

# 탄소나노튜브의 전자소자 응용

최 원 봉, 지 정 범\*

삼성종합기술원 · MD랩, (주)크레텍 기술연구소

이 논문은 탄소나노튜브의 전자소자 응용이라는 관점에서 최근의 연구동향과 실제적으로 응용이 되기 위해서 해결해야 할 이슈들을 정리하고자 하였다.

탄소나노튜브가 고해상도 투과전자현미경으로 1991년도에 발견된 이래로, 그 특유의 뛰어난 특성과 잠재되어 있는 차세대 소자로서의 응용가능성으로 인하여 큰 주목을 받고 있는 실정이다 [1]. 93년에 수십 편에 불과하던 논문발표 건수가 2001년에는 1500 여편에 달하고 있으며 특허건수만 해도 2100여건에 달하고 있다 [2]. 탄소나노튜브는 수nm~수백 nm의 직경과 함께 내부의 빈 공간을 지니는 1차원의 튜브형태로서, 성장되는 구조에 따라서 금속성, 반도체성을 지니게 된다 [3, 4]. 우수한 열전도성, 전자수송능력, 기계적 특성으로 이를 이용한 차세대소자 nanoelectronics [5], field emission display [6], hydrogen storage, fuel cell [7], supercapacitors [8], gas sensors [9] 및 STM 탐침으로서 그 응용이 기대되어진다.

특히 이 논문에서는 나노튜브의 응용과 소자를 실현화하기 위해서 해결해야 할 이슈들과 기능 소자로서의 응용 현황을 중점적으로 살펴보고 그 연구 방향을 제언하고자 한다.

## 1. 탄소나노튜브 합성 기술

Multiwalled nanotubes는 fullerenes을 arc discharge 방법에 의하여 제조할 때에 부산물로서 함께 나오던 것이었다. 기존의 arc discharge법에 의하여 제조되어지는 Multiwalled nanotubes는 그 양이 적은 실정이다. Singlewalled nanotubes 도 역시 arc discharge 법에 의하여 제조되어 지지만 촉매입자가 있어야 합성이 가능해진다. 사용되어지는 촉매는 Ni, Co, Fe 와 그의 합금이 사용되어오고 있다 [10,11]. 이 제조방법은 몇몇 작은 규모의 회사에서 탄소나노튜브 합성에 사용되어오고 있다. 1996년부터 Smalley 그룹에서는 양질의 single wall nanotube의 합성에 laser ablation 방법을 도입하고 있으며 대량합성법에는 HiPCO 방법을 사용하고 있으며 상업화를 추진 하는 것으로 알려져 있다 [12, 13]. 그림 1은 본 연구팀에서 제조한 singlewalled nanotubes,

multi walled nanotube의 투과전자 현미경사진을 보여주고있다. 탄소나노튜브의 구조는 graphene sheet를 원통형으로 감아져 있는 형태로서 직경은 singlewalled, multiwalled tube가 각각 수nm 에서 수십 nm 정도이며 길이는 수백 nm 에서 수백  $\mu$ m 정도이다. 탄소나노튜브는 graphene sheet가 감기는 방향에 따라서 armchair type, achiral armchair, zigzag nanotubes로 분류 되어 질 수 있다. 탄소나노튜브의 구조는 그림 2에서와 같이 graphene sheet에서 위치벡터  $T=na_1+ma_2$ 로 표기하면, zigzag tube (n,0)은 두 점의 위치 (0,0)과 (n,0)을 연결하여 감으면 만들어 진다. 탄소나노튜브는 감기는 방향 즉, chirality에 따라서 금속성이나 반도체성을 나타낸다. 즉, n m이 3의 정수배 이면 armchair type으로 금속성 이며 그 외에는 반도체특성을 나타내며, 에너지 밴드갭은 나노튜브의 직경에 반비례하는 것으로 알려져 있다.

