

특 집

탄소나노튜브의 전자소자 응용

신진국, 이재은, 한영수, 윤상수, 정민재, 김성태

LG 전자기술원 나노테크그룹

I. 서론

1991년 Iijima에 의해 탄소나노튜브가 발견되었고, 1998년 탄소나노튜브의 전계효과 트랜지스터(FET) 특성이 보고되었다. 합성이라고 불릴만한 공정은 최근 2년 반 사이에 확립되었으며, 최근 일본은 프론티어 카본 프로젝트의 일환으로 tonnage production을 연구중이고, bench scale의 continuous reactor가 보고된 바 있다.^[1] 탄소나노튜브에 대해 많은 기대와 우려들이 있는 것은 사실이다. 그 중에서 가장 큰 문제는 두 가지라 할 수 있다. 첫 번째는 탄소나노튜브의 형성기구에 대한 이해가 부족하다는 것이다. 경험으로 얻은 공정 조건만이 알려져 있을 뿐이며, 경험 법칙은 장비의 독특한 성질을 포함하고 있어 장비마다 그 공정 조건이 다르다는 문제를 안고 있다. 또한 가지 문제는 적당한 응용처를 아직까지 찾지 못하고 있다는 것이다. 전계방출 디스플레이(FED)와 냉음극관, 수소저장, AFM-tip 등의 분야에서 그 잠재력이 탐색되고 있지만 아직 시장을 열 수 있을 정도의 결과와 아이템은 보이지 않는다. 시장을 형성하지 못하면 그 분야는 역사 속으로 사라져 가기 마련이다. 이것이 다소 냉정하기는 하지만 탄소나노튜브가 처해 있는 엄연한 현실이다.

그러나, 현재 선진국들이 미래를 열 수 있는 기술 중의 하나로 나노테크를 인식하고, 여기에 큰 잠재력을 부여하고 있는 점은 결코 우연이 아니다. 미국이 4억 9천만달러를 투자한다는 것은 잘 알려져 있는 사실이며, 실제 미국은 光通信, 바이오, 나노의 세 가지 화두로 움직이고 있다. 독

일과 일본도 '프론티어'나 '나노세계의 혁명' 등의 프로젝트를 통하여 나노분야 연구를 진행 중이다.^[2] 이러한 나노테크의 중요한 한 범주로서 나노튜브가 있다.

나노튜브는 물질 자체로 나노 크기이며, 다른 물질에 비해 독특한 성질을 가지고 있다. 비록 그 연구의 역사는 짧지만, 큰 잠재력으로 볼 때 결코 간과할 수 없는 분야이다. 탄소나노튜브의 발견이후로 세계 각 국에서 많은 연구가 이루어졌으나, 한국의 연구 역사는 2년 반 정도라고 보는 것이 옳다. 우선, 탄소나노튜브가 주목받는 이유에 대해서 알아보는 것이 탄소나노튜브 연구를 이해하는데 도움이 될 것이다. 탄소나노튜브가 가장 주목받는 이유는 물질 자체로 나노 크기를 가져 나노소자의 building block이 될 수 있다는 점과 그 크기가 양자역학의 지배를 받는 영역이라는 점, 그리고 탄소나노튜브의 구조(diameter, chirality)에 따라, 금속과 반도체의 성질을 가진다는 점이다. 최근에는 C₂₀ dodecahedron의 fullerene에서 직경 4Å의 탄소나노튜브가 생성될 수 있음이 알려져, 탄소나노튜브가 현존하는 물질 중 나노세계에 가장 가까이 있는 소재임에는 틀림없다.

나노튜브의 합성 기술이 케도에 오르기도 전에 제안된 탄소나노튜브(CNT)의 FED 응용 시도는 탄소나노튜브를 널리 인식시키는데 일조를 하였다. 원리적으로 가장 완벽한 디스플레이로 평가되는 음극관(CRT)과 이 CRT와 같은 원리에서 출발한 FED, 그리고 꿈의 소재라는 CNT가 결합되었다는 사실 하나만으로도 많은 주목을 받았다. CNT-FED는 CNT를 기판에 수직하게 성장시키는 수직성장 기술의 모태가 되었으며,

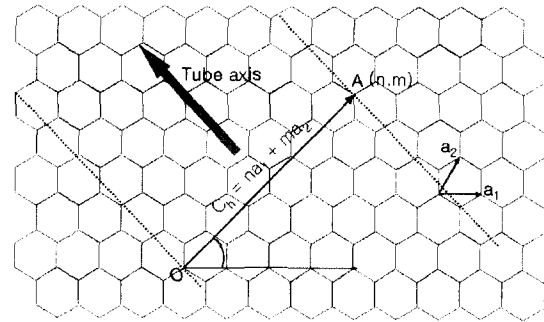
paste법은 나노튜브의 양산의 구동력이 되었다. 또, 수소저장을 둘러싼 나노튜브의 전기 화학적인 응용 분야와 NASA를 중심으로 이루어지고 있는 CNT 복합재에 대한 시도도 CNT 대량 생산의 강력한 구동력이 되고 있다. 아울러, 일본의 ISE 전자에서 발표된 CNT 램프는 실내조명, 교통신호등 등의 분야에서 나름대로의 가능성을 탐색하고 있다. 전자파 차폐(EMI)로의 응용가능성도 많이 거론되고 있다.

이상과 같은 나노튜브의 여러 가지 잠재력으로 볼 때, 이제 디스플레이, 에너지 저장, 조명이외의 분야에서 CNT의 응용 가능성을 제안하고 탐색할 시기가 되었다. 본 고에서는 전자소자의 관점에서 나노튜브의 현 주소를 짚어보고자 한다. 그 중에서도 특히 트랜지스터 구현과 휘발성, 비휘발성 메모리에 대한 부분을 중점적으로 논의하고자 한다.

II. 탄소나노튜브의 탄생과 물성

흑연 기저면에서 탄소의 sp^2 결합은 다른 어떤 결합보다 단단한 결합이지만, 면간 사이의 결합은 매우 약한 결합을 갖고 있다. 이러한 흑연구조의 이방성은 전기 및 열전도도에서 나타나게 된다. 즉, 면 방향으로서는 우수한 전기전도도와 열전도도를 갖는 반면, 면의 수직 방향으로서는 나쁜 전도 특성을 갖는다. 이러한 면상의 우수한 특성만을 이용하고자 했던 것이 탄소섬유였지만, 기존에 제작되었던 탄소섬유는 그 구조의 불완전성으로, 계산된 이론값을 갖지 못했다. 1991년 결합이 거의 없는 완벽한 구조의 CNT가 발견되었을 때, 초강도 및 초전도성 탄소섬유로의 이용은 당연한 결과였다.

sp^2 결합만으로 이루어진 CNT의 기계적 특성은 간단히 말해 가벼우면서도 단단하고 부러지지 않는 재료라 할 수 있다. 실험적으로 100~150 GPa의 압축강도를 보였으며, 영률은 수 TPa의 값을 나타내었다. 전기 및 열전도도를 실험적으



〈그림 1〉 (n, m) 나노튜브를 펼쳐놓은 모양

로 측정하려는 시도가 이루어졌고, 매우 우수한 전도 특성이 확인되었다. 이외에도 매우 큰 중형비의 구조적 특성, 탄소계 물질의 특성인 화학적 안정성, 생체친화성을 가져 많은 응용분야가 기대되고 있다.

탄소나노튜브의 구조는 하나의 흑연 면을 둥글게 말아놓은 구조로, 흑연 격자 위의 두 점을 연결하는 chiral vector(Ch)로 표시된다. 임의의 원점(O)을 벡터의 시작점으로 하고, 둥글게 말았을 때 원점과 접하게 되는 지점을 벡터의 종점(A)으로 chiral vector는 다음과 같이 표시된다(〈그림 1〉).

$$C_n = n a_1 + m a_2 (a_1, a_2 : \text{unit vector})$$

탄소나노튜브는 chiral vector의 지수 (n, m)으로 표시하며, 그 직경과 chiral angle은 다음식에 의해서 결정된다.

$$d = \sqrt{3} a_{c-c} (m^2 + mn + n^2)^{1/2} / \pi$$

$$\theta = \sin^{-1} (3m / (n^2 + nm + m^2))^{1/2} / 2$$

여기서 a_{c-c} 는 탄소와 탄소사이의 결합거리이며 흑연에서는 1.421Å, C_{60} 에서는 1.44Å의 값을 갖는다. 탄소나노튜브에서는 대략 1.4Å 정도이며, 나노튜브 직경에 따라 약간의 차이가 있다. chiral angle은 단위 vector a_1 과 chiral vector 사이의 각이며, 나노튜브의 chirality를 나타내며, (n, 0) 구조의 나노튜브는 chiral angle이 0°이고 튜브 끝의 모양에 따라 zigzag tube라 하고, (n, n) 구조는 30°의 chiral angle을 갖는 armchair tube라 한다. 그 이외의 나노튜브는

일반적으로 chiral tube로 분류한다. 이렇게 한 개의 흑연 면으로 이루어진 것이 홑겹나노튜브(SWNT)이고, 여러 겹의 흑연 면이 하나의 중심 축으로 말린 것이 다겹나노튜브(MWNT)이다. MWNT의 경우, 각 wall 사이의 거리는 3.4Å으로 흑연에서의 면간 거리와 같다.

탄소나노튜브의 전기적 물성은 나노튜브의 직경(d)과 chiral angle(θ)에 따라 민감하게 달라진다. SWNT의 전자구조는 전기적으로 2차원적 구조를 갖는 흑연 구조를 기본으로 하고, 나노튜브의 축 방향만을 고려한 1차원적 전기구조를 도입하여 이론적으로 계산할 수 있다. 이 계산에 의하면, (n, m) 의 지수에 따라 금속성을 갖는 나노튜브와 반도체성을 갖는 나노튜브로 분류되며, 반도체 나노튜브의 경우 에너지 갭은 그 직경에 반비례하여 나타난다. 이를 정리하면, 다음과 같다.

