

## 홀겁 탄소 나노튜브 네트워크의 게이트 의존성과 온도 의존성

오동진, 원부운, 김강현, 강해용, 김혜영, 김규태\*

고려대학교 전기공학과\*

### Field effect and temperature dependence on the conductance of the carbon nanotube network

Dong Jin Oh, Boone Won, Kang Hyun Kim, Hae Yong Kang, Hye Young Kim and Gyu Tae Kim\*

Department of Electrical Engineering, Korea Univ.\*

#### Abstract

Back gate가 있는 SiO<sub>2</sub> 기판에 SWCNT(Single Walled Carbon Nanotube) 분산액을 도포하여 SWCNT 네트워크를 형성하였다. 금선을 shadow mask로 사용하여 10 $\mu$ m 간격의 2단자 금 전극을 열 증착을 통해 형성하였다. 현미경 포토리소그래피를 통하여 시료의 가장자리를 Photoresist로 남겨두어 시료 가장자리의 나노튜브를 통한 단락을 방지하였다. 전류-전압 특성, 게이트 특성과 온도 의존성은 DAQ(Data Acquisition) 보드와 Keithley 2400을 사용하여 측정하였고, Labview 기반 프로그램을 통해 제어하였다. 음의 게이트 전압에서의 저항 감소를 관측함으로써 네트워크 상태에서의 게이트 의존성이 P 형 반도체 성질을 보여줌을 알 수 있었으며, 온도가 올라감에 따라 저항이 지수 함수적으로 증가하는 것으로부터 네트워크의 온도 의존성이 금속성 온도 의존성을 가지는 것을 확인하였다.

**Key Word** : SWCNT, network, gate dependence, majority carrier

#### 1. 서 론

1991년 Iijima가 탄소나노튜브를 발견한 이래로, 탄소나노튜브에 대한 연구는 그 전기적, 기계적 성질의 우수성과 양자속박현상(quantum confinement effect)에 따른 양자 효과에 대한 기대로 인해 활발히 진행되고 있으며, 복합물(composite)의 경우 이미 여러 방면에서 실용 단계에 있다[1]. 한편, 1998년 R. Martel과 그의 동료들은 반도체성 단일 SWCNT(Single Walled Carbon Nanotube)의 게이트 의존성을 실험 결과로서 발표하여 탄소나노튜브의 전기전자 소자로서의 가능성을 보여주었고, 매년 탄소나노튜브의 전기, 광 특성 및 다양한 소자로서의 응용 가능성들에 대한 연구가 수 없이 발표되고 있다[2]. 그러나 반도체성과 금속성이 각각 존재하는 SWCNT의 특성은 단일 나노튜브로 소자를 구현하고 양산하는데 있어 큰 걸림돌이 되

고 있으며, 선택적으로 원하는 성질의 SWCNT만을 합성시키기 위해서는 좀 더 많은 관련 연구가 필요하다[3]. 또한 수 나노미터 크기의 반경을 가지는 단일 나노튜브를 배열하여 각각을 회로 내 소자로서 집적하는 문제 역시 단일 나노튜브 소자의 실용화를 위해 반드시 먼저 해결되어야 한다. 이 같은 한계들에 대해 SWCNT 네트워크는 하나의 대안이 될 수 있으며, 시료의 일반적인 물성을 정량적으로 분석하기 위한 손쉬운 실험 방법으로 쓰일 수 있다. 본 실험에서는 SWCNT 네트워크를 구성하여 전류-전압 특성, 게이트 의존성, 온도 의존성을 측정하였고, 이를 바탕으로 SWCNT 시료 안의 반도체성 튜브의 비율과 주전하의 종류 및 그 원인에 대해 고찰하였다.

