

고성능 Flexible 전자소자를 위한 탄소나노튜브 Array 및 Nano Surface Transfer 기술

강성준 선임연구원 (한국표준과학연구원 전라기술연구본부 나노측정센터)

1. 서론

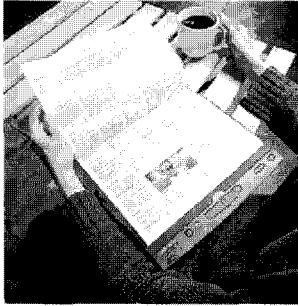
현대사회는 1988년 미국의 Mark Weiser가 주장한 바와 같이 유비쿼터스(Ubiquitous)의 시대로 접어들었다. 이에 과학기술 분야는 물론 사회 분야 전반에 걸쳐 정보혁명이 이루어지고 있으며, 그에 따른 사회구성원들의 풍요로운 삶의 질 향상이 기대되고 있다. 지금까지는 정보화 시대에 따른 고성능 전자소자 기술이 중추적인 역할을 하였으며, 실리콘을 기반으로 하는 전자소자가 주로 연구되어 왔다. 그러나 유비쿼터스시대에 발맞추어 Flexible 및 Stretchable과 같은 다양하고 새로운 개념의 인터페이스의 요구가 생겨나게 되고, 기존의 실리콘 기술로는 그 한계가 드러남에 따라 새로운 과학기술 개발의 필요성이 대두되고 있다. 이러한 요구에 부응하기 위하여, 최근 개발된 새로운 가공기술을 이용하여 실리콘이나 GaAs와 같은 무기물을 이용하여 다양한 인터페이스에 부합하는 특성을 부여할 수는 있으나, 소요비용과 공정상의 어려움으로 인해 또 다른 난항을 겪고 있다. 그 외에도, 유기물이나 폴리머 계통의 소재들에 대한 연구가 많이 진행되고 있으나, 전기적 특성의 제약으로 실질적인 고성능 인

터페이스로서의 응용에는 상당한 시간이 소요될 것으로 보인다.

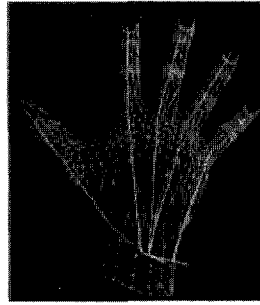
따라서 인류가 한 차원 높은 유비쿼터스의 시대로 도약하기 위해서는 새로운 소재를 이용한 신개념의 기술로 대용량의 정보를 초고속으로 처리하는 기술의 개발이 시급하다. 더 나아가 처리된 정보가 인간이 효율적으로 사용가능 하도록 하는 새로운 개념의 인터페이스 개발 또한 매우 시급하다.

2. 탄소나노튜브 Array 기술

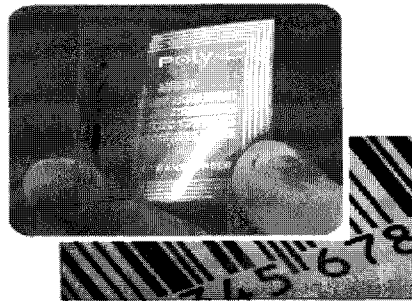
1991년 일본의 Sumio Iijima에 의해 발견된 탄소나노튜브는 실리콘이나 GaAs에 비해 전기, 화학적 특성이 매우 뛰어나며, 그 응용성 또한 무한하여 미래의 첨단소재로서 많은 각광을 받고 있다. 특히 탄소나노튜브는 새로운 개념의 입력, 처리 장치뿐만 아니라, 인공근육 및 인공신경과 같은 전혀 새로운 개념의 정보교환 인터페이스 개발이 가능하여 그 중요성이 매우 높다. 최근에는 탄소나노튜브를 이용하여 실제로 작동하는 탄소나노튜브 라디오까지 구현되었고, 탄소나노튜브 기술은 MIT에 의해 2008년 10대 미래 유망기술로 선정되었다.



