소재를 이용한 제품개발을 통한 국제경쟁력 확보 및 관련 신규산업 개척과 광기능성 소자용 부품소재기술 확보할 수 있는 효과도 있음. 또한 이 기술은 탄소나노튜브를 이용한 나노신기술을 선도하고 기초 및 응용연구에서 국제경쟁력 확보하고 21세기의 첨단 전자정보산업의 선도적 위치 구축하고 이를 통한 고부가가치의 첨단 전자정보산업을 창출할 수 있음. 이는 해외 의존도가 높은 관련산업 제품의 고급화 및 고유 상품화로 산업경쟁력의 향상시키는 파급효과가 있음.

○ 특히 국내의 산업 기반이 우수한 메모리, 디스플레이 분야 와 연계한 기술 개발에 해당되므로 국내의 경쟁력 있는 기업과의 협력관계를 기반으로 한 국가 산업 경쟁력을 획기적으로 제고 할 수 있음. 세계적으로 시작시점에 있는 개발 기술로서 여타 국가에 비해 이 기술을 선점하면, 국가의 기술적 선진국으로서의 위상을 제고하고 향후 국제 연구 무대에서 기술을 주도해 나갈 수 있는 기술적 기반을 구축할 수 있을 것임.

○ 나노 기술은 다른 광소자 및 나노 소자들을 집적화시킨 나노소자를 제작하는 데에도 매우 중요한 기술이며, 바이오 관련 센서나 툴의 개발에도 미치는 영향이 매우 클 것으로 판단됨. 나노소재와 관련 된 응용 분야는 다양함. 특히 조립 및 패터닝 기술 개발은 이러한 응용 분야에서 제품의 상용화를 가속화시키는 중요한 역 할을 담당하게 됨.

○ 나노스케일 선폭의 개발로 나노 기술의 국제 경쟁력 제고가 가능하며, 나노 단위의 신제품 및 기능성 부품의 양산기술 개발을 통하여 세계 나노 부품시장에 고품질 제품을 공급함으로써 해외기술 종속에서 탈피하여 21세기 국가 경쟁력을 확보할 수 있음.

○ 나노 기술의 제반 문제점을 극복하고, 산업체 적용이 가능한 기술로 개발하는 것은 세계적으로 경쟁이 치열한 나노 기술의 산업화 분야에서 세계를 선도하는데 크게 기여 할 것으로 기대됨.

결론

4

4 결 론

○ 우리나라 수출 품목 가운데서도 부가가치가 높은 반도체가 머지않아 제조상의 한계를 겪게 될 것으로 보고 있음. 이를 극복하기 위한 대안기술이 바로 나노 소자사업임.

○ 탄소 나노튜브는 바이오 전자소자와 새롭고 경제적으로 제조가 가능한 다양한 분야에 응용이 가능하다는 장점이 있음. 낮은 수준의 집적이 요구되는 곳에 응용되어, 특히 수조원의 자금이 요구되는 통신 장비등에 응용하여 고품질의 경제적인 장비를 제작할 수 있을 것으로 여겨짐.

○ 식각에 의한 공정 기술은 소자의 미세화에 따라 집적 기술과 성능에 대하여 한계점을 가지고 있으므로 탄소 나노튜브와 나노 와이어를 이용한 기술 개발은 매우 중요함.

○ 탄소 나노튜브의 특별한 특성으로 인하여 향후 나노 전자 소자(nanoelectronics)와 광학(photonics)에 있어 매우 중요한 물질로 사용될 것이 확실시 되며, 지금까지 이러한 가능성을 여러 나라와 연구 기관에서 보여줌.

○ 새로운 기술에는 많은 문제점과 한계점이 있으므로 완전한 탄소 나노튜브 기반의 기술(CNT-based technology)로 개발되기 이전에 이러한 문제점을 해결해야 하는 것이 최우선 과제로 여겨짐.

○ 대용량 고집적 공정 등의 문제점 극복 없이는 고도로 발달된 실리콘 기반 기술을 대체하는데 한계가 있을 것으로 예상됨.