#### 2. 실험

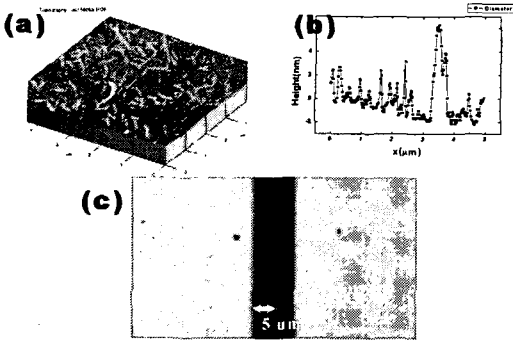


그림 1. (a) SWCNT 네트워크의 AFM 이미지. (b) 네트워크 상의 각 나노튜브의 반경 분포 (c) 금 증착 후의 양 전극 사이의 간극

Back gate를 위해 P-type으로 heavily 도핑되고 300nm의 절연층을 가지는 Si/SiO<sub>2</sub>를 기판으로 사용하였다. 시료 가장자리의 나노튜브로 인한 게이트와의 단락을 방지하기 위해, 광학 현미경에 내장된 할로겐 램프를 광원으로 사용한 포토리소그래피 방법을 통하여 시료의 가장자리에 PR(Photo Resist) Shadow mask를 형성하였다[4]. SiO<sub>2</sub> 표면에 SWCNT가 잘 흡착될 수 있도록 APS(3-Aminopropyltrimethoxysilane) 용액에 15분간 전 처리하였다. 합성된 SWCNT는 SDS(Sodium Dodecyl Sulfate) 1% 수용액에 넣은 뒤 초음파를 가함으로써 고르게 분산하였다. 이렇게 만들어진 나노튜브 분산액을 기판 위에 올리고 30분간 흡착시킨 후 기판을 DI(Deionized) water에 씻어 건조시키는 방법으로 나노튜브를 기판에 도포하였다. AFM(Atomic Force Microscope)으로 형성된 네트워크 상의 나노튜브 density를 확인하면서, 반복적으로 도포함으로써 원하는 나노튜브 density를 가지는 네트워크를 형성할 수 있었다. 아세톤으로 기판의 PR을 제거한 후, 얇은 금선(17 μm)을 Shadow mask로 사용하여 10μm 간극을 가지는 2 단자 금 전극을 열 증착을 통해 200nm 두께로 형성시켰다[5]. 그림 1은 실험에 사용된 네트워크 시료의 AFM 이미지와 2 단자 금 전극 증착 후 그 사이의 간극을 보여주는 광학 현미경 이미지이다. 금은 SWCNT와 work function이 비교적 비슷하고 거의 산화되지 않기 때문에 SWCNT 네트워크의 전극으로 알맞지만, SiO<sub>2</sub> 기판과의 접촉

면에서의 adhesion이 좋지 않아 Wire bonder를 쓰지 않고 Silver paste를 사용하여 bonding하였다.

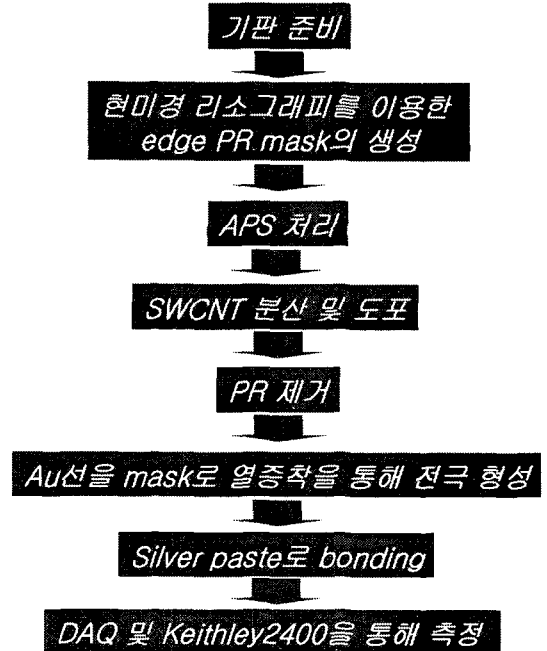


그림 2. SWCNT 네트워크 공정 순서도

전기적 특성 측정에는 DAQ(Data Acquisition) 보드와 Keithley 2400을 사용하였고 Labview 기반의 프로그램을 통해 제어하였다. Hot plate 위에 시료를 위치시키고 단계적으로 온도를 높인 후 전류-전압 특성을 측정하는 방법으로 SWCNT 네트워크의 온도 의존성을 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

같은 조건으로 제작된 시료 중 가장 상이한 특성을 가지는 두 시료를 통해 그 측정 결과를 논하고 고찰해 본다. 그림 3은 두 시료의 전류-전압 특성을 보여준다. 그림에서 보듯이 시료 2는 시료 1에 비해 100배가량 큰 저항 값을 가진다. 시료 1과 시료 2 모두 ±1V 근방에서 sub-threshold를 가지며, 두 시료의 sub-threshold의 위치가 일치하는 것으로 미루어 네트워크 상에서의 반도체성 튜브의 비율에 따른 것으로 생각된다. (b)와 (c)는 전류에 의한 시료 2의 annealing 효과를 보여준다. 이

는 금전극과 나노튜브 간의 contact이 불안정하여 흘러들어오는 전류에 의해 국부적으로 큰 저항이 걸리면서 발생한 열에 의해 접합면의 상태가 개선된 것으로 보인다.