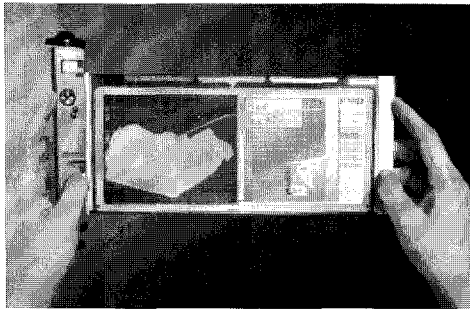
(a) Electronic Papers



(b) Outdoor/Indoor Advertising

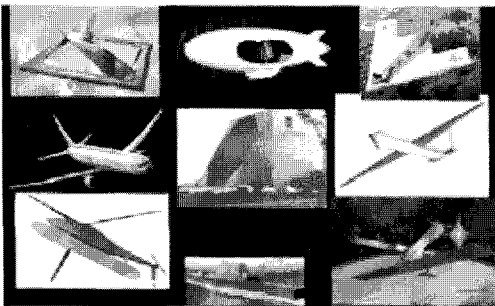


(e) Smart Gloves Radio Frequency Identification Tag (RFID)



(c) Rollable Display

그림 1. 다양한 Flexible 인터페이스 적용 사례.



(d) Military Applications Large Area Active Antenna

현재 탄소나노튜브를 이용한 연구를 선도하는 대표적인 연구그룹은 미국 Stanford의 Hongji Dai와 IBM T. J. Watson Research Center의 P. V. Avouris 그리고 UIUC의 John A. Rogers 교수가 있다. Stanford의 Hongji Dai는 Thermal CVD (Chemical Vapor Deposition) System과 Plasma Etching 공정을 결합시켜 순수한 반도체 탄소나노튜브를 제작하기 위한 연구를 매우 활발히 하고 있다. P. V. Avouris는 2006년 Science지를 통하여 세계최초로 동작되는 5-stage Ring Oscillator를 발표함으로써 탄소나노튜브의 무한한 응용 가능성을 보여주었고, 2007년 John A. Rogers 교수는 탄소나노튜브 Array 기술을 기반으로 세계 최초로 작동되는 아날로그 라디오를 시연함으로써 탄소나노튜브의 상용화를 크게 앞당겼다. 이외에도 국내에서는 서울대학교 물리학과 홍승훈 교수팀이 탄소나노튜브 기반