## 2. 탄소나노튜브 트랜지스터 전망

다가오는 21세기 정보사회에서는 컴퓨터의 성능이 다양한 기능을 요구하고 있다, 즉, flexible, intelligent, mobile, programmable, real-time이 되어야 한다. 따라서 컴퓨터의 성능이 현재보다 초고속, 저전력이 되어야 한다 [14, 15].

반도체의 처리능력과 메모리 용량을 증가 시키기 위해서 실리콘 트랜지스터(field effect transistor)의 크기를 줄이는 고집적화 연구가 진행되어 오고 있다. 지난 10여 년간의 연구는 소자의 크기축소 연구와 축소로 인해서 발생하는 고 저항을 줄이기 위한 charge양 증가 연구로 진행되어 온 실정이다. 그러나, 트랜지스터 소자 축소에는 몇 가지 이유로 인해서 그 한계가 있다. 즉, (i) 짧은 채널길이에서 발생하는 high electric fields break down, (ii) 소자 고집적화에 따른 열 발생문제 (iii) 트랜지스터 off 상태에서의 quantum mechanical tunneling, (iv) 도핑영역의 불 균일성 (v) 얇아지는 gate oxide 층의 불균일성으로 인한 누설전류 등. 트랜지스터의 나노 크기의 채널에서 작동이 가능하려면 소자가 도핑에 의존하지 않고 quantum mechanical 한 원

리에서 동작이 되어야 한다. 앞으로의 컴퓨팅기술은 기존의 실리콘 기술에 나노튜브등이 접목이 되는 1단계와, 전혀 새로운 차원인 quantum computing과 같은 기술로 대체될 2단계로 나누어 진행 될 것으로 예상 되어 지고 있다.

탄소나노튜브는 큰 열방출특성, ballistic transport 특성, 전자수송능력 등이 뛰어나 차세대 반도체로 기존의 실리콘 트랜지스터에 접목되어 사용될 가능성이 매우 큰 재료이다. 1998년 처음으로 탄소나노튜브 트랜지스터가 발표 되어진 이래 IBM에서 기존 실리콘 트랜지스터보다 성능이 뛰어난 결과 즉, transconductance가 기존 실리콘 트랜지스터에 비해 4배 이상 높게 나온 결과를 발표한 실정이다 [16, 17]. 그림 3은 본 연구실에서 제작한 탄소나노튜브 Field Effect Transistor의 소자 사진과 그 특성 결과를 보여 주고있다. 음극의 게이트 전압에서 전류가 증가하고 양의 전압에서 완전히 off상태에 이르며,  $I_{on}/I_{off}$  비율이  $10^6$  이상이며 off 상태에서의 전류는 PA이하로 유지되었다. 현재까지의 전세계적인 연구 결과는 단위소자한 개를 작동시킨 결과이며 실제 디바이스로서 사용하기 위해서는 선택성장기술, 에너지 밴드갭 조절기술, 디바이스 architecture, 배선연결기술, integration등의 기술이 함께 해결되어야만 가능해 진다고 할 수 있다. 궁극적으로는 탄소나노튜브의 chirality를 조절하여 에너지 밴드갭을 완벽하게 제어할 수 있어야 하며, 탄소나노튜브 한 개를 원하는 위치에 선택적으로 부착시킬 수 있는 자기조립 기술(self assembly)이 개발되어야 할 것이다.

그림 4는 본 연구팀이 개발한 수직 탄소나노튜브 어레이로서 패터닝에 의하여 선택성장이 가능한 기술이다. 알루미늄의 산화에 의하여 산화알루미늄이 형성이 되고 이때 용액의 종류, 온도, 바이어스등을 조절하여 구멍의 크기, 길이 등을 조절한다.[18] 탄소나노튜브는  $CH_4$ ,  $C_2H_2$  등의 개스를 thermal CVD (chemical vapor deposition)에 의해 분해시키고 나노 템플레이트의 구멍속에서 탄소나노튜브가 성장이 되도록 한다. 상·하의 위치에 소스, 드레인 전극을 부착시키고 게이트 전극을 탄소나노튜브 부근에 위치하도록 하여 수직 탄소나노튜브 트랜지스터를 제작하게 된다.