- $n-m=0$: armchair, metallic
- $n-m=3i$: 작은 밴드갭 반도체 ($\propto 1/R^2$)
- $n-m=3i$: 큰 밴드갭 반도체 ($\propto 1/R$)

MWNT의 전자구조는 최외각 겹질의 특성에 의해 결정된다. 탄소나노튜브의 반경이 커질수록 밴드 갭이 작아지기 때문에, 직경이 큰 대부분의 MWNT의 경우 지수 (n, m) 에 상관없이 금속으로 간주할 수 있다. 실험적으로 많이 합성되고 있는 단겹 나노튜브의 경우 그 이론적 계산치를 살펴보면, $(9, 0)$, $(5, 5)$ 나노튜브의 직경은 약 7.2Å, $(18, 0)$, $(10, 10)$ 는 약 14Å이고, $(5, 5)$, $(10, 10)$ 은 armchair tube로 금속의 특성을 가지며, $(9, 0)$, $(18, 0)$ 은 반도체성으로 각각 0.08eV, 0.004eV의 밴드 갭을 가진다.

이러한 탄소 나노튜브의 전송 특성에 대하여 간단히 살펴보자. 흔히 고체에서의 전송 특성은 페르미 액체에 의해 설명된다. 고체 내에서 상호 작용하는 전자들의 움직임을 준알갱이의 들뜸으로 설명한 Landau의 이론은 페르미 에너지 근처에서 의외로 잘 들어맞는다. 하지만, 저차원으로 내려오면 입자들의 움직임에 대한 기하학적인 제한 때문에 이러한 들뜸이 존재할 수 없고, 대신 플라즈몬 형태 같이 갭 없는 기본 들뜸만이 가능

하게 된다. 이러한 결과로 터널링 전기전도도의 감소에 의한, power-law 의존성이 예측이 되고, '스핀-전하 분리'같은 재미있는 현상들이 예상되어진다. 이러한 형태를 Luttinger liquid (LL)라고 하는데, 약간의 결합이나 무질서가 있어도 1차원적인 효과가 가려지기 때문에, 그동안 간접적인 증거들만 보여져 왔다.

탄소나노튜브는 지름이 수~수십nm이고, 길이가 수십 mm까지 가능한 물질이면서, 축을 따라 움직이는 전자의 전도 특성이 아주 좋은 양자선 임이 전기적 특성 실험을 통해서 밝혀졌다. 비록 튜브와 전극간의 높은 접촉 저항 때문에 나노튜브 자체의 특성을 파악하는데 어려움이 있는 것은 사실이지만, Bockrath 등은 상전극부착법과 하전극부착법 모두에서 전기전도도의 온도의존성이 repulsive coulomb interaction을 갖는 LL에 의해 이론적으로 예측된 power-law 거동과 잘 들어맞음을 보였다.

한편, 나노튜브 안으로 전자가 뛰어들기 위해서는 분자의 charging 에너지를 넘어서야 하는데 열에너지보다 이 charging 에너지가 더 큰 저온영역($<10K$)에서는, 전기전도도가 게이트 전압이 증가함에 따라 charging에너지의 정수배가 될 때마다 증가하는 Coulomb oscillation 결과를 보여준다. 이는 전극과 튜브간의 높은 접촉 저항 때문인데, 최근에 Dai는 SiO₂ 기판 위에서 형성된 촉매섬 패턴 사이에서 CVD법으로 small gap SWNT(지름 $\cong 1.3nm$)를 키움으로써 이러한 효과를 제거하였고, 양자저항($R_0 = h/e^2 \sim 26k\Omega$)과 같은 크기의 작은 저항을 갖는 나노튜브 자체의 전송 특성 연구로 나아가고 있다.

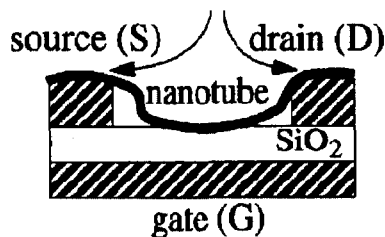
III. Nanotube Electronics

나노튜브는 1차원 도체 또는 반도체의 특성을 지니고, 접촉저항 및 나노튜브의 길이에 따라 다양한 물성을 보인다. 응용의 측면에서 볼 때, 작은 크기와 빠른 동작, 적은 에너지 손실로 특징지

워지는 나노소자로서의 가능성을 내포하고 있으며, 나노 재료의 기본물성 연구에도 적합한 시스템이다.

1. 전계효과 트랜지스터(FET)

상온에서 탄소 나노튜브를 이용한 Field-effect transistor(FET)는 이미 많은 실험과 보고가 이루어졌다. 탄소 나노튜브를 이용한 FET의 단면도를 <그림 2>에 나타내었다. 탄소 나노튜브의 양단에 금속전극을 붙이고 Si 기판을 gate로 사용하였다. gate 지배력을 높이기 위한 방안으로 나노튜브 위에 절연체를 증착하고 그 위에 gate 전극을 붙이는 방법과 나노튜브의 좌우에 gate전극을 붙이는 방법, 및 나노튜브를 수직으로 교차시켜서 그 중 하나를 gate로 이용하는 등 다양한 방법이 시도되고 있다. 최근에 Delft^[3]와 IBM 그룹^[4]에서 탄소 나노튜브를 이용한 FET가 보도되었다. 고정된 gate 전압 V_G 에 대하여 드레인 전류 I_D 대 드레인 전압 V_D 곡선은 상용화된 MOSFET에서 보이는 것과는 달리 특별한 포화영역을 보이지 않았다. 반면, MOSFET와 달리 IBM 소자의 경우 고정된 V_D 에서 I_D 대 V_G 는 포화되었다. 포화가 없는 $I_D(V_D)$ 는 전하들이 매우 가늘고 긴 채널을 전자-전자 산란을 거치지 않고 drain으로 도달할 수 있다는 것을 의미한다. 상온에서 $0.3\mu\text{m}$ 정도의 긴 채널을 산란하지 않는다는 것은 모순되는 것처럼 보이지만, 이러한 ballistic한 수송현상은 공중에 띄어져 있는 $1\mu\text{m}$ 의 긴 거리에서도 전도의 양자화가 이미 관측되었다. 하지만 위의 두 소자는 ballistic하지 않다. 양자전도도 $\sigma_Q=2e^2/h$



<그림 2> 실리콘을 Back-gate로, 탄소나노튜브를 채널로 사용한 전계효과 트랜지스터

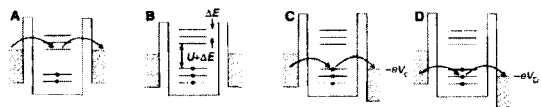
(e : 기본 전하량, h : 플랑크 상수)보다 두 자리 수가 작은 전도도를 가지는데 나노튜브가 기판 위에서 불순물이나 결함, 휘어짐, 찌그러짐 등에 의해 기인한다. 중시계에서는 이를 약국소화라고 한다. 나노튜브를 공중에 띄울 수 있으면 ballistic하게 할 수 있다. 실험에서 $V_{\text{gate}} < 0$ 인 경우 전류-전압 특성 곡선이 거의 변하지 않았으나 $V_{\text{gate}} > 0$ 인 경우에는 수송전류가 감소한다. 전도가 정공에 의해 일어남을 알 수 있고 $V_{\text{gate}} = 6\text{V}$ 에서 carrier가 거의 사라지는 일반적인 반도체에서 나타나는 p형 반도체의 depletion 현상이 보인다. 정공의 밀도는 약 $9 \times 10^6/\text{cm}^2$ 로 추산된다. 이는 흑연의 경우보다 매우 크다. 정공의 mobility는 약 $20\text{cm}^2/\text{Vs}$ 로 흑연인 경우보다 작게 나타났는데 이는 산란에 의한 효과인 것으로 추측된다. 일반적으로 정공에 의해 수송현상이 나타나는 것이 탄소 나노튜브의 고유한 성질처럼 보이기도 하는데 칼륨 doping을 통해서 n형 반도체가 될 수 있음이 최근에 보고되었다.^[5] 도핑 전에 페르미 레벨이 band gap에서 valence band로 이동한 일반적인 p형을 보였는데 도핑 후에 페르미 레벨이 칼륨에 의한 전자의 제공에 의해 conduction band 근처로 이동하였다. 이로써 탄소 나노튜브는 p형 transistor 뿐만 아니라 n형 transistor가 가능함이 보여졌다.

2. 단 전자 소자(SET, SEL)와 공명 소자(RTD)

금속 전극과 나노튜브 사이의 접촉을 통과할 수 있는 정도를 나타내는 확률을 P (transmission probability)라 한다. P 값이 1보다 매우 작을 때 Coulomb blockade가 나타나며 격리된 1차원의 양자점처럼 행동한다. Tans 등은 Si/SiO₂ 기판위에 백금 전극을 미리 증착시킨후 SWNT를 증착하였다. 탄소 나노튜브와 백금 전극 사이의 접촉저항은 상온에서 $0.3 \sim 1\text{M}\Omega$ 로 나타났다. 나노튜브와 접촉하고 있는 두 전극을 이용하여 bias 전압 V_{bias} 를 걸고 gate 전압 V_{gate} 을 걸어준 뒤 gate 전압의 변화에 따른 전류-전압 특성을 조사하였다. V_{bias} 가 0 근처에서 V_{gate} 의 gap이 변하는 데 이는 Coulomb charging에

의한 것이다. 전압 gap이 나타나고 전압이 증가함에 따라 전류가 계단식으로 증가한다. V_{bias} 를 $30\mu V$ 로 고정시킨 후에 V_{gate} 를 변화시키면 Coulomb blockade가 나타난다. Coulomb blockade 현상은 접촉저항이 양자저항 ($R_0 = h/e^2 \sim 26k\Omega$)보다 크고 대상 물체의 정전용량 C 가 아주 작아서 전자 하나를 더하는데 필요한 충전 에너지 $U = e^2/2C$ 가 충분히 클 때 나타난다. V_{bias} 가 증가함에 따라 bias 범위 내로 들어오게 되는 나노튜브의 빈 에너지 상태가 증가하게 됨으로 전하 수송이 가능하게 되어 전류가 계단식으로 증가한다. 두 전자들 사이의 평균 반응정도인 충전 에너지 U 와 에너지 레벨의 간격 ΔE 는 튜브의 일부분인 effective length (L)에 의해 결정되고 접촉 간격과 같다. V_{gate} 에 의하여 나노튜브의 포텐셜이 변하게 되는데 전류 peak은 나노튜브의 전자가 비어있는 가장 낮은 에너지 준위와 전극의 페르미 레벨이 일치하는 경우에 해당되고 단전자들이 전극사이를 공명 터널링하게 됨을 의미한다. 이와 같은 gate 전압에 따른 전기전도도 특성을 이용하여 single electron transistor (SET)를 구성할 수 있다.