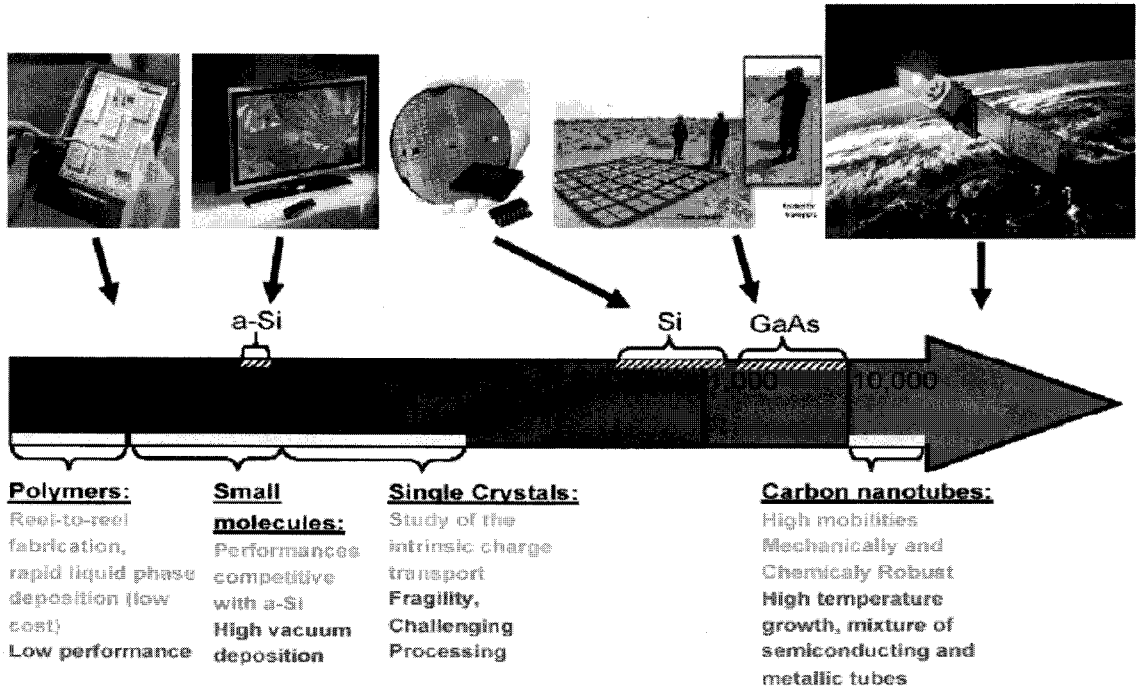


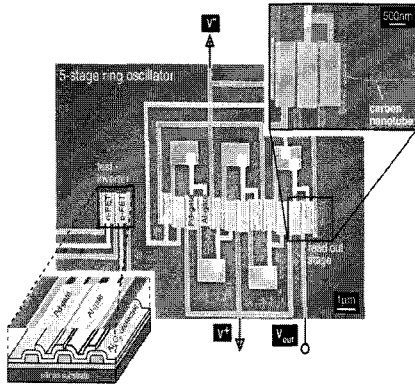
그림 2. 다양한 인터페이스에 사용 가능한 반도체 소재.

Resonator에 관한 연구를 매우 활발하게 진행하여 2008년 Nature Materials에 발표하였고, 성균관대학교 물리학과 이영희 교수는 탄소나노튜브를 이용한 상용화 기술뿐만 아니라 탄소나노튜브의 전자구조에 관한 연구로 세계 최고 수준의 연구를 진행하고 있다.

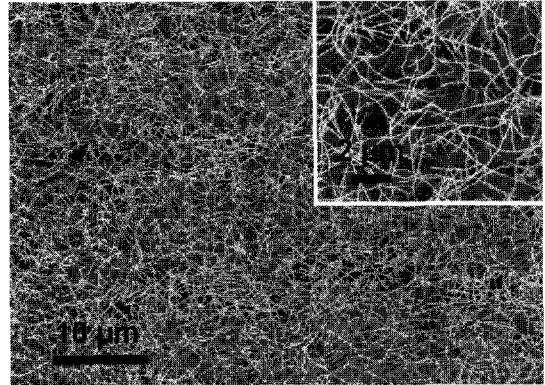
앞서 언급한 바와 같이 최근 들어 고성능 전자소자에 대한 요구에 따라, 현존하는 최고의 반도체 소재 중의 하나인 탄소나노튜브에 대한 연구가 매우 활발하게 이루어지고 있다. 이에 탄소나노튜브가 전자소자로 응용 가능성이 충분히 입증되었으나, 탄소나노튜브를 정렬시키는 방법이 없어 대부분 정렬되지 않은 탄소나노튜브 (네트워크) 혹은 탄소나노튜브 한 개를 이용한 소자를 제작하는데 그쳤다. 정렬되지 않은 탄소나노튜브 (그림4)를 이용하여 반도체 소자 혹은 센서를 제작할 경우, 탄소나노튜브와 탄소나노튜브 사이에 수많은 접촉저항이 생기게 됨으로써 탄소나노튜브 본연의 우수한 전기적 특성을 구

현하는 것이 어렵다. 또한, 탄소나노튜브 한 개를 이용하여 소자를 제작할 경우 E-beam Lithography를 사용하는 등의 기술적 어려움이 많아 관련기술 실용화에는 해결해야 할 문제가 많아 보인다. 따라서 많은 연구 그룹에서는 대면적 탄소나노튜브 박막의 필요성을 인지하면서, 수많은 접촉저항을 제거할 방법을 찾고 있다.