탄소나노튜브는 p type으로 알려져 있으나 최근의 표면 흡착 연구에서 표면의 조건에 따라서 p type에서 n type으로 변형이 가능하다고 알려지기 시작하였다. 탄소나노튜브의 표면에 산소, potassium등의 처리에 따라서 n type으로 변형이 되고 p type, n type을 결합하여 logic gate디바이스를 구현하여 발표하였다 [19]. 소스를 분해 시켜서 탄소나노튜브의 표면에 부착되게 하면,  $sp^3$  구조를 지니게 되어 금속성 나노튜브를 반도체로, 작은 에너지 갭의 반도체를 큰 에너지갭의 반도체로 변형이 가능함을 발표하였다 [20].

### 3. 기타 기능소자 응용

탄소나노튜브는 나노 크기의 특징 및 뛰어난 기계적 특성을 이용하여 여러 종류의 나노 디바이스에 응용이 가능하다. 탄소나노튜브의 Elastic moduli는 1-2 TPa, fracture strains 10-30%, ultimate tensile strength 30-180 GPa로 알려져 있다[21]. 이러한 우수한 기계적 특성을 이용하여 기존의 STM에 사용되는 Si tip의 끝에, 탄소나노튜브를 부착시켜 해상도를 향상시키고 tip의 내마모성을 증가시킬 수 있다 [22]. 높은 전자방출 특성을 이용한 평판디스플레이의 응용도 연구되고 있으며 실용화를 위한 나노튜브 배열기술, 대면적기술, 패키징기술등이 해결되어야 한다 [23]. 폴리머에 탄소나노튜브를 혼합하여 전기전도도를  $10^8$  이상 향상시키고 다른 특성을 열화현상에 의해 손상 되는 것을 방지 할 수가 있다. 이는 나노튜브가 나노크기 수준의 열싱크로서 작용을 하여 복합재료를 손상시키는 열을 효과적으로 제거하는 역할을 하기 때문으로 해석 되어진다. [24] 강화재로서의 탄소나노튜브 복합재료는 특성이 우수한 것으로 보고 되고 있지만 가격이 아직은 비싸기 때문에 구조용 재료로서는 대량합성 기술이 발전해야 가능하리라고 보여진다. 기술적으로는 탄소나노튜브의 균일한 분산, 재료에 인가되는 하중을 효과적으로 분산시키기 위한 기지재료와의 결합성 등의 기술이 개발되어야 한다.

탄소나노튜브의 resonance frequency를 이용하여 나노입자가 부착하였을때 진동의 차이를 측정을 하면 femtogram 크기의 무게를 측정 할 수 있다 (그림 5)[25]. 탄소나노튜브를 이용한 나노집계를 만들어 나노크기의 물질을 이동시킬 수 있다는 연구결과가 보고되었다 [26]. 이 결과에 의하면 두 개의 나노튜브를 각각 급속이 패팅 되어진 유리막대에 부착시키고 바이어스를 가하면 두 나노튜브 사이에 끌어당기는 전기적인 힘이 가해져서 입자를 집어서 이동 할 수 있다는 것이다 (그림 6). 또한 나노튜브의 고강도, 내마모성을 이용하여 나노 베어링이나 나노 스프링으로의 응용이 가능하다는 것이 보고되었다 [27]. 탄소나노튜브 wall 사이에 van der Waals 힘이 작용을 하여 반복적인 운동에서도 구조에는 변형이 없으며 마찰력이 없이 작동이 가능하다고 하였다 (그림 7)

탄소나노튜브의 가스 센서로 응용이 가능함이 보고되었다. Dai 그룹에서는 개개의 탄소나노튜브의 전기전도성이 흡착되는 개스에 의해서 급격히 변화를 하고 전도되는 carrier 의 형태도 바꾼다고 보고되었다 [28]. 예를 들어 질산개스에 의해 전기전도도가 1000배 증가하였으나, 반면에 암모니아 가스 분위기에서는 감소하였다. 반응응답 속도가 매우 느리고 회복속도도 느리기 때문에 나노튜브가 가스 센서로서 실용화하기 위해서는 연구가 지속 되어야만 한다.