참고문헌

1. Phaedon Avouris and Jia Chen, Materialstoday, Volume 9, Issue 10 , October 2006, Pages 46-54
2. Haensch, W., et al., IBM J. Res. Dev. (2006) 50, 339
3. Iijima, S., et al., Nature (1993) 363, 603
4. Bethune, D. S., et al., Nature (1993) 363, 605
5. Dresselhaus, M. S., et al., Phys. Rev. B (1992) 45, 6234
6. Mintmire, J. W., et al., Phys. Rev. Lett. (1992) 68, 631
7. Dresselhaus, M. S., et al., (eds.), Carbon Nanotubes: Synthesis, Structure, Properties and Applications, Springer, Berlin, Germany, (2001)
8. Avouris, Ph., et al., in Applied Physics of Carbon Nanotubes: Fundamentals of Theory, Optics and Transport Devices, Rotkin, S. V., and Subramoney, S., (eds.), Springer, Berlin, Germany, (2005)
9. Reich, S., et al., Carbon Nanotubes, Wiley-VCH, Weinheim, Germany, (2004)
10. Avouris, Ph., MRS Bull. (2004) 29, 403
11. McEuen, P. L., et al., IEEE Trans. Nanotechnol. (2002) 1, 78
12. Dai, H. J., Surf. Sci. (2002) 500, 218
13. Dekker, C., Phys. Today (1999) 52, 22
14. Javey, A., et al., Nano Lett. (2004) 4, 447
15. Seidel, R. V., et al., Nano Lett. (2005) 5, 147
16. Ando, T., et al., J. Phys. Soc. Jpn. (1997) 66, 1066
17. Spataru, C. D., et al., Phys. Rev. Lett. (2004) 92, 077402
18. Perebeinos, V., et al., Phys. Rev. Lett. (2004) 92, 257402
19. Wang, F., et al., Science (2005) 308, 838
20. Maultzsch, J., et al., Phy. Rev. B (2005) 72, 241402(R)
21. McEuen, P. L., et al., Phys. Rev. Lett. (1999) 83, 5098
22. Liang, W., et al., Nature (2001) 411, 665
23. Kong, J., et al., Phys. Rev. Lett. (2001) 87, 106801
24. Appenzeller, J., et al., Appl. Phys. Lett. (2001) 78, 3313
25. Mann, D., et al., Nano Lett. (2003) 3, 1541
26. LeRoy, B. J., et al., Nature (2004) 432, 371
27. Perebeinos, V., et al., Phys. Rev. Lett. (2005) 94, 086802
28. Fuhrer, M. S., et al., Nano Lett. (2002) 2, 755
29. Durkop, T., et al., Nano Lett. (2004) 4, 35
30. Park, J.-Y., et al., Nano Lett. (2004) 4, 517
31. Javey, A., et al., Phys. Rev. Lett. (2004) 92, 106804
32. Lazzeri, M., et al., Phys. Rev. Lett. (2005) 95, 236802
33. Mann, D., et al., J. Phys. Chem. B (2006) 110, 1502
34. Tans, S. J., et al., Nature (1998) 386, 474
35. Martel, R., et al., Appl. Phys. Lett. (1998) 73, 2447
36. Martel, R., et al., Phys. Rev. Lett. (2001) 87, 256805
37. Lin, Y.-M., et al., IEEE Electron Device Lett. (2005) 26, 823
38. Collins, P. G., et al., Science (2000) 287, 1801
39. Derycke, V., et al., Appl. Phys. Lett. (2002) 80, 2773