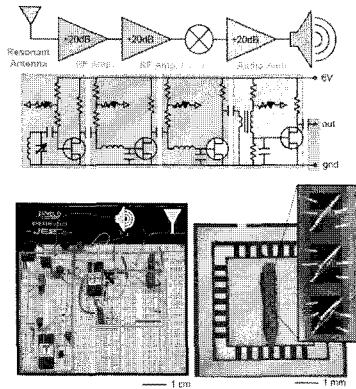
이러한 문제를 해결하기 위하여 탄소나노튜브를 기판과 평행한 방향으로 배열하는 기술이 개발되어 2007년 Nature Nanotechnology에 발표되었다. 탄소나노튜브를 기판과 평행하게 정렬시키기 위하여, 탄소나노튜브가 Thermal CVD 방법으로 성장될 때 단결정 기판의 결정방향에 영향을 받는다는 특성을 이용하여 탄소나노튜브 Array를 제작하는데 성공하였다. 특정한 방향성을 갖는 단결정 Quartz 기판이 사용되었으며, 탄소나노튜브 성장 전처리 과정으로 약 900도에서 기판을 열처리 하였다. Quartz 기판의 열처리 후, 탄소나노튜브의 촉매를 Photo Litho-



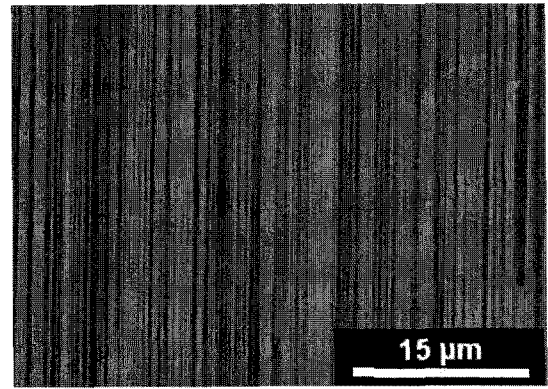
(a)



(a)



(b)



(b)

그림 3. IBM의 탄소나노튜브 Ring Oscillator (a)와 UIUC John A. Rogers가 제작한 탄소나노튜브 아날로그 라디오 (b).

그림 4. 정렬되지 않은 탄소나노튜브 (a)와 기판과 평행하게 정렬된 탄소나노튜브 Array (b).

graphy 방법으로 패터닝하여 기판에 일정한 간격으로 탄소나노튜브의 촉매를 형성시켰다. 이후, 일반적인 Thermal CVD 탄소나노튜브 성장법을 이용하여 기판과 평행한 고밀도 탄소나노튜브 Array박막(그림 4)을 제작하였다. 이렇게 성장된 탄소나노튜브 Array는 탄소나노튜브 사이의 접촉저항 없이 기판위에 고밀도 및 대면적으로 형성이 가능하여, 실질적인 Device Scale에서 탄소나노튜브 전자소자를 간편하게 구현할 수 있다는 점이 최대 장점이다. 또한, 탄소나노튜브 자체의 접촉저항이 모두 제거되었기 때문에, 전자소자로 활용할 경우 소자의 특성은

Intrinsic한 탄소나노튜브의 특성을 모두 구현할 수 있게 된다. 탄소나노튜브 Array기술을 이용하여 트랜지스터를 제작했을 경우 Field Effect Mobility는 $\sim 2,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 이며, 정렬되지 않은 탄소나노튜브의 Field Effect Mobility가 $\sim 20 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 임을 고려하였을 때, 소자의 전기적 특성이 매우 높아졌음을 알 수 있다. 탄소나노튜브 한 가닥의 이론적인 Field Effect Mobility가 $\sim 10,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 인 것을 고려하면, 앞으로 탄소나노튜브 Array 전자소자의 경우 탄소나노튜브와 전극간의 접촉저항을 줄이는 기술과 탄소나노튜브를 보다 밀도 높게 성장시키는 기술을 사용하면 탄소나노튜브 Array소자의 특성이 이론적인 값

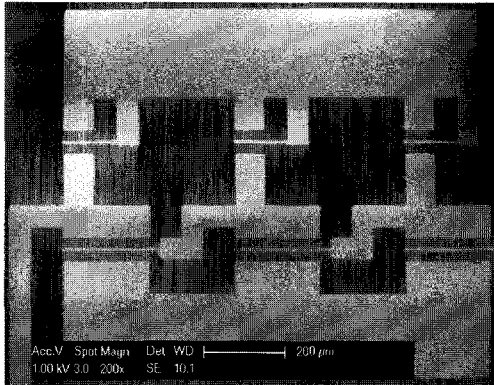


그림 5. Full 탄소나노튜브 Ring Oscillator 전자회로.