여러 개의 SET를 구성할 때 dot-to-dot을 평행하게 위치시켜 parallel-coupled계를 구성하는 데 대부분의 경우 둘중 하나를 다른 쪽의 포텐셜 변화를 감지하기 위한 electrometer로 활용한다. 이 목적을 위해서 둘 사이의 coupling은 약하게 한다. 이 때 결합된 SET는 한 개의 SET에서 보이는 수송특성을 동일하게 된다. 하지만 coupling이 강해지면 동시 터널링이 추가 되는 영역과 순차적 터널링이 추가 되는 영역이



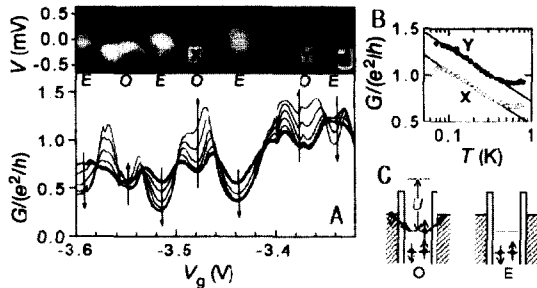
<그림 3> Coulomb Blockade를 설명하기 위한 에너지 레벨모식도 : (A) Coulomb peak에서 linear-response ($V=0$) 전도가 가능하다 ; (B) peak 사이에서 linear-response 전도가 blockade 화되어 있다 ; (C&D) 서로 다른 bias 전압 ($V_D > V_C$)에서 각각 첫 번째와 두 번째 점유된 상태를 통해 전도가 일어난다.

생기게 되고 서로 다른 결과를 가진다. 이 커플링을 이용하여 single electron logic (SEL) 소자를 구성할 수 있다.^[6]

게이트 지배력을 생략하면 resonant tunneling diode (RTD)를 구성할 수 있다. RTD는 상온에서 negative differential resistance (NDR)와 매우 빠른 동작속도를 갖는다. 이를 이용하면 복수의 값을 가지는 논리소자, analog-to-digital 변환기, 고주파 발진기를 제작할 수 있다. 또한 p-n 접합의 이중 장벽을 이용한 resonant tunneling light emitting device (RTLED)의 경우 매우 빠른 스위칭 속도를 가지는 발광소자를 제작할 수 있다.^[7]

3. Kondo resonance와 Fano resonance

통과 정도 계수인 P 값이 1에 가까울 경우 온도가 1K 이하에서 조차 확산성의 1차원 전선의 전도 특성을 보인다. P 값이 0과 1의 중간 영역에서는 접촉장벽이 그다지 크지 않은 영역으로 1차원 양자점에서 보이는 Kondo 효과가 탄소 나노튜브에서도 나타난다.^[8] 전기전도도 G 는 저온에서 gate 기관의 전압 V_{gate} 가 변함에 따라 큰 fluctuation을 가진다. <그림 4>에서 이 fluctuation의 극소점들의 값이 온도가 감소하면서 G 가



<그림 4> V_{gate} 에 의한 전도도의 온도의존성 : (A) $T = 75, 125, 180, 245, 320, 490, 560$ 그리고 780 (두꺼운 선) mK. 수직화살표는 온도가 감소하는 방향을 나타내며 E와 O로 명명된 영역에서 반대 방향이다. ; (B) 직선은 $\log(T)$ 특성을 나타낸다. ; (C) O영역에서는 전자수 N 이 홀수여서 스핀 역전과정이 일어나서 Kondo resonance가 유도될 수 있다. E영역에서 N 은 짝수로 이러한 과정이 생길 수 없다.

증가하는 점들(O)과 G가 감소하는 점들(E)이 반복되어 나타나는데 앞의 점들의 경우 전자수 N이 홀수인 경우로 spin-flipping higher order process가 일어날 수 있다. 뒤의 점들은 전자의 수 N이 짝수인 경우로 Kondo tunneling이 일어나지 않는다. 탄소 나노튜브에서는 일반적인 Kondo 현상과는 다른 새로운 종류의 Kondo resonance도 보이는데 <그림 4>에서 일반적으로 최상위 밴드에 홀로 존재하는 전자가 나가고 그 에너지 밴드에 반대스핀의 전자가 다른 전극에서 입사하게 되는데 탄소나노튜브에서는 최상위 밴드가 아닌 아래 밴드의 전자가 전도할 수도 있으며 이 경우도 스핀의 뒤집힘(spine-flipping) 과정이 포함된다. Kondo 현상은 1K 이하에서 나타나며 Coulomb blockade와 같이 나타난다. SWNT dot의 경우 자기장 효과가 전부 spin에 의한 것이고 일반적인 반도체 dot의 경우 밴드 효과가 지배적이다. 반도체 dot의 경우 작은 전자수에 대해서만 Kondo 현상이 관측되지만 나노튜브 dot는 spin이 잘 정의되어 있어서 만 단위의 큰 N에 대해서 측정 가능하고 비교적 큰 길이의 L에 대해서도 Kondo 현상이 쉽게 측정된다.

SET에서 공명 밴드와 비공명 밴드 사이의 간섭에 의해서 전도가 될 수 있는데 Fano resonance라고 부른다. 일반적으로 나노구조에서 관측할 수 있다. 열에너지 $k_B T$ 가 터널링 정도에 의한 coupling 에너지 Γ 보다 매우 작을 때 양자 fluctuation이 주가 돼서 공명이 일어난다. 공명 에너지가 에너지 레벨의 간격 ΔE 보다 매우 작을 때 coupling은 약하고 좁고 준주기적인 peak을 가지는 영역이 된다. coupling이 더 커지면 쌍의 공명이 일어나서 전도성이 증가하는 Kondo 영역이 나타나게 되며 넓은 peak이 관측된다. coupling이 매우 커지면 비대칭의 넓은 peak을 가지는 Fano 공명현상이 나타나게 된다. 탄소 나노튜브를 이용한 전도현상은 전도성이 이론 최대치인 $4e^2/h$ 에 거의 근접하는 $3e^2/h$ 이상인 점측이 보고되었다.^[8] 이 영역에서 Fano resonance를 이용한 비공명 전도의 연구가 가능할 것

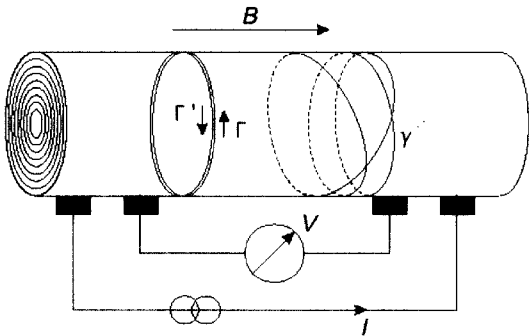
이다.

4. Magnetic tunneling junctions

전극을 강자성체를 사용하면 스핀상태가 편극되어 있는 전자가 나노튜브로 주입된다. 나노튜브의 매우 작은 반경 때문에 나노튜브와 접촉하는 자기 domain의 수는 매우 작으므로 양 끝 단자의 평균 모멘트가 같아도 접촉에서는 서로 다른 방향으로 domain의 자기방향이 향하게 된다. 탄소 나노튜브의 짧은 길이 때문에 튜브 내에서 자기장의 효과가 없을 경우 resonant tunneling이 일어나게 되고 자장에 의해 spin-valve 효과가 나타나게 된다. 강자성체는 스핀이 같은 방향의 전자에 비해 스핀이 다른 방향의 전자가 들어오기가 어렵다. 한쪽 강자성체의 자기방향이 up이라고 보았을 때 전하의 spin 방향도 up이 더 많은 전류가 탄소 나노튜브에 입사하게 된다. 탄소 나노튜브는 최소 130nm 이상의 매우 긴 spin 산란 길이를 가지므로 대부분의 전하들은 강자성체에서의 스핀방향을 유지하면서 반대쪽 강자성체에 입사하게 된다. 강자성체의 자기방향이 서로 같으면 반대인 것에 비하여 전하가 쉽게 흐를 수 있다. 외부자장을 걸어줌으로써 강자성체의 자기방향을 조절이 가능하므로 스핀밸브 현상을 이용한 소자의 개발이 가능하게 된다. 탄소 나노튜브의 경우 Luttinger liquid(LL)의 특성을 보이므로 spin-valve 소자 연구는 LL의 스핀관계를 연구하는 좋은 계가 될 것이다.

5. Self-inductor와 Aharonov-Bohm 효과

순수한 탄소 나노튜브는 구조적으로는 chirality를 가지고 있어도 chiral conductor로서 그다지 역할을 하는 것 같지 않아보인다. 도핑된 탄소 나노튜브를 기계적으로 잡아 늘렸을 경우 chiral 전도성이 유도될 수 있다.^[9] 최근에 chiral 전도성을 가지는 나노튜브가 존재할 수 있다고 제안되었는데 arm-chair 모양과는 약간 다른 종류에서도 chiral 전도성을 보인다고 여겨진다. Chiral 전류는 스스로 자기장을 형성하게 되므로 self-inductor의 특성을 보이는 나노튜브의 소자



〈그림 5〉 MWNT를 4단자에 연결한 모식도; 자기장 B에 평행하게 정렬하면 I 와 I' (또는 γ)과 같이 반대로 전파하는 닫혀진 전자궤도의 양자 간섭에 기인하는 주기적인 자기저항이 보인다.

가 가능할 것이다.