참고문헌

40. Lenard, F., and Tersoff, J., Phys. Rev. Lett. (2000) 84, 4693
41. Heinze, S., et al., Phys. Rev. Lett. (2002) 89, 106801
42. Appenzeller, J., et al., Phys. Rev. Lett. (2002) 89, 126801
43. Freitag, M., et al., Phys. Rev. Lett. (2002) 89, 216801
44. Chen, Z., et al., Nano Lett. (2005) 5, 1497
45. Javey, A., et al., Nature (2003) 424, 654
46. Javey, A., et al., Nat. Mater. (2002) 1, 241
47. Rosenblatt, S., et al., Nano Lett. (2002) 2, 869
48. Lin, Y.-M., et al., IEEE Trans. Nanotechnol. (2005) 4, 481
49. Radosavljevic, M., et al., Appl. Phys. Lett. (2003) 83, 2435
50. Chen, J., et al., Appl. Phys. Lett. (2005) 86, 123108
51. Wind, S. J., et al., Phys. Rev. Lett. (2003) 91, 058301
52. Appenzeller, J., et al., Phys. Rev. Lett. (2004) 93, 196805
53. Maultzsch, J., et al., Appl. Phys. Lett. (2002) 81, 2647
54. Sadanadan, B., et al., J. Nanosci. Nanotechnol. (2003) 3, 99
55. Cui, X., et al., Nano Lett. (2003) 3, 783
56. Kong, J., et al., Appl. Phys. Lett. (2000) 77, 3977
57. Kong, J., and Dai, H., J. Phys. Chem. B (2001) 105, 2890
58. Shim, M., et al., J. Am. Chem. Soc. (2001) 123, 11512
59. Klinke, C., et al., Nano Lett. (2005) 5, 555
60. Derycke, V., et al., Nano Lett. (2001) 1, 453
61. Bachtold, A., et al., Science (2001) 294, 1317
62. Javey, A., et al., Nano Lett. (2002) 2, 929
63. Chen, Z., et al., Science (2006) 311, 1735
64. Burke, P. J., Solid-State Electron. (2004) 48, 1981
65. Auvray, S., et al., Nano Lett. (2005) 5, 451
66. Hannon, J. B., et al., Langmuir (2005) 21, 8569
67. Gigliotti, B., et al., Nano Lett. (2006) 6, 159
68. Klinke, C., et al., Nano Lett. (2006) 6, 906
69. Williams, K. A., et al., Nature (2002) 420, 761
70. Keren, K. et al., Science (2003) 302, 1380
71. Zheng, M., et al., Science (2003) 302, 1545
72. Mclean, R. S., et al., Nano Lett. (2006) 6, 55
73. Misewich, J. A., et al., Science (2003) 300, 783
74. Freitag, M., et al., Nano Lett. (2004) 4, 1063
75. Freitag, M., et al., Phys. Rev. Lett. (2004) 93, 076803
76. Freitag, M., et al., Nano Lett. (2006) 6, 1425
77. Chen, J., et al., Science (2005) 310, 1171
78. Perebeinos, V., and Avouris, Ph., unpublished results
79. Freitag, M., et al., Nano Lett. (2003) 3, 1067
80. Qiu, X., et al., Nano Lett. (2005) 5, 749