이상에서는 탄소나노튜브의 nanoelectronics 및 기타 전자소자의 응용에 대해서 살펴보았다. 나노코기의 장점과 탄소나노튜브만의 우수한 기계적, 전기적 특성을 이용한 소자 응용에 대해서 그 가능성이 발표 되어지고 있는 실정이다. 실용적으로 사용되기 위해서는, 소자의 integration 측면에서 세부 기술을 살펴보고 해결해야 할 문제들을 하나하나 연구를 해 나아가야 할 것이다. 따라서 현재 기술이 (예를 들어 실리콘을 기반으로 하는 반도체 기술) 정제기에 들어서기 전에, 새로운 차원의 나노 디바이스가 준비가 되어 고기능, 고성능, 초고집적의 소자가 구현 되어야만 새로운 기기의 요구에 부응할 수 있다고 할 수 있을 것이다.

### 참고문헌

1. B.I. Yakobson and R.E. Smalley, American Scientist 85, 324 (1997).
2. Ray H. Baughman, Anvar A. Zakhidov, Walt A. de Heer, Science 297 787 (2002).
3. Saito R., Fujita M., Dresselhaus G., Dresselhaus M. S. Appl. Phys. Lett. 60, 2204 (1992).
4. Wildoer J.W.G. et al. Nature 59, 391 (1998).
5. Tans, S. J.; Devoret, M. H.; Dai, H.; Thess, A.; Smalley, R. E.; Geerlings, L.J.; Dekker, C., Nature 386, 474 (1997)
6. W.B. Choi, D. S. Chung, J.H. Kang, H.Y. Kim, Y.W. Jin, I.T. Han, Y.H. Lee, J.E. Jung, N.S. Lee, G. S. Park, and J.M. Kim, Appl. Phys. Lett. 75 3129 (1999).
7. Chunming N., Appl. Phys. Lett 70 1480 (1997)
8. Niu, C.; Sichel, E. K.; Hoch, R.; Moy, D.; Tennent, H., Appl. Phys. Lett., 70, 1480 (1997).
9. Kong, J; Franklin, N. R.; Zhou, C.; Chapline, M. G.; Peng, S.; Cho, K.; Dai, H., Science 287, 622 (2000).
10. S. Iijima and T. Ichihashi, Nature 363, 603 (1993).
11. D. S. Bethune, C. H. Kiang, M. S. de Vries, G. Gorman, R. Savoy, J. Vasquez, and R. Beyers, Nature 363, 605 (1993).
12. Thess, A.; Lee, R.; Nikolaev, P.; Dai, H.; Petit, P.; Robert, J.; Xu, C.; Lee, Y. H.; Kim, S. G.; Rinzler, A. G.; Colbert, D. T.; Scuseria, G. E.; Tománek, D.; Fischer, J. E.; Smally, R. E. Science 273, 483 (1996).
13. Nikolaev, P.; Bronikowski, M. J.; Bradley, R. K.; Rohmund, F.; Colbert, D. T.; Smith, K. A.; Smalley, R. E., Chem. Phys. Lett. 313 (1999) 91.
14. David Goldhaber-Gordon, The proceedings of the IEEE, April 1997.
15. Paul S. Peercy, Nature 406 1023 2000.
16. R. Martel, T. Schmidt, H. R. Shea, T. Hertel, and Ph. Avouris, Appl. Phys. Lett. 73 2449 (1998).
17. S.J. Wind, J. Appenzeller, R. Martel, V. Derycke, and Ph. Avouris, 80 3817 (2002).
18. Won Bong Choi, Ju-Jin Kim, Jae Uk Chu, Kwang Seok Jeong, Eun Ju Bae, Jeong-O Lee, and Jo Won Lee, Appl. Phys. Lett. 79, 3696 (2001)/ Adv. Func. Mat. 2002 (in press).
19. A. Bachtold, P. Hadley, T. Nakanishi, C. Dekker, Science 294 1317 (2001).
20. Keun Soo Kim\*, Dong Jae Bae\*, Jae Ryong Kim, Kyung A Park, Kwan Goo Jeon, Seong Chu Lim, Joo Jin Kim, Won Bong Choi, Chong Yun Park, & Young Hee Lee, Appl. Phys. Lett. (in submission).
21. C.E. Harris, et al., NASA/TM 2001-210844, April 2001.
22. Dai, H.; Hafner, J. H.; Rinzler, A. G.; Colbert, D. T.; Smalley, R.E. Nature 384, 147 (1996).
23. Won Bong Choi, Young Hee Lee, Nae Sung Lee, Jung Ho Kang, Sang Hyeun Park, Hoon Young Kim, Deuk Seok Chung, Seung Mi Leel, So Youn Chung and Jong Min Kim, Jpn. J. Appl. Phys. Vol.39 Part 1, No. 5A, May 2560-2564 (2000).
24. M.J. Biercuk, APL 80 2767 (2002)
25. Poncharal, P.; Wang, Z. L.; Ugarte, D.; de Heer, W. A., Science, 283, 1513 (1999).
26. Kim, P.; Liber, C. M., Science 286, 2148 (1999).
27. Cumings, J.; Zettl, A., Science 289, 602 (2000).
28. Kong, J; Franklin, N. R.; Zhou, C.; Chapline, M. G.; Peng, S.; Cho, K.; Dai, H., Science, 287, 622 (2000).