전자가 자기장 방향에 정렬되어 있는 실린더 모양의 전기적 도체를 지나가게 되면 전자의 파장 특성이 감싸는 자속(magnetic flux)의 함수로 전기 저항이 주기적 oscillation하는 것으로 나타난다. 이것은 전자 파동의 위상이 자장에 의해 영향을 받아서 된 것으로 Aharonov-Bohm 현상이라 하고 위상의 변화와 이에 따른 도체를 휘감는 partial wave의 반대 방향끼리의 간섭에 기인한다. 이 oscillation이 마이크로 크기의 얇은 금속 실린더에서 관측되었고 탄소 나노튜브는 흑연 sheet를 말아놓은 것 같은, 속이 빈 실린더 구조를 가지므로 자기장에 따른 양자간섭을 연구하는 데 좋은 미세구조이다. 탄소 나노튜브의 자장에 따른 긴 주기의 oscillation이 관측되었고 또한 짧은 주기의 oscillation도 같이 포함되어 관측되었다.^[10] 짧은 주기의 oscillation이 chiral current일 가능성을 추측해 본다면 탄소 나노튜브에서 chiral current와 Aharonov-Bohm oscillations이 동시에 나타나는 가능성에 대한 연구가 필요하다고 생각된다.

6. Proximity 효과를 이용하는 소자

일반금속이 초전도체와 접하고 있는 경우 일반금속에 초전도성이 유도가 되는데 이를 proximity 효과라고 한다. 탄소 나노튜브를 이용한 초전도-일반금속-초전도(SNS) 접합은 1차원

소자라는 점에서 일반적인 SNS 소자와 차이를 보인다. Kasumov 등은 초전도 전극을 Re/Au와 Ta/Au를 사용하고 나노튜브를 접합시킨 SNS 접합을 제작하였다.^[11] 이 접합의 온도-저항 특성을 측정하여 Re나 Ta가 초전도가 되는 온도 아래에서 나노튜브의 저항이 영이 됨을 관측하였다. 또한 자기저항이 일반 탄소나노튜브에서의 음의 값이 측정되지 않고 초전도체에서 일반적으로 관측되는 양의 값이 측정되었다. Morpurgo 등은 Nb전극을 사용하는 SNS 접합을 제작하였다.^[12] 그러나 나노튜브의 저항이 제로가 되는 현상은 관측되지 않았으나 gate에 의해 control되는 proximity 효과를 분석하였다. 초전도 SET(superconducting single-electron transistor)을 구성하게 되면 초전도체 준입자(quasiparticle) 수송현상이 생겨나게 된다. 준입자의 resonant tunneling에 대한 이론적인 연구와 함께 실험적인 연구는 SET에서의 charging 효과와 Cooper pair 수송현상의 상호 작용 및 1차원 Luttinger liquid와 Cooper pair의 상호 작용에 대한 연구가 가능할 것이다.

7. 나노튜브를 이용한 센서

Dai는 SWNT bridge를 이용하여 케미칼 센서를 만들었다.^[13] NO₂는 차량으로 인한 대기 오염의 원인이고, NH₃는 실험실에서 많이 쓰이는 유독가스이다. 현재 나오는 센서들은 semiconducting metal oxides, silicon devices, organic materials, carbon black-polymer composites가 많이 쓰이고 있는데, 고온(200~600°C)에서 작동한다는 단점과 느린 반응 시간이 문제가 되고 있다. 나노튜브 센서는 반도체 SWNT의 저항이 NO₂, NH₃의 가스 분자가 들러붙음에 따라서 세 자릿수나 변화하는 성질을 이용한 것인데, 상온에서 solid-state 센서보다 빠르고 민감하게 반응함을 보여주었다.

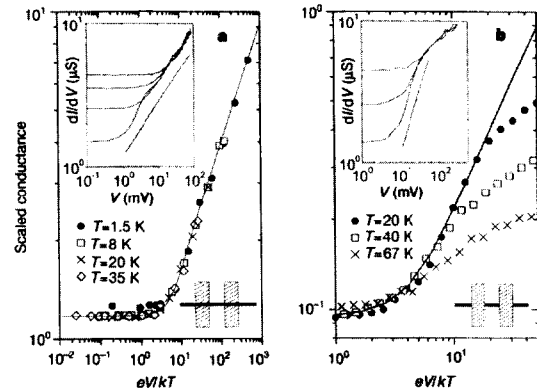
SiO₂/Si 기판에서 촉매점 패턴에서 CVD 방법으로 길러낸 반도체 SWNT는 p형 반도체이며, 페르미 레벨은 전형적으로 증만대보다 25meV 위에 있고, 이것이 상온에서의 전기전도도와 연

관이 있다($3k\Omega \sim 5M\Omega$). NH_3 에 노출되면 나노튜브의 충만대는 페르미 레벨로부터 멀리 이동함으로써 홀의 농도가 감소하고, NO_2 는 나노튜브 페르미 레벨을 충만대 근처로 이동시킴으로써 홀의 농도를 증가시키는 역할을 한다. Dai 그룹은 홀도핑 메커니즘을 금속전극-나노튜브 일함수의 미스매치와 SiO_2 표면이나 벌크에 존재하는 하전된 분자들에 의한 정전기적 효과로 설명하였다. NO_2 는 짝이 없는 전자를 갖고 있는데 이것이 강한 oxidizer 역할을 하므로, 전하의 이동이 SWNT보다는 NO_2 에서 더 쉬워지기 때문이고, NH_3 는 SiO_2 기판의 음전하를 중화시킴으로써 나노튜브에 양전압 게이트로 작용하고, 나노튜브에 붙은 산소 원자와 결합함으로써 저항을 증가시킨다고 설명하였다.

금속성 SWNT의 경우 30% 이하 정도 밖에 변하지 않는데, 금속성에서는 페르미 레벨의 이동이 density of states에 별 영향을 끼치지 않기 때문이고, SWNT 매트 실험에서 역시 1.5~2 배의 변화밖에 나오지 않았는데, 이는 SWNT들의 효과가 중첩되면서 줄어들고, 내부의 나노튜브들은 영향을 받지 않기 때문이다. 나노튜브 센서는 그 크기가 작다는 것 이외에 상온에서 1000 배의 민감도를 갖는다는 장점이 있으며, 다른 형태의 분자 센서로도 가능한 지 연구 중이다.

IV. 전자소자로서의 나노튜브의 가능성

반도성 SWNT의 전송 특성을 측정하는 방법은 크게 두 가지로 분류해 볼 수 있다. 첫 번째 방법은 미리 패터닝된 전극 위에 아세톤 등의 용액에 suspension되어 있는 나노튜브를 가라앉혀서 붙이는 방법이다. 이를 편의상 '하전극부착법'이라고 한다. 반대로, 나노튜브를 절연기판 위에 같은 방법으로 붙인 후 이 위에 전극을 patterning하는 방법이 있다. 이를 '상전극부착법'이라고 한다. 이와 같은 소자들이 보인 결과는 금속성 나노튜브의 경우 coulomb charging 현상과



〈그림 6〉 온도에 따른 differential conductance의 변화. a는 하전극부착법, b는 상전극부착법의 경우이다. 실선은 Luttinger liquid 이론에 의해 예측된 것으로 실험치와 거의 일치함을 알 수 있다.

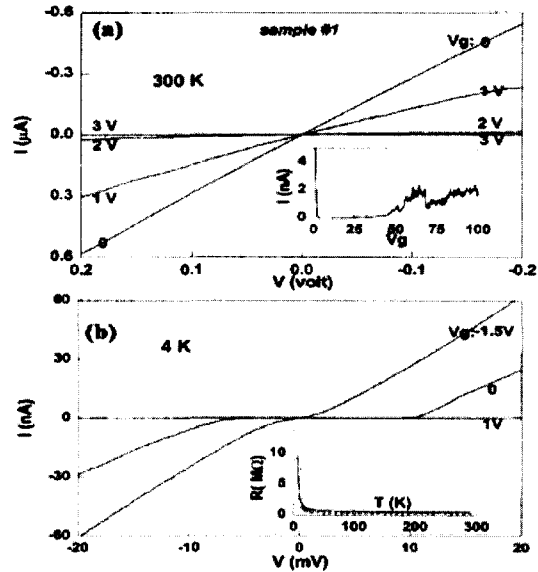
Luttinger liquid 거동을 보였고, 반도성 나노튜브의 경우 상온에서 FET 거동이 확인되었다. 그러나, 이러한 방법은 나노튜브의 원주부분이 전극 물질과 접촉하므로 접촉 저항이 높다는 점이 있어, 측정된 전송 특성에는 튜브 자체의 물성과 접촉 저항의 영향이 섞여 있다고 보아야 한다.

위의 방법들이 이미 아크방전이나 레이저 어블레이션에 의해서 만들어진 나노튜브를 독립적으로 제작된 기판에 붙이는 방법이라면 Stanford, KIST, LG를 중심으로 연구되고 있는 방법(일명, Selective Lateral Growth, SLG)은 이미 반도체 공정으로 제작된 패턴 위에서 in-situ로 나노튜브 브릿지를 성장시키는 방법이다. Stanford의 Dai는 e-beam lithography와 imprint 방법을 이용하여 촉매점 사이, 실리콘 타워상의 촉매점 사이에서 SWNT를 in-situ로 성장시키고 그 전송특성을 살펴본 바 있다. Dai의 결과를 보면,^[14] SLG 방법에 의해서 제조된 채널의 전송 특성과 게이트 지배력이 전극부착법에 의한 채널보다 월등히 우수할 것임을 쉽게 예상할 수 있다. Dekker가 전압-전류 곡선에서 단순한 다이오드 특성과 게이트에 의한 전도제어의 가능성을 보여주었다면, Dai의 방법은 약 6V 근처에서 백 게이트에 의한 전압-전류 곡선의 포화영역을 보여줌으로써 완전한 트랜지스터 거동을 보여주

었다. 이는 접촉저항이 나노튜브의 전송 특성에 미치는 영향이 크다는 정도의 의미가 아니라 나노튜브가 의미있는 전자 소자로서의 가능성이 있는지를 가늠하는 아주 중요한 결과이다. 이렇게 하여 Dai는 Dekker의 gain값 0.35에 비해 월등히 높은 3의 gain 값을 얻었다.