에 매우 근접할 것으로 기대된다.

탄소나노튜브 Array 기술의 또 다른 응용성은 고성능 전자 소자가 구현 가능하다는 점뿐만 아니라, Full 탄소나노튜브 전자소자 회로를 간단한 공정으로도 구현할 수 있다는 점이 있다. 그림 5에서와 같이 탄소나노튜브의 촉매인 철 나노입자를 전자회로의 전극 모양으로 패터닝한 후 탄소나노튜브 Array 기술을 이용하여 탄소나노튜브 Array 박막을 만들게 되면, Full 탄소나노튜브 전자회로를 쉽게 형성할 수 있다. 그림에 나와 있는 흰색 영역은 탄소나노튜브 촉매인 철 나노입자가 있는 영역으로, 고밀도의 수직방향 탄소나노튜브 혹은 고밀도의 탄소나노튜브 Network가 성장되어, 전자회로의 전극으로 활용할 수 있게 된다. 반면에 탄소나노튜브의 촉매가 없는 영역은 탄소나노튜브 Array가 형성되어 전자소자의 반도체 영역으로 사용할 수 있게 된다. 따라서 향후 본 기술이 반도체 산업에 적용된다면, 탄소나노튜브만으로 이루어진 새로운 개념의 전자소자가 실현될 것으로 기대된다.

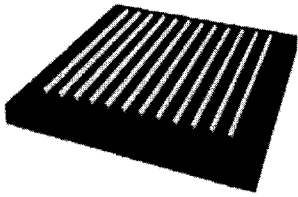
3. Nano Surface Transfer 기술

탄소나노튜브를 이용한 고성능의 전자소자 구현은 탄소나노튜브 Array 기술을 사용함으로써 실현되었다. 하지만, 현대사회는 Flexible 전자소자와 같

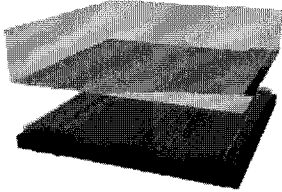
은 다양한 형태의 인간과 기계간의 인터페이스를 요구하고 있다. 일반적으로 탄소나노튜브 성장은 고온의 공정을 요구하는 과정으로 플라스틱 기판을 사용할 수 없어, 탄소나노튜브 자체가 Flexible함에도 불구하고 전체 소자에 있어서는 Flexible과 같은 특성을 구현하기 어렵다. 이를 해결할 수 있는 기술이 Nano Surface Transfer 기술이다.

2007년 Nature Nanotechnology와 Nano Letters에 연달아 보고된 탄소나노튜브의 Nano Surface Transfer 기술은 기존의 실리콘 Transfer 기술과는 다르게, 크기가 나노미터 이하인 물질까지 자유자재로 옮기며 위치를 제어할 수 있어, 고성능의 탄소나노튜브의 다양한 응용소자 제작이 가능하게 한 기술로 평가받고 있다. 특히 상대적으로 간단한 원리로 탄소나노튜브의 위치를 제어할 수 있어 근시일 내에 실용화가 가능한 기술이다. 탄소나노튜브를 옮기기 위한 첫 번째 단계는 기판위에 성장시킨 탄소나노튜브를 얇은 금박막과 폴리머박막으로 순서대로 코팅하는 것으로 시작된다. 탄소나노튜브와 화학적 반응이 전혀 없는 금박막을 사용함으로써, 탄소나노튜브 Transfer 중에 발생할 수 있는 화학적 오염을 원천적으로 차단할 수가 있다. 금박막과 폴리머박막으로 코팅된 탄소나노튜브는 PDMS Stamping 방법으로 기판에서 들어 올릴 수가 있으며, 이를 High-k 유전체 실리콘 기판, 투명한 유리, 곡면 기판 그리고 휘어지는 플라스틱 기판과 같은 다양한 표면 위에 옮겨 놓을 수 있게 된다. 마지막으로 폴리머박막과 금박막을 적절한 Etching 공정을 통하여 제거시켜주면 다양한 기판 위에 고성능의 탄소나노튜브를 옮기는 과정이 완성된다.