40. Lenard, F., and Tersoff, J., Phys. Rev. Lett. (2000) 84, 4693
41. Heinze, S., et al., Phys. Rev. Lett. (2002) 89, 106801
42. Appenzeller, J., et al., Phys. Rev. Lett. (2002) 89, 126801
43. Freitag, M., et al., Phys. Rev. Lett. (2002) 89, 216801
44. Chen, Z., et al., Nano Lett. (2005) 5, 1497
45. Javey, A., et al., Nature (2003) 424, 654
46. Javey, A., et al., Nat. Mater. (2002) 1, 241
47. Rosenblatt, S., et al., Nano Lett. (2002) 2, 869
48. Lin, Y.-M., et al., IEEE Trans. Nanotechnol. (2005) 4, 481
49. Radosavljevic, M., et al., Appl. Phys. Lett. (2003) 83, 2435
50. Chen, J., et al., Appl. Phys. Lett. (2005) 86, 123108
51. Wind, S. J., et al., Phys. Rev. Lett. (2003) 91, 058301
52. Appenzeller, J., et al., Phys. Rev. Lett. (2004) 93, 196805
53. Maultzsch, J., et al., Appl. Phys. Lett. (2002) 81, 2647
54. Sadanadan, B., et al., J. Nanosci. Nanotechnol. (2003) 3, 99
55. Cui, X., et al., Nano Lett. (2003) 3, 783
56. Kong, J., et al., Appl. Phys. Lett. (2000) 77, 3977
57. Kong, J., and Dai, H., J. Phys. Chem. B (2001) 105, 2890
58. Shim, M., et al., J. Am. Chem. Soc. (2001) 123, 11512
59. Klinke, C., et al., Nano Lett. (2005) 5, 555
60. Derycke, V., et al., Nano Lett. (2001) 1, 453
61. Bachtold, A., et al., Science (2001) 294, 1317
62. Javey, A., et al., Nano Lett. (2002) 2, 929
63. Chen, Z., et al., Science (2006) 311, 1735
64. Burke, P. J., Solid-State Electron. (2004) 48, 1981
65. Auvray, S., et al., Nano Lett. (2005) 5, 451
66. Hannon, J. B., et al., Langmuir (2005) 21, 8569
67. Gigliotti, B., et al., Nano Lett. (2006) 6, 159
68. Klinke, C., et al., Nano Lett. (2006) 6, 906
69. Williams, K. A., et al., Nature (2002) 420, 761
70. Keren, K. et al., Science (2003) 302, 1380
71. Zheng, M., et al., Science (2003) 302, 1545
72. Mclean, R. S., et al., Nano Lett. (2006) 6, 55
73. Misewich, J. A., et al., Science (2003) 300, 783
74. Freitag, M., et al., Nano Lett. (2004) 4, 1063
75. Freitag, M., et al., Phys. Rev. Lett. (2004) 93, 076803
76. Freitag, M., et al., Nano Lett. (2006) 6, 1425
77. Chen, J., et al., Science (2005) 310, 1171
78. Perebeinos, V., and Avouris, Ph., unpublished results
79. Freitag, M., et al., Nano Lett. (2003) 3, 1067
80. Qiu, X., et al., Nano Lett. (2005) 5, 749
81. Samuelson, L., Materials Today (2003) 6 (10), 22
82. International Technology Roadmap for Semiconductors, www.itrs.net/reports.html
83. Nanowire-based one-dimensional electronics (NODE), www.node-project.com
84. Xia, Y., et al., Adv. Mater. (2003) 15, 353
85. Wagner, R. S., and Ellis, W. C., Appl. Phys. Lett. (1964) 4, 89

86. Hiruma, K., et al., J. Appl. Phys. (1995) 77, 447
87. Persson, A. I., et al., Nat. Mater. (2004) 3, 677
88. Dick, K. A., et al., Nano Lett. (2005) 5, 761 89. Shi, W. S., et al., Adv. Mater. (2001) 13, 591
90. Noborisaka, J., et al., Appl. Phys. Lett. (2005) 86, 213102
91. Mtensson, T., et al., Nanotechnology (2003) 14, 1255
92. Mtensson, T., et al., Nano Lett. (2004) 4, 1987
93. Hiruma, K., et al., J. Cryst. Growth (1996) 163, 226
94. Nguyen, P., et al., Adv. Mater. (2005) 17, 1773
95. Krishnamachari, U., et al., Appl. Phys. Lett. (2004) 85, 2077
96. Huang, Y., et al., Science (2001) 291, 630
97. Suk, S. D., et al., Tech. Dig. IEDM (2005), 717
98. Bryllert, T., et al., IEEE Electron Device Lett. (2006) 27, 323
99. Bryllert, T., et al., Nanotechnology (2006) 17, S227
100. Lu, W., et al., Proc. Natl. Acad. Sci. USA (2005) 102, 10046
101. Bakkers, E. P. A. M., et al., Nat. Mater. (2004) 3, 769
102. Xiang, J., et al., Nature (2006) 441, 489
103. Schmidt, V., et al., Small (2006) 2, 85
104. Wernersson, L. E., et al., Tech. Dig. IEDM (2005), 265
105. Goldberger, J., et al., Nano Lett. (2006) 6, 973
106. Doh, Y.-J., et al., Science (2005) 309, 272
107. Bjk, M. T., et al., Appl. Phys. Lett. (2002) 81, 4458
108. Wu, Y., et al., Nature (2004) 430, 61
109. 나노테크놀로지-BottomUp 형 기술 중심에 관한 특허출원 기술동향 조사보고서, 2003

저자소개

➢ 박 정 원

- 공학박사 4년차 과정
- 현, University of California, San Diego 연구 조교

➢ 한국과학기술정보연구원 동향정보분석팀