저자소개



《최원봉》

- 한양대급속공학과학사('86졸), 석사('88졸)
- 1988년~1993년 국방과학연구소 연구원
- 1997년 (미)노스캐롤라이나 주립대 재료공학박사

- 1997년~1998년 (미)노스캐롤라이나 주립대 박사후 연구원
- 1998년~현재 삼성종합기술원 Materials & Device 랩 전문연구원
- 2000년 6월 현재 나노소자사업단 탄소나노튜브 과제 연구책임자
- 연구실적 : 나노소자 및 재료관련 국외논문 50여편, 특히 30여건
- 탄소나노튜브 Field Emission Display 개발, 탄소나노튜브 초고집적 수직 트랜지스터 개발 등
- E-MAIL : wbchoi@sait.samsung.co.kr
- 주소 : 경기도 용인시 기흥읍 농서리 삼성종합기술원



《지정범》

- 1978년~1982년 서울대 기계공학과 학사
- 1982년~1984년 KAIST 기계공학과 석사
- 1984년~1987년 대우전자(주) 영상연구소

- 1987년~1991년 독일 Aachen 공과대학 기계공학과 박사
- 1989년~1995년 대우전자 중앙연구소 책임연구원
- 1996년~현재(주) 크레텍 기술연구소 연구소장



학회발간 논문집 재고정리 안내

회원님 귀중  
안녕하십니까.

회원 여러분의 발전과 행운을 기원합니다. 우리 학회에서는 학회의 학술사업을 더욱 활성화하고 회원님들께 보다 충실한 서비스를 제공하기 위하여 최선의 노력을 하겠습니다.

이번에 우리 학회는 출판물 재고정리를 하고자 하오니 아래 목록을 보시고 필요하신 논문집이 있으시면 신청하여 주시기 바랍니다.

<목 록>

- ◎ 제어·자동화·시스템 공학 논문지 : 권당 2,000원
- ◎ Transaction on Control, Automation and Systems Engineering : 권당 2,000원
- ◎ ISIE2001(3권) : 권당20,000원(총60,000원)
- ◎ KACC('95년-2000년) : 권당 20,000원
- ◎ ICCAS CD(2002년) : 개당 60,000원

-자료 요청시에는 먼저 재고가 있는지 확인해 주신 후

- 1) 수신자명
- 2) 우편번호
- 3) 주소
- 4) 해당자료 권 호(행사명,연도)
- 5) 연락처를 명기하여 연락해 주십시오.

<연락처>

E-mail: finance@icase.or.kr  
Tel: 02-508-5801  
Fax: 02-555-4746