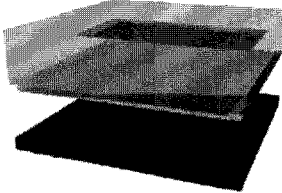
Nano Surface Transfer 기술을 이용하여 다양한 탄소나노튜브 Array 박막을 제작할 수 있다. 한 번의 Transfer 과정을 거치면 원하는 기판 위에 한 방향의 탄소나노튜브 Array를 구성할 수 있다. 또한 이러한 과정을 두 번, 세 번 반복하게 되면 여러가지 방향성을 갖는 탄소나노튜브 Array 박막을 다양한 기판위에 구현할 수 있게 된다. 이는 기존의 탄소나노튜브를 이용하여 1차원적인 전기소자를 만드는 것에서 벗어나, 2차원 또는 보다 고차원적인 탄소나노튜브 소자를 구현 가능케 하는 기술이다. 특히, 특정한 방



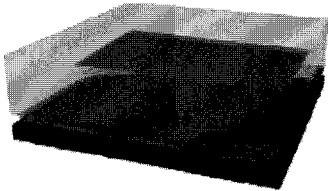
(a) Align SWNTs Arrays



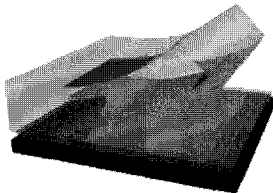
(b) Deposit Au & PI Layer



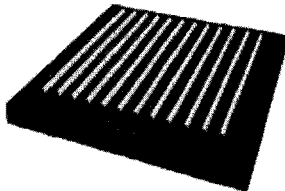
(c) Pick up Stamp From Donor Substrate



(d) Apply Stamp to Receiving Substrate

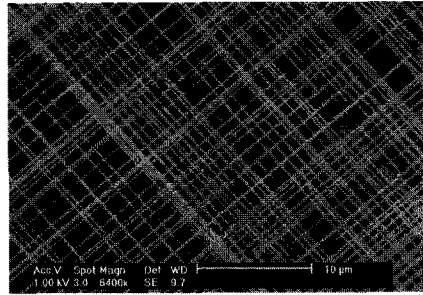


(e) Peel-back Stamp

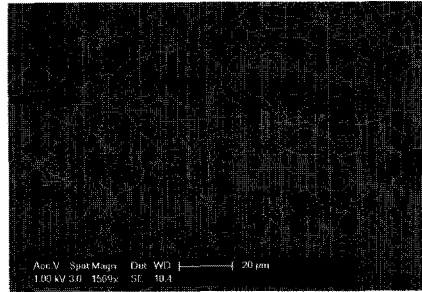


(f) Etch PI & Au Layer

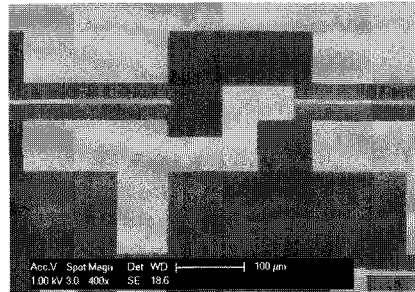
그림 6. Nano Surface Transfer 기술 개념도.



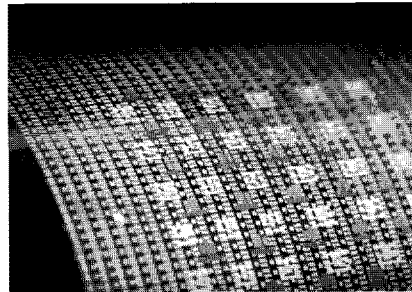
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 7. 2차원 탄소나노튜브 박막, 탄소나노튜브 Array와 Network의 복합구조체, 플라스틱 위에 구현된 Full 탄소나노튜브 전자회로 및 탄소나노튜브와 다양한 반도체물질과의 복합 Flexible 소자.