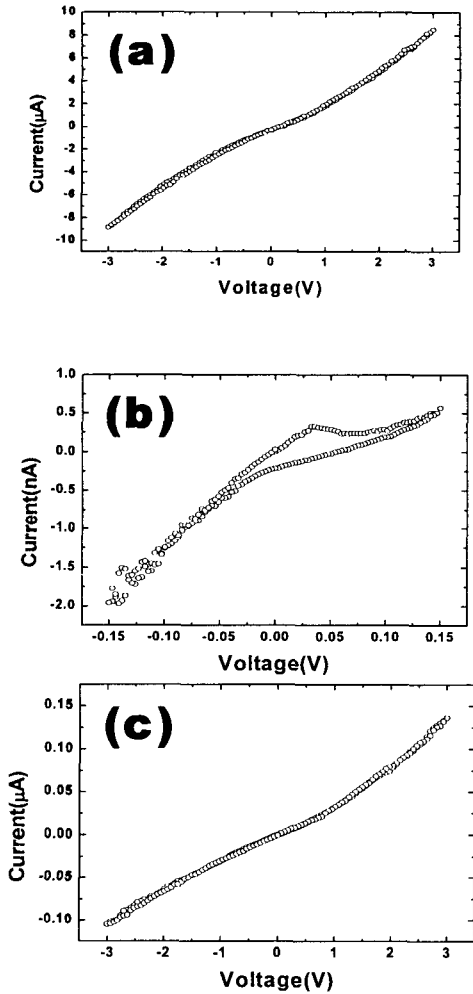


그림 3. 전류-전압 특성 (a) 시료 1, 전류-전압 특성 (b) 시료 2, 전류-전압 특성 (c) 시료 2, 전류에 의한 annealing 후의 전류-전압 특성

그림 4는 두 시료의 게이트 의존성을 보여준다. 음의 게이트 전압에서 저항이 감소하는 것에서 네트워크에서의 게이트 의존성이 P형 반도체 성질을 보여줄을 알 수 있었다. 시료 2가 시료 1에 비해 게이트 의존성이 선명하나, 게이트 전압으로 스위칭하는 경우의 On current와 Off current의 절대적

인 차이는 0.5μA로 거의 차이가 없다. 같은 SWCNT 분산액으로 도포하여 제작한 네트워크 상에서의 반도체성 튜브와 금속성 튜브의 비율은 평균적으로 같다고 가정할 수 있고, 앞서 언급한 sub-threshold의 위치 또한 이를 뒷받침한다. 따라서 두 시료의 게이트 의존성 그래프 상의 차이는 contact 상태에 따른 contact 저항의 차이에 기인하는 것으로 보이며, 전류-전압 특성에서 저항 수준이 100배가량 차이 나는 것 역시 같이 설명될 수 있다.

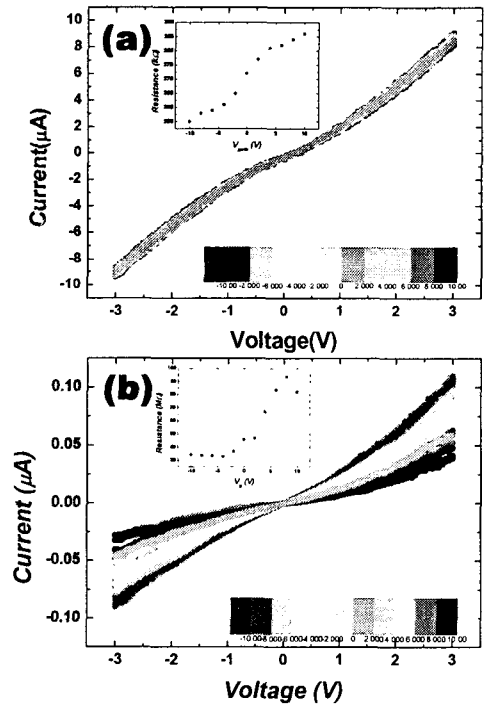


그림 4. 게이트 의존성 (a) 시료 1, (b) 시료 2

게이트 전압을 인가하지 않았을 경우 반도체성 튜브는 금속성 튜브에 비해 100배가량 큰 비저항을 가진다고 가정하면,  $V_{gate}=0$ 에서 시료의 총 저항 값은 금속성 튜브들에만 의한 값으로 생각할 수 있다. 또한 음의 게이트 전압이 걸린 경우의 시료의 총 저항은 반도체성 튜브들에 의한 저항과 금속성 튜브들에 의한 저항의 병렬 저항으로 나타낼 수 있다. 여기에 계산의 편의를 위해 반도체성 튜브들에 의한 저항을 게이트 전압에 대하여 상수로 가정