어쨌든, 이들의 결과를 종합해보면 결국 몇 가지 사실을 유추해 볼 수 있다. 첫째, 잘 알려진 사실이지만 나노튜브의 주 캐리어가 정공임을 알 수 있다. 두 번째, 전극/튜브 접점에서 접합이 형성되어 접촉 저항이 생김을 알 수 있다. 기본적으로 접촉 저항은 튜브의 페르미 레벨과 가밴드의 에너지 차이만큼이 되겠지만, 실제적으로는 전극 표면의 topology나 불순물 흡착 정도에 따라 다를 것이다. 나노튜브 자체의 저항은 $d=2.8\text{nm}$ 인 것이 약 $340\text{K}\Omega$ 정도이고 $d=1.3\text{nm}$ 인 것이 약 $3.4\text{M}\Omega$ 정도로 측정되었다. 어쨌든, 이와 같은 결과에 의하면, 높은 transconductance를 가지는 SWNT 트랜지스터의 가능성은 높다고 할 수 있다.

Dekker와 Dai에 의해서 보고된 바와 의하면 나노튜브의 저항은 수십 k Ω 에서 수 M Ω 에 이른다. <그림 7>에서와 같이, 양의 게이트 전압에 대해 채널의 전류가 줄어들어 나노튜브의 majority carrier는 hole임을 알 수 있다. 이러한 전하의 기원에 대해서는 두 가지 이론이 거론되고 있다. 한가지는 source나 drain 전극에 주로 사용되는 Au 금속 등의 일 함수가 높아 전자가 나노튜브에서 전극으로 빠져나가 튜브 내에는 hole이 생성된다는 설명이다. 이 경우 홀의 농도는 흑연에 비해 40배정도 되는 것으로 알려져 있다. 또 다른 설명은 hole carrier가 전극 때문에 생긴 것이 아니라, 나노튜브 자체의 inherent carrier라는 설명이다. 이는 일함수를 이용한 설명이 게이트의 문턱 전압(threshold gate voltage)에 대해 제대로 설명할 수 없기에 제시된 이론이다. 이는 게이트의 에너지 장벽을 넘기 위해 전자가 가져야 하는 열 에너지와의 비교를 통해 현재 관찰된 <그림 7>과 같은 6V의 문턱 전압이 너무 높다는 데서 유추된 설명이다. 지금까



<그림 7> gate 전압에 따른 전극간 전류-전압 곡선 ; (A) 상온(300K)에서의 곡선이고 안의 그림은 10mV에서 gate 전압에 따른 전류곡선이다. ; (B) 4K에서 gate 전압 $V_{gate} = -1.5, 0, +1\text{V}$ 에서의 곡선이다.

지의 보고로 볼 때, 정공이 나노튜브의 inherent carrier라는 설명이 일반적으로 받아들여지고 있으나, 가스흡착과 기관의 영향이 존재하므로 아직까지 논란의 여지는 있다.

나노튜브의 전송 특성 측정 시, 가장 애로가 되는 것이 나노튜브/축매 혹은 나노튜브/전극간의 높은 접촉 저항이다. 접촉 저항이 높은 소자의 전송 특성은, 나노튜브의 저항이 아니라 접촉저항의 지배를 받으므로, 게이트를 통해 나노튜브를 효율적으로 제어하기 힘들고 결국 트랜지스터의 특성인 전압-전류 곡선에서의 포화 영역을 얻을 수 없다. 결국, 다이오드 특성 밖에 보일 수 없다.

Dai의 보고를 제외한 대부분의 보고는 SiO_2 의 절연체 기관 위에 나노튜브 suspension을 떨어 뜨리고 이 위에 전극을 깔거나(상전극부착법), patterned electrodes 위에 나노튜브를 뿌리는 방법(하전극 부착법)으로 이루어졌다. 두 경우 모두 나노튜브가 기관에 접촉되어 있는 경우이므로, 표면 장력에 의해서 나노튜브는 기관 표면의 굴곡(topology)을 따라 휘어지게 되며 이러한

현상은 나노튜브의 직경이 작은 SWNT의 경우 더 지배적으로 나타난다. 나노튜브의 휘어진 부위는 전자(정공)의 산란원으로 작용하게 되어 결국 나노튜브의 전송 특성을 저하시킨다. 지금까지 이론과는 달리, 전극부착법으로 제조한 소자에서 탄성전도체(ballistic conductor) 거동을 관찰한 보고가 없는 이유도 이 때문이다. 전극과 기판의 높이차가 클수록, 나노튜브가 전극부분에서 심하게 꺾어지게 되고 더 강한 산란원으로 작용할 것이다.

나노튜브의 저항은 직경이 커질수록 낮아져, 20~30nm 이상의 직경을 가지는 다결 MWNT(겹수가 많은 MWNT)에서는 거의 금속성을 가진다. 이는 나노튜브의 전송특성이 거의 최외각 껍질의 특성에 의해 지배되기 때문이다. MWNT에서 게이트 지배력을 기대하기 힘든 또 하나의 이유는 안쪽 껍질들에 의한 screening 효과 때문이다. 이로 인해 게이트에서 가해지는 전압은 게이트 반대쪽의 최외각 껍질에 미치지 못하고 대부분 차단된다.^[4] 이 때, 전계에 의해 MWNT가 찌그러지기도 한다. 그러나, MWNT라도 intra-molecule의 형태로 하나의 나노튜브 안에서 구조가 다른 두 나노튜브가 접합되어 있거나 육각형으로만 이루어진 구조에 오각-칠각 형상도 도입되어 결합이 존재하게 될 경우 MWNT라도 반도체성을 가지며, 게이트 지배력을 보이는 경우가 있다. 그러나, 결합 자체를 유연히 발생시킬 수는 있더라도 이를 재연성있게 제어하기는 어렵다. 그러므로, 다결 MWNT로 반도체 소자를 만들기는 어려울 것이다. 한편, 소결 MWNT의 경우는 결합의 도입 없이도 반도체성을 가질 것이라고 예상되기는 하나, 아직 보고된 바는 없다.

이상의 논의를 종합하면, 전극부착법은 튜브/전극의 높은 접촉 저항과 나노튜브의 변형으로 인한 저항 증가, 전자 산란 증가로 인하여 제대로 된 transconductance나 ballistic conductor 거동을 보이기는 힘든 것을 알 수 있다. 또, 다결 MWNT의 경우, 금속성 보유, 게이트 지배 불가, 나노튜브 찌그러짐 등의 이유로 전자소자의 채널로서 사용되기에는 여러 문제점이 있다. 그

렇다면, 종합적으로 다음과 같은 결론에 이르게 된다. 나노튜브를 전자소자로 사용하기 위해서는 우선 트랜지스터 특성을 구현해보아야 하고, 트랜지스터의 반도체 채널로는 적당한 굵기를 가지는 반도체 SWNT를 사용하거나 반도체의 소결 MWNT를 사용하면 된다. 단, 전극 부착법의 경우 접촉저항, 튜브의 휘어짐 문제 등이 있으므로 직접 부착법 이외의 다른 방법을 찾아보아야 한다. 즉, 부동형 가교(floating bridge) 형태의 나노튜브 채널을 만들어야 한다. 즉, 공중에 빨랫줄처럼 떠 있는 채널을 형성시켜야 한다는 결론에 이르게 된다. 실제, 부동형 가교 구조를 가졌을 때는 정공의 전송 속도가 훨씬 향상될 것으로 예측되고 있다.

공정면에서 보더라도, 앞에서 살펴 본 ‘상전극 부착법’, ‘하전극부착법’, ‘Dai’s method’ 모두 실제적인 고집적 소자로 가기에는 문제가 너무 많다. 전기영동법을 포함하는 전극부착법은 그 공정이 기존의 실리콘 공정과 너무 다르다는데 있고, 더 중요한 문제는 현실적으로 집적도를 구현하기에는 매우 어려운 기술이라는 점이다. 더 새로운 제안이 있기 전까지는 기존의 반도체 패턴 상에서 나노튜브를 in-situ로 성장시키는 SLG 방법이 해당처럼 보일 수도 있다. 물론, 이 방식도 결국은 기존의 lithography가 가지는 한계를 뛰어넘기 힘들다는 명확한 한계를 가지고 있다.

우선은 이 문제를 뒤로하고 게이트 설계부터 살펴보자. 그렇다면, 이 상태에서 어떤 방식으로 게이트를 설계해야 할까? 우선 가장 쉽게 만들 수 있는 것은 heavily doped Si-wafer를 백 게이트로 사용하는 방법이다. 도핑 레벨이 높은 웨이퍼를 사용하는 이유는 저온에서의 측정 때문이다. 이 방법은 그 간단한 제조 방법 때문에 많이 사용된다. 이 방법은 채널의 배면에서 전반적으로 전기장을 가하여 채널의 전도도를 제어하는 방법으로 누설 전류, 큰 게이트 면적으로 인한 집적화불가 등의 문제가 있어 초반의 시험 연구 단계에서 많이 사용되는 방법이다. 또 한가지 생각해볼 수 있는 것은 채널 위에 게이트 절연체를

입힌 후 이 위에 게이트를 만드는 방법이다. 상하 위치가 바뀐 것을 제외하면 기존의 백 게이트와 비슷하나 게이트 절연막이 채널 위에 입힐 때 절연막/튜브 계면에서 결함이 존재하여 튜브의 전송 특성이 달라진다는 보고가 있으므로 좋은 방법은 아니다. 그렇다면, 채널의 측면에서 전기장을 인가하는 사이드 게이트 방법을 살펴보자. 이 경우 게이트 절연막을 사용하지 않아도 되므로 전자산란의 문제는 없을 것이다. 그러나, 게이트 아키텍처가 공정상의 재연성 제어가 어렵다는 단점과 수직 셀 방식보다는 소자의 공간집적도 면에서 불리하다는 단점이 있다. 결국, 부동형 탑 게이트의 형태가 바람직할 것이다.