향의 탄소나노튜브의 밀도를 조절함으로써 전기적으로 Anisotropic한 특성을 부여한 탄소나노튜브 박막의 제작이 가능하여 다양한 전기, 화학적 센서에 응용이 가능하다. 기존의 탄소나노튜브 기술로는 고성능의 탄소나노튜브 소자를 휘어지는 플라스틱 기판과 같은 다양한 환경에서 구현을 할 수 없었지만, Nano Surface Transfer 기술을 이용하여 최근 Field Effect Mobility가 $\sim 500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 에 달하는 고성능의 트랜지스터가 플라스틱 위에서 구현되었다. 또한, 탄소나노튜브를 원하는 기판에 Transfer한 후 전기적인 특성을 제어함으로써 실제로 구동하는 CMOS Inverter와 PMOS Inverter가 구현되었다 (그림 8). 뿐만 아니라, 복잡한 Full 탄소나노튜브 전자회로를 한번에 다른 기판위에 옮기는 것이 가능하여 새로운 개념의 탄소나노튜브 응용소자를 개발하는데 핵심 기술이 되고 있다.

새로 개발된 Nano Surface Transfer 기술을 응용하여 탄소나노튜브 뿐만 아니라, 나노와이어, 유기물질, 그래핀과 같은 다양한 나노 신소재들을 원하는 위치에 제어할 수 있음이 후속 연구들을 통하여 밝혀지고 있다. 특히, U. C. Berkeley의 Ali Javey 연구팀은 최근 고성능의 나노와이어를 다양한 기판 위에 Transfer하여 배열함으로써, 그 결과를 2008년도 Nano Letters에 보고하였다. 이는 Nano Surface Transfer 기술의 무한한 응용 가능성을 입증하는 것이며, 새로운 나노 소재의 Electronics 뿐만 아니라, Optoelectronics, Sensor, Nanomechanical Systems, Microfluidics 등에 응용 가능한 기술로써 앞으로 차세대 유비쿼터스 기술의 핵심이 될 수 있음을 보인 것이다.

4. 향후 해결해야 할 과제

탄소나노튜브를 고성능의 전자소자 및 Flexible 소자로 응용하고자 하는 활발한 연구와 새로운 기술들이 개발됨에도 불구하고, 탄소나노튜브 전자소자의 상용화에는 아직도 많은 걸림돌이 있다. 탄소나노튜브의 실용화에 앞서, 탄소나노튜브의 전기특성을 제어할 수 있는 기술이 개발되어야 한다. 현재의

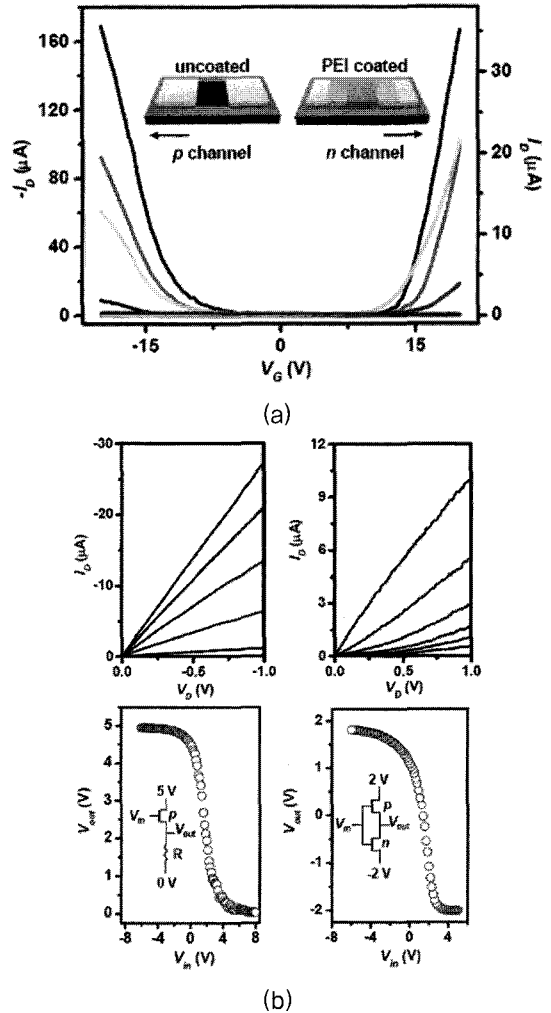


그림 8. 탄소나노튜브를 이용한 PMOS와 CMOS 인버터 회로.