하여 게이트 의존성 측정 결과로부터 네트워크 상의 반도체성 튜브의 비를 도출할 수 있었다. 시료 1의 반도체성 튜브의 비는 19%, 시료 2의 경우 25%의 비를 가지며, 이는 그 간의 다른 연구 결과들과 비교하여 크게 다르지 않았다.

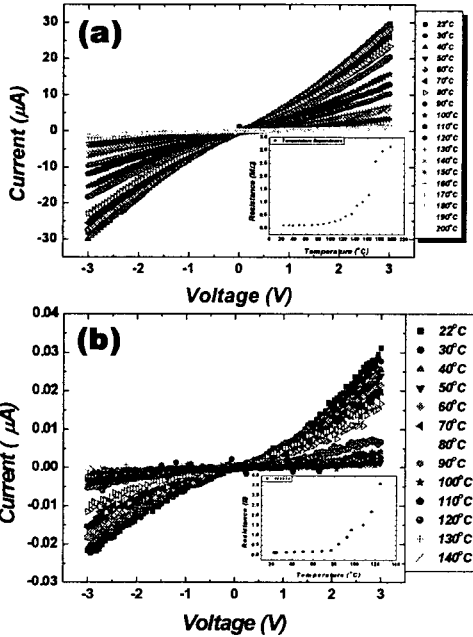


그림 5. 온도 의존성 (a) 시료 1, (b) 시료 2

그림 5는 온도에 따른 전류-전압 특성의 변화를 나타낸다. 두 시료 모두 온도가 올라감에 따라 저항 값이 증가함을 확인할 수 있으며, 이로써 SWCNT 네트워크가 금속성 온도 의존성을 가지는 것을 알 수 있었다.

#### 4. 결론 및 요약

SWCNT 네트워크를 사용하여 전류-전압 특성 및 게이트 의존성과 온도 의존성에 대해 실험하였다. 전류-전압 특성에서 sub-threshold를 확인하였고, 그 측정 과정에서 전류에 의한 contact의 annealing 효과를 관측할 수 있었다. 게이트 의존성 결과로부터 네트워크 상의 반도체성 튜브의 비를 도출할 수 있었고, SWCNT 네트워크가 P형 반도체

성질을 가지는 것을 확인하였다. 또한 Hot plate를 이용한 간단한 온도 실험으로부터 SWCNT 네트워크가 금속성 온도 의존성을 가지는 것을 알았다. 한편, 시료마다의 저항 수준이 크게는 100배 정도까지 차이 나는 것에서 네트워크에서도 단일 나노선과 같이 전극과의 contact이 시료의 전기적 특성에 크게 영향을 주는 것을 확인하였다.

#### 감사의 글

이 논문은 2002년 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음 (KRF-2002-042-C00017)

#### 참고 문헌

- [1] Iijima S, "Helical microtubules graphic carbon", Nature 354, 56, 1991
- [2] R. Martel, "Single- and multi-wall carbon nanotube field-effect transistors", Appl. Phys. Lett. 73, 2447, 1998
- [3] M. S Dresselhaus, "Science of Fullerene and Carbon Nanotubes", Academic, New York, 1996
- [4] 오동진, "광학 현미경을 이용한 단일 나노선에서의 선택적 전극 형성 방법", 전기전자재료학회 하계학술대회 논문집 5, p. 401, 2004
- [5] de Pablo P J, Graugnard E, Walsh B, Andres P, Datta S and Reifenberger R, "A simple, reliable technique for making electrical contact to multiwalled carbon nanotubes", Appl. Phys. Lett. 74, 323, 1999
- [6] Someya T, Kim P and Nuckolls C, "Conductance measurement of single-walled carbon nanotubes in aqueous environment", Appl. Phys. Lett. 82, 2338, 2003
- [7] Ratan Lal, "Effect of electron-phonon interaction on the resistivity of metallic nanowires", Physical Review, 68, 115417, 2003