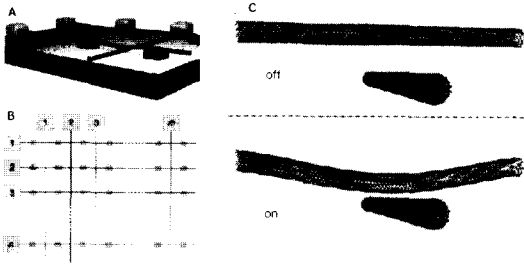
앞에서 종합적으로 살펴본 내용은 나노튜브가 전자소자 중 트랜지스터를 거쳐 메모리로 응용될 때의 이야기이다. 물론, 트랜지스터에 capacitor를 부가하여 DRAM과 유사한 메모리로 만드는 것과 ferro-electricity를 응용하여 FRAM을 시도하는 것은 차후의 이야기이다. 그렇다면 다른 관점에서 CNT의 breakthrough를 모색해 볼 수도 있을 것이다.

비록, 탄소나노튜브가 그 나노크기의 장점을 기반으로 잠재력 높은 소재로 평가받는다 하더라도 아직은 현실적으로 해결되어야 할 과제가 매우 많다. 특히, 전자 소자로서의 가능성을 확보하기 위해서는 집적도나 신기능성 확보라는 문제에 부딪히게 된다. 11월 2일자 네이처지에 발표된 Iijima의 결과에 의하면 4Å 직경의 나노튜브까지 가능하다. 길이는 보통 수~수백 μm까지 나오며, 긴 경우는 수십mm까지 성장이 가능하므로, 나노튜브 자체의 dimension이 bottle neck은 아니다. 즉, 나노튜브 채널 자체의 길이는 작지만 결국 소자로서 구동하기 위해서는 Source, Drain 전극, 게이트, addressing line 등의 문제는 여전히 존재하기 때문이다. 나노튜브가 아무리 작다고 하더라도 나노 튜브를 성장시킬 수 있는 촉매 패턴의 기반과 이 소자를 구동하기 위한 wiring 등은 기존의 반도체 기술을 이용해야 한다는 모순점이 남는다. 만약, 기본의 공정을 그대로 이용한다면 결국 모두 lithography의 한계

를 벗어날 수 없다는 한계에 부딪히게 된다. 역으로 생각하면, 기존의 lithography가 나노스케일에서 구현 가능하다면, 구태여 CNT 소자를 이용할 필요성이 사라지게 된다. 기존의 소자와는 전혀 다른 아키텍처에서 다시 나노튜브를 바라볼 필요가 있다.

나노튜브가 제시하는 나노세계는 아직 우리가 가보지 못한 세계이며 우리의 임무는 미지의 영역에 대해 정확한 지도를 그리는 것이다. 나노튜브의 미래를 예언하기 전에 나노튜브 소자를 다른 방향에서 바라볼 필요가 있다. 앞에서 지적한 문제들이 사실이라면 나노튜브는 집적도면에서의 이점을 잃게 된다. 그렇다면 트랜지스터에서 휘발성 메모리를 거쳐 비휘발성 메모리로 이어지는 도식에서 벗어나 바로 집적도가 높은 비휘발성 메모리로 가는 방법도 있지 않을까?

Science 7월 7일자에 한 가지 제안과 간단한 계산이 보고되었다.^[15] 이는 Phillip Kim의 nano tweezer에 그 근간을 두고 있는 것으로 나노튜브의 전기역학적(electro-mechanical) 성질을 고려하여 제안된 것이다. 나노튜브는 흑연의 basal plane을 맡아둔 것이다. 흑연은 layer by layer로 결합된 판상 결정으로 한 레이어 내에서의 결합은 sp² 혼성 결합을 하여 육각형의 링들이 밀집충진된 구조를 이루고 있으며, 이 결합의 세기는 다이아몬드의 sp³ 혼성에 비해 강하다. 나노튜브의 강도가 큰 이유도 나노튜브가 이와 같은 sp² 결합의 3차원 튜브형 구조이기 때문이다. 그러나 흑연의 레이어 사이의 결합은 반데르 발스 결합으로 장거리에서는 매우 약한 결합력을 가진다. Science에 제안된 모델은 이러한 graphene sheet의 반데르발스 결합을 이용하여 영구적인 기억력을 가지는 비휘발성 메모리에 대한 제안이다. 바로 CNT-NVM(non-volatile memory)이다. 이 소자는 graphene sheet의 반데르발스 힘과 나노튜브 자체의 탄성력, 그리고 정전기력을 복합적으로 고려하여 제안되었다. 반데르발스 힘은 거리에 따라 변하며, 일정한 거리(흑연의 경우 3.4Å)에서 안정한 영역이 있음을 알 수 있다. 이를 메모리에 응용하자



〈그림 8〉 4개의 교차 접합을 가지는 나노튜브 소자. (A)는 3차원으로 본 것이고 두 개의 On(연결) 상태와 두 개의 OFF(분리) 상태를 나타낸다. (B) $n \times m$ 으로 배열된 소자. 나노튜브는 검은 선으로, 나노튜브를 지지하는 받침대들은 회색 사각점으로 나타내었다. (C) 20nm(10,10) SWNT 소자의 OFF(위)와 ON(아래) 상태를 최초 2.0nm 분리 거리 하에서 계산하여 나타낸 구조이다.

는 것이다. 나노튜브와 나노튜브를 〈그림 8〉과 같이 서로 2nm 정도의 일정한 거리를 두고 띄워둔 후 외부의 전기장 인가 등의 방법으로 나노튜브와 나노튜브의 거리를 이 영역까지 끌어주면 튜브와 튜브간의 반데르발스 평형에 의해 일정한 거리에서 나노튜브들이 일정한 ‘반데르발스 거리’를 유지한 채 영구적으로 그 변형을 ‘기억’하게 된다. 이 경우 각 나노튜브에는 반대의 전압을 걸어 인력의 정전기력을 가해야 할 것이다. 이와 같은 방법으로 변형이 일어난 포인트는 외부에서 저항을 잃기 위한 4V 정도의 신호에 대해 휘발되지 않으며 반데르발스 힘에 의해 그 변형을 유지하고 이 때의 저항 값은 서로 떨어져 있을 때의 저항 값에 비해 매우 낮다. 이 때 저항은 튜브간의 양자 터널링에 대한 저항 값이다. 기록된 정보는 보다 강한 20V의 전압에서 다시 기록이 가능한 것으로 계산 결과 나타났다. 또 그 속도도 100GHz 정도로 충분히 빠른 것으로 예측되었다. 가장 최근의 simulation 결과를 보면, $\pm 3V$ 로 ON시키고, 양쪽에 $+5V$ 를 걸어 OFF시키는 것으로 나타났으며 이는 (10,10) 금속성 나노튜브를 전제하여 얻어진 결과이며 반도체 나노튜브의 경우 전산모사가 매우 어려워 시도하지 못하고 있다고 한다.^[16]

이와 같은 모델은 나노튜브의 전자소자 가능성

을 트랜지스터에서 추구하던 기존의 연구와는 상당히 다른 시각에서 시도한 결과이다. 이 소자는 나노튜브의 응용을 위해 항상 주장되었던 반도체성이나 금속성이냐의 문제가 없고 나노튜브의 chirality에 대한 요구도 상당히 완만한 편이다. 그러나 이와 같은 소자가 구현되려면 나노튜브를 길이별로 분류할 수 있는 FFF(Field Flow Fraction), SEC(Size Exclusion Chromatography) 기술이 필요할 것이며, 직경에 대한 어느 정도의 정제법은 보유해야 할 것이다. 또, 나노튜브를 원하는 자리에 위치시키기 위해서는 전기영동이나 자기 조립법, 표면 처리 기술 등이 필요할 것이다. 또 안정한 suspended bridge를 만들기 위해서는 SLG법이 필요할 것이다.

앞에서 지적한 바처럼 나노 튜브의 전자소자로서의 가능성은 초고집적도와 신 기능성 탐색이라는 두 가지 방향에서 접근해야 할 필요가 있다. 즉, 한 가지 방법은 탄소나노튜브만이 가지는 독특한 성질을 이용하는 소자를 개발하는 것이다. 나노튜브와 광과의 관계, 나노튜브와 magnetism과의 관계를 밝히는 것도 한 후보가 될 수 있다. 다른 한 가지 방법은 탄소나노튜브 소자가 기존의 것보다 월등히 우수한 성질을 가지도록 만드는 방법이다. 소자의 속도나 집적 면에서 우위를 가지도록 하면, 소자로서의 전망이 우수할 것이다. 이러한 맥락에서 볼 때, 현 수준에서 CNT-NVM은 가장 현실성이 높은 모델로 생각된다. 기존의 소자 설계 개념과 lithography 한계에서 벗어나 새로운 아키텍처를 제안한 것만으로도 그 의미가 있다. 이 메모리는 $N \times M$ 의 매트릭스 구조를 가지며 테라비트 소자의 경우, 설계 수준이 5nm 정도이므로 고집적도를 겨냥한 가장 가능성이 높은 모델이 될 것이다.

CNT의 실용화에 대한 부담은 미국도 마찬가지이다. 최근의 연구 방향을 보면, 미국도 ‘현재의 최선의 대안’으로 CNT-NVM을 상정하고 있음을 알 수 있다. 여기에 대한 방법론으로 대두된 것이 바로 vectorial growth이다. CVD 방법이 현재로서는 최선의 대안으로 인식되고 있으므로, CVD 기반의 나노튜브 공정이 검토되어지

고 CNT-NVM을 위한 제어 변수들이 검토되었다. 가스 흐름을 이용하여 성장의 방향성을 부여하는 방법, 샘플의 기하학적인 모양과 가스 흐름을 결부시키는 방법, shadow effect를 이용하는 방법, 외부 자장을 이용하는 방법 등이 거론되었으나 현재로서는 전기장을 이용하여 성장의 방향을 제어하는 vectorial growth가 최선인 것으로 인식되고 있다. Vectorial growth란 전극 패턴 사이에 촉매점을 형성시키고 양 전극간에 $2V/\mu\text{m}$ 정도(보통 $25\mu\text{m}$ 간격에서 $50V$ 의 전압을 가한다)의 전기장을 인가하는 방법을 사용한다. 전기장 인가에 따른 나노튜브의 성장에 대한 simulation들이 이 실험의 타당성을 검토하고 있다. 아무튼, 이와 같은 새로운 시도들이 미국과 한국을 중심으로 이루어지고 있다는 것은 고무적인 일이다.