기술로는 원하는 전기특성을 갖는 탄소나노튜브를 성장시키는 것은 매우 어렵다. 특히, Thermal CVD를 이용한 탄소나노튜브 성장법의 경우 반도체 특성을 갖고 있는 탄소나노튜브와 도체의 특성을 보이는 탄소나노튜브가 섞여 있어 이들을 분리하는 기술도 중요한 연구 분야이다. 따라서 탄소나노튜브의 구조 특성 및 전기특성 제어가 선행되어야만 비로소 탄소나노튜브 기술이 완성되어 실용화가 이루어 질 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] Guangyu Zhang, Pengfei Zi, Xinran Wang, Yuerui Lu, Xiaolin Li, Ryan Tu, Sarunya Bangsaruntip, David Mann, Li Zhang, Hongji Dai, Selective Etching of Metallic Carbon Nanotubes by Gas-Phase Reaction, *Science* 314, 974 (2006).
- [2] Zhihong Chen, Joerg Appenzeller, Yu-Ming Lin, Jennifer Sippel-Oakley, Andrew G. Rinzler, Jinyao Tang, Shalom J. Wind, Paul M. Solomon, Phaeton Avouris, And Intergrated Logic Circuit Assembled on a Single Carbon Nanotube, *Science* 311 (2006).
- [3] Jung Hoon Bak, Young Duck Kim, Seung Sae Hong, Byung Yang Lee, Seung Ran Lee, Jae Hyuck Jang, Miyoung Kim, Kookrin Char, Seunghun Hong, Yun Daniel Park, Hing-frequency micromechanical resonators from aluminium-carbon nanotube nanolaminates, *Nature Materials* 7, 459 (2008).
- [4] Hyeon-Jin Shin, Soo Min Kim, Seon-Mi Yoon, Anass Benayad, Ki Kang Kim, Sung Jin Kim, Hyun Ki Park, Jae-Young Choi, Young Hee Lee, Tailoring Electronic Structures of Carbon Nanotubes by Solvent with Electron-Donating and -Withdrawing Groups, *J. Am. Chem. Soc* 130, 2068 (2008).
- [5] S. J. Kang, C. Kocabas, T. Ozel, M. Shim, N. Pimparkar, M. A. Alam, S. V. Rotkin, J. A. Rogers, High Performance Electronics Using Dense, Perfectly Aligned Arrays of Single Walled Carbon Nanotubes, *Nature Nanotechnology* 2, 230 (2007).
- [6] Seong Jun Kang, Coskun Kocabas, Hoon-Sik Kim, Qing Cao, Matthew A. Meitl, Dahl-Young Khang, John A. Rogers, Printed Multilayer Superstructures of Aligned Single-Walled Carbon Nanotubes for Electronic Applications, *Nano Letters* 7, 3343 (2007).
- [7] Seong Jun Kang, Nano Surface Transfer Technique, *KRISS 사보* (2008).
- [8] Zhiyong Fan, Johnny C. Ho, Zachery A. Jacobson, Roie Yerushalmi, Robert L. Alley, Haleh Razavi, Ali Javey, Wafer-Scale Assembly of Highly Ordered Semiconductor Nanowire Arrays by Contact Printing, *Nano Letters* 8, 20 (2008).

저|자|약|력



성 명 : 강성준

◆ 학 력

- 1999년 연세대 물리학과 이학사
- 2001년 연세대 대학원 물리 및 응용물리 이학석사
- 2005년 연세대 대학원 물리 및 응용물리 이학박사

◆ 경 력

- 2005년 - 2007년 Univ. of Illinois at Urbana Champaign 연구원
- 2007년 - 현재 한국표준과학연구원 전략기술연구본부 나노측정센터 선임연구원