또 다른 대안은 탄소나노튜브 intramolecule을 구현하는 방법이 있다. Dekker 그룹에서 kink 나노튜브의 정류 특성이 보고된 이래 intramolecule이나 heterojunction 등에 대한 시도가 많이 이루어졌다. 최근 Y-junction 나노튜브의 정류 특성이 보고되었으며, 알루미늄의 아노다이징을 이용한 알루미나 template 방법에 의하면 cm^2 당 10^{10} 개의 다이오드를 집적시킬 수 있음이 보고되었다. 또, T-junction을 이용하면 바로 transistor 동작을 보일 수 있을 것이라는 추측도 이루어지고 있다. 물론 이와 같은 intramolecule을 이용하여 공정을 제어하고 하나의 나노튜브 안에 금속/반도체의 접합을 만들면 응용 가능성이 높을 것이다. 또, n-type의 나노튜브를 만들어 기존의 p-type 나노튜브와 접합시키면 그 응용 가능성 또한 훨씬 높아질 것이다. 올 12월 게재된 n-type CNT에 대한 Dai의 보고서에서 하나의 가능성을 찾을 수도 있을 것이다.

Havard의 Lieber는 철을 촉매로 하여 실리콘 나노 와이어(SiNW)의 끝으로부터 탄소나노튜브를 길러 냄으로써 직접 접합(junction)을 만들어 냈다. 에틸렌을 600°C 에서 흘러넘으로써 MWNT를 길러냈는데, MWNT는 금속성이고 SiNW는 반도체 성질을 가지고 있으므로, 이 접

합은 금속/반도체 접합이다. 반대로 나노튜브를 Pt-Ir STM tip에 붙이고, 금을 나노튜브 끝에 deposit한 다음에 silane(SiH_4)을 이용해서 SiNW를 길러서 접합을 만들 수도 있는데, 이를 Ga-In liquid metal에 담그고 I-V를 측정하면, 정류 특성을 보여주는 Schottky diode device의 가능성을 보여주었다. 제로바이어스 접합장벽은 약 0.41eV 정도인데 이는 금속/p-Si 접합과 유사하다.

이를 통해서 반도체 소자의 소형화는 물론, 금속/반도체 접합만이 아니라 반도체/반도체 접합을 만들 수 있는 가능성도 열려 있다. 더욱이, 둘 중의 하나를 n-type으로 만들 수 있다면, 전기적으로 address할 수 있는 아주 작은 LED까지도 만들어낼 수 있는 것이다. 또한, SiNW는 기존의 실리콘 공정과 연결할 수 있는 가능성도 높으며, 소자로서의 우수한 특성, 탄화물과 질화물을 만들 수 있는 대표적인 물질이므로 나노튜브와의 접합을 만들 수 있는 가능성이 아주 크다고 하겠다.

V. 탄소나노튜브 합성

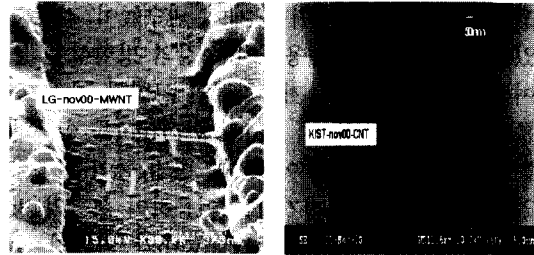
탄소나노튜브(CNT)를 합성하는 방법에는 아크방전법, 레이저 증착법, 열화학 기상 증착법, 플라즈마 화학 기상 증착법 등이 있다.

탄소나노튜브 합성의 초창기에는 주로 아크방전법을 사용하여 나노튜브를 합성하였다. 두 개의 흑연전극 사이에 아크를 발생시키면 양극쪽에서 탄소클러스터들이 떨어져나와 음극쪽에서 응축되고 이때 CNT가 생성된다. 이 방법은 비교적 고품질의 나노튜브를 제조할 수 있지만 수율이 상당히 낮고 재연성을 얻기도 어려운 단점을 가지고 있다. 즉 합성된 다접나노튜브(MWNT)의 크기와 구조가 매우 다양하기 때문에 나노전자소자(Nano-Electronic Device, NED) 응용과 같이 특별한 튜브구조가 요구되는 분야에는 적용할 수 없다.

홀겹나노튜브(SWNT)를 대량 합성할 수 있는 방법으로 최근 널리 알려져 있는 레이저 증착법은 흑연 타겟에 레이저를 쬐어서 흑연을 기화시킨 후 이를 차가운 collector로 운반한 후 응축시키는 방법이다. 흑연 타겟에 Co, Fe 등이 혼입되면 SWNT 다발(ropes)을 얻을 수 있다. 이 방법도 매우 고품질의 SWNT를 합성할 수 있다는 장점을 가지고 있지만 NED에 적용하기 위해서는 CNT를 직경, 길이, chirality 등에 따라 분류, 정제하는 공정을 필요로 한다. 또한 일정한 크기를 갖는, 특정한 성질(반도성 또는 금속성) 갖는 SWNT를 분류했다 하더라도 이를 반도체 패턴상에 균일하게 배열하고 접합시키는 것은 매우 힘들다. 특히 고집적화 한다는 것은 거의 불가능하리라 생각된다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위해 요즘 가장 많이 사용되는 것이 화학 기상 증착법(Che-mical Vapor Deposition; CVD)이다. 이는 기상의 카본전구체(탄화 수소가스; Hydrocarbon Gas)를 열 또는 플라즈마로 분해하여 금속성 촉매 위에 CNT를 증착하는 방법으로 재연성이 있고 순도면에서도 우수한 CNT를 얻을 수 있다. 특히 촉매의 크기를 조절함으로써 CNT의 직경을 쉽게 제어할 수 있다. 또한 최근 SWNT도 합성 가능하다고 보고되어지고 있다.¹¹⁾ 또한, CVD법은 온도, 조성, 압력 등의 변수조절이 매우 용이하므로 CNT의 저온합성, alignment 등이 가능할 뿐만 아니라 다른 반도체 공정과의 정합성도 매우 우수하다. 그러므로 향후 나노전자소자용 CNT 합성을 위해서는 가장 가능성 있는 방법으로 생각된다.

일반적으로 CVD법을 통해서 MWNT가 기판에 대해 수직으로 성장하게 된다. 수직으로 잘 정렬된 CNT 합성기술은 현재 상당히 개발된 상태이며 FED용 emitter tip으로 활발히 연구되고 있다. 하지만, 이러한 수직성장기술은 고집적화를 목적으로 하는 나노전자소자에 직접 응용하는 것이 매우 어렵다. 나노전자소자용 CNT는 기판에 수평인 것이 유리하며 MWNT보다는 SWNT가 유리하다. 따라서, CNT를 나노전자



〈그림 9〉 반도체 공정을 통해 제조된 패턴위에 합성된 CNT bridges

소자로 응용하기 위해서는 SWNT의 수평성장 기술개발이 매우 절실하다 할 수 있다.

최근 LG전자기술원과 KIST 등 몇몇 국내연구기관이 thermal CVD를 사용하여 기존반도체 공정을 이용하여 제작된 패턴상에 세계최초로 MWNT의 수평성장을 성공한 바 있다(〈그림 9〉). 이는 CNT를 나노전자소자에 직접 응용할 수 있는 초석을 마련한 것이라 볼 수 있다. 하지만 아직까지 CNT-NED를 현실화하기 위해서는 많은 연구가 필요하다.

첫째는 SWNT 또는 적은 겹수의 MWNT의 수평성장 기술개발이다. SWNT 또는 적은 겹수의 MWNT는 직경과 chirality를 조절함으로써 다양한 밴드갭(E_g)을 갖는 반도체 특성을 갖게 할 수도 있고 금속 특성을 갖게 할 수도 있으므로 다이오드 또는 트랜지스터로 쉽게 적용할 수 있다. 또한 외부 전기장 또는 자기장에 의해 기계적으로 휘어지므로 electro-mechanical memory에 응용이 가능하다. 현재까지 연구된 바에 의하면 CNT의 직경은 촉매의 크기를 조절함으로써 제어할 수 있다고 알려져 있다. 촉매의 크기에 CNT의 직경은 비례하며 촉매의 크기가 충분히 작으면 SWNT를 만들 수 있다고 보고되었다. 특히 최근에는 다양한 액상촉매를 개발하여 다양한 직경의 SWNT 합성이 가능해 졌다. 하지만 지금까지 이러한 촉매를 패턴화하여 그 위에 SWNT를 수평 성장시키는 기술은 확보되지 못한 상태이다. 또한 CNT의 물성을 매우 크게 좌우한다고 알려져 있는 chirality를 조절할 수 있는 방법은 아직까지 전혀 제시된 바가 없다.

둘째는 CNT의 성장위치 및 방향을 제어하는

기술이다. 즉 CNT를 원하는 두 지점간에 자라게 하는 기술을 의미한다. 이 기술개발이 선행되어야만 CNT-NED의 고집적화가 가능해 진다. CNT의 성장방향을 제어하기 위하여 유속의 방향을 제어하는 방법, growth guide를 설치하는 방법 등이 보고되어 지고 있으나 아직까지는 미비한 것이 많다. 특히 최근에는 전기장을 가함으로써 SWNT의 성장방향을 제어할 수 있다고 보고되었다. 즉 SWNT의 성장시 강한 전기장을 가해주면 이 전기장의 방향과 평행하게 SWNT가 성장한다는 것이다. 하지만 이러한 전기장 효과는 SWNT가 짧거나($1\mu\text{m}$ 이하) 반도체성을 갖게되면 효과가 별로 없을 뿐만 아니라 $2\text{V}/\mu\text{m}$ 의 강한 전기장을 걸어야 하는 단점을 가지고 있다. 이러한 성장방향의 제어 외에도 CNT를 기판에 대해 floating해서 수평 성장시키는 기술도 개발되어야 한다. 이 기술은 지금까지 어느 정도 개발되어 졌는데 최근 촉매층과 기판사이에 높이조절용 buffer layer를 넣음으로써 floating된 상태의 MWNT bridge를 제조할 수 있다고 보고되었다.^[18] 하지만, SWNT를 floating해서 수평 성장시키는 기술과 높이 조절막에 다양한 단차를 주어 CNT를 서로 교차시키거나 평행하게 수평 성장시키는 기술 등은 필히 개발되어야 할 주요 합성기술이다.

셋째는 CNT와 촉매금속(또는 전극금속)간의 완벽한 ohmic contact을 만드는 것이다. 앞절에서 설명하였듯이 높은 접촉저항은 CNT 자체의 전송특성을 측정하는 것을 방해할 뿐만 아니라 트랜지스터와 같은 전자소자로 응용시 게이트를 통한 제어를 어렵게 하는 등의 문제를 일으킬 수 있다. CNT는 구조 및 직경에 따라 다양한 WF(work function)을 가지므로 촉매금속의 WF를 고려하여 설계하는 것이 매우 중요하다. 이러한 근본적인 문제 뿐만 아니라 공정상의 문제도 반드시 해결해야 한다. 촉매금속 및 전극금속의 표면산화 및 오염, CNT와 촉매금속간의 unsound contact, CNT의 성장 기구에 따라 변하는 CNT 팁에 존재하는 촉매금속 및 비정질 카본의 존재 등에 의해 나타나는 여러 문제들도

제어할 수 있어야 한다.

넷째는 합성온도를 낮추어야 한다. 현재 열화학 기상 증착법을 통해 고결정성 CNT를 합성할 경우 일반적인 온도는 800°C 이상이 적절하다. 물론 적절한 가스 사용 및 가열 방식의 채용으로 600°C 정도까지 합성온도를 낮출 수는 있지만 고결정성 CNT의 합성은 매우 어렵다. 플라즈마 화학 기상 증착법의 경우도 CNT의 합성시 기판 온도를 500°C 근방까지 낮출 수 있다고 보고는 되었으나 역시 고결정성 CNT 및 SWNT의 합성은 거의 불가능하다. 하지만 CNT-NED를 현실화하기 위해서는 반드시 기존 반도체 공정과의 정합성이 필요하고 또 이를 위해서는 고결정성 CNT의 합성온도를 500°C 이하, 심지어는 상온 증착이 가능하도록 해야한다.

이상에서 언급한 것 외에도 p-type 반도체 CNT와 n-type 반도체 CNT를 자유롭게 합성할 수 있는 기술, 또 이러한 반도체 CNT와 반도체 CNT 및 금속성 CNT와 반도체 CNT를 연속적으로 합성할 수 있는 기술, Intramolecular device를 위한 다양한 모양의 CNT를 합성할 수 있는 기술, 다른 나노재료의 개발 및 CNT와의 정합성 향상 기술 등은 반드시 개발되어야 할 주요 합성 기술들이다. 이 개발은 CNT-NED의 현실화를 앞당길 수 있으리라 기대된다.

CNT 합성기술과 더불어 CNT-NED를 구현하는데 있어서 또 다른 중요한 기술은 반도체 공정을 통해 기판위에 촉매를 patterning하는 기술의 개발이다. Photo 및 e-beam lithography 기술, wet- 및 dry-etching 기술, 패턴설계 기술과 같은 기본적인 기술의 개발은 물론이고 CNT 합성공정과와의 완벽한 정합성을 확보하는 기술도 개발되어야 한다. 이와 같은 기술들의 충분한 확보는 CNT-NED의 현실화를 하루빨리 앞당길 수 있으리라 기대된다.

VI. 맺음말

지금까지 나노튜브의 전자소자로서의 가능성을 살펴보았다. 탄소나노튜브가 높은 잠재력에도 불구하고 당장 그 application을 찾지 못하는 이유는, 탄소나노튜브에 대한 이해와 제어력 그리고 연구 역사가 아직은 짧고 부족하기 때문이다. 형성기구나 구조제어기술도 아직까지는 요원하다. 그러나, 나노튜브가 궁극의 나노 물질이며 재미있는 시스템임은 틀림없는 사실이다. 2년 반 정도의 짧은 역사 동안 나노튜브는 FED와 수소저장의 붐을 타고 급속히 확산되었다. 필자는 이 sensationalism이 나노튜브의 장래를 더욱 어렵게 만들고 있다고 생각한다. 언제나 그러했듯이, 자연은 인류에게 순순히 그 비밀을 드러낸 적이 없다. 장기적인 안목과 새로운 방법론, 끈기가 그 대안일 것이다.

참 고 문 헌

- [1] F. Hoshi, T. Ishikura, S. Yamashita, K. Tsugawa and A. Goto, 'Well-aligned carbon nanotubes synthesized by electron cyclotron resonance chemical vapor deposition', MRS fall meeting, Poster A6.2, (2000).
- [2] 전자신문 매주 목요일 6면 '첨단기술의 현장을 가다' 연속 간행물 참조.
- [3] S. J. Trans, A. R. M. Verschueren and C. Dekker, 'Individual single-wall carbon nanotubes as quantum wires', Nature(London), 393, 49, (1988).
- [4] R. Martel, T. Schmidt, H. R. Shea, T. Hertel and Ph. Avouris, 'Single- and multi-wall carbon nanotube field-effect transistors', Appl. Phys. Lett., 73, 2477, (1998).
- [5] J. Kong, C. Zhou, E. Yenilmez and H. Dai, 'Alkaline metal-dopedn-type semiconducting nanotubes as quantum dots', Appl. Phys. Lett., 77, 3977, (2000).
- [6] H. Fahmy and K. Ismail, Appl. Phys. Lett., 'Analysis of a single-electron decimal adder', 70, 2613, (1997).
- [7] C. Van Hoof, J. Genoe, R. Mertens, G. Borghs and E. Goovaerts, 'Electroluminescence from bipolar resonant tunneling diodes', Appl. Phys. Lett., 60, 77, (1992).
- [8] J. Nygard, D. H. Cobden and P. E. Lindelof, 'Kondo physics in carbon nanotubes', Nature 408, 342, (2000)
- [9] Y. Miyamoto, Phys. Rev. 'Mechanicallystretched carbon nanotubes: Induction of chiral current', B 54, R11, 149, (1996).
- [10] A. Bachtold, C. Strunk, J. Salvetat, J. Bonard, L. Forro, T. Nussbaumer and C. Schonenberger, 'Aharonov-Bohm oscillations in carbon nanotubes', Nature, 397, 673, (1999).
- [11] A. Yu. Kasumov, R. Deblock, M. Kociak, B. Ruelet, H. Bouchiat, I. I. Khodos, Y. B. Gorbatov, V. T. Volkov, C. Journet and M. Bourghard, 'Supercurrents Through Single-Walled Carbon Nanotubes', Science, 284, 1508, (1999).
- [12] A. F. Morpurgo, J. Kong, C. M. Marcus, H. Dai, Science, 'Gate-controlled superconductint proximity effect in carbon nanotubes', 286, 263, (1999).
- [13] J. Kong, N. R. Franklin, C. Zhou, M. G. Chapline, S. Peng, K. Cho and H. Dai, 'Nanotube molecular wires as chemical sensors', Science, 287, 622,

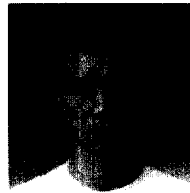
- (2000).
- [14] H. T. Soh, C. F. Quate, J. Kong and H. Dai, 'Integrated nanotube circuit: Controlled growth and ohmic contacting of single-walled carbon nanotubes', Appl. Phys. Lett., 75, 627, (1999).
- [15] T. Rueckes, K. Kim, E. Joselovich, G. Y. Tseng, C. -L. Cheung and C. M. Lieber, 'Carbon nanotube-based non-volatile random access memory for molecular computing', Science, 289, 94, (2000).
- [16] Private communication, Kyoungha Kim.
- [17] J. Kong, H. T. Soh, A. M. Cassell, C. F. Quate and H. Dai, Nature, 395, 878, (1998).
- [18] J.-K. Shin, Y.-S. Han, S.-T. Kim, 'Directed growth of nanotubes using microcontact printing of catalysts', MRS fall meeting, Poster A13. 8, (2000).

저 자 소개



申 鎮 國

1968년 10월 10일생, 1991년 2월 서울대 무기재료공학졸, 1993년 2월 KAIST 재료공학석사졸, 1998년 8월 KAIST 재료공학박사졸, 1998년 9월~2000년 2월: KIST Post-doc., 2000년 3월~현재: LG 전자기술원 나노테크그룹, <주관심 분야: Carbon계 물질 (Diamond, DLC, CNT), CNT 전자소자, Nanotechnology>



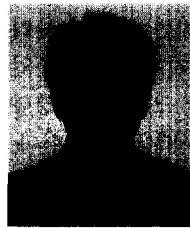
李 在 恩

1972년 11월 25일생, 1995년 2월 연세대 물리졸, 2000년 8월 연세대 물리석사졸, 2000년 7월~현재: LG 전자기술원 나노테크그룹, <주관심 분야: CMR, CNT 전자소자>



韓 榮 洙

1971년 9월 29일생, 1994년 2월 연세대 금속졸, 1996년 2월 KAIST 재료공학석사졸, 2000년 8월 KAIST 재료공학박사졸, 2000년 8월~현재: LG 전자기술원 나노테크그룹, <주관심 분야: Carbon계 물질 (Diamond, Li 전지음극재료, CNT), CNT전자소자>



尹 尙 帥

1969년 11월 26일생, 1994년 2월 서울대 물리졸, 1997년 2월 서울대 물리석사졸, 2000년 8월 서울대 물리박사졸, 2000년 7월~현재: LG 전자기술원 나노테크그룹, <주관심 분야: Granular Physics, CNT 전자소자>



鄭 珉 在

1973년 7월 26일생, 1999년 2월 한양대 재료졸, 2001년 2월 한양대 재료공학석사졸, 2000년 12월~현재: LG 전자기술원 나노테크그룹, <주관심 분야: Carbon계 물질 (Diamond, DLC, CNT), CNT 전자소자>



金 成 泰

1953년 2월 17일생, 1979년 2월 서울공대 금속공학과 졸업, 1984년 5월 SIT 재료공학 석사, 1987년 5월 SIT 재료공학 박사, 1990년 3월~현재: LG 전자기술원 상무이사, <주관심 분야: Flat Panel Display, Nanotechnology>