



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

이학석사학위논문

Metallic carbon nanotube–metal
film hybrid structure for enhanced
conductivity

향상된 전기전도도를 위한 금속성
탄소나노튜브와 금속박막의 복합체

2015년 2월

서울대학교 대학원

물리·천문학부

신 나 래

Metallic carbon nanotube–metal film hybrid structure for enhanced conductivity

(향상된 전기전도도를 위한 금속성
탄소나노튜브와 금속박막의 복합체)

지도교수 홍 승 훈

이 논문을 이학석사 학위논문으로 제출함
2014년 12월

서울대학교 대학원
물리·천문학부

신 나 래

신나래의 석사학위논문을 인준함
2014년 12월

위 원 장 이 탁 희 (인)

부 위 원 장 홍 승 훈 (인)

위 원 박 윤 (인)

Metallic carbon nanotube–metal film
hybrid structure for enhanced
conductivity

Narae Shin

Supervised by
Professor Seunghun Hong

*A Dissertation Submitted to the Faculty of
Seoul National University
in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Philosophy*

December 2014

Department of Physics and Astronomy
Graduate School
Seoul National University

국문 초록

금속 전극은 모든 전기적 장치를 구성하는 가장 기본적인 요소로서, 전기적 장치를 구성하는 부품들에 전류를 공급하는 역할을 한다. 따라서 이상적인 전극은 전기전도도(Conductivity)와, 강도(Rigidity)등의 성질이 우수하여 전기적 장치를 구성하는 부품들의 기능에 영향을 미치지 않아야 한다. 때문에, 연구자들은 오랫동안 전극의 성질을 개선시키고자 노력을 해왔다.

본 논문에서는, 도체성 탄소나노튜브(mCNT)와 금속박막의 복합구조를 제작하여 그 전기적 특성을 일반 금속박막과 비교하였다. Raman Spectroscopy 와 AFM 을 이용하여 mCNT 와 금속박막의 복합구조가 성공적으로 제작되었음을 확인하였으며, 4-point probe measurement 를 이용하여 그 전기적 특성을 일반 금속박막과 비교하였다. 그 결과 금속 복합체의 전기전도도가 순수한 금속만을 증착한 구조의 전기전도도보다 향상됨을 확인하였다. 마지막으로, mCNT 와 금속을 혼합하여 만든

복합체의 온도에 의한 전기전도도의 변화를 측정하여, 복합체가 전형적인 금속의 특성을 보이는 것을 확인하였다.

주요어 :

Metallic carbon nanotube, Metal, Hybrid Structure, Conductivity,

4-point probe measurement

학번 : 2013-20371

Contents

국문 초록	1
Chapter 1. 서론	6
1.1 탄소나노튜브	7
1.2 원심분리법	10
1.3 4-probe point measurement	12
Chapter 2. Pristine mCNT 를 이용하여 향상된 전도도	14
2.1 서론	15
2.2 실험방법	17
2.2.1 원심분리를 이용한 pristine mCNT 추출	18
2.2.2 4-probe point measurement 을 위한 소자 제작	19

2.2.3 전기적 특성 측정	20
2.3 실험결과 및 토의	21
2.3.1 Pristine mCNT 의 성분분석	22
2.3.2 전류-전압 특성 비교	24
2.3.3 Au 의 두께에 따른 저항	25
2.3.4 온도변화에 따른 전도도의 변화	27
Chapter 3. 결론	29
Chapter 4. Reference	30

본문 그림 목록

[그림 1.1] 탄소나노튜브의 구조	8
[그림 1.2] 4-point probe measurement 를 위한 샘플	12
[그림 2.1] Pristine mCNT 용액의 성분분석	18
[그림 2.2] 원심분리를 이용한 pristine mCNT 용액 추출	23
[그림 2.3] 전류 - 전압 특성 비교 그래프	24
[그림 2.4] Au 의 증착 두께에 따른 저항 비율	26
[그림 2.5] 온도에 따른 전도도 변화	28

Chapter 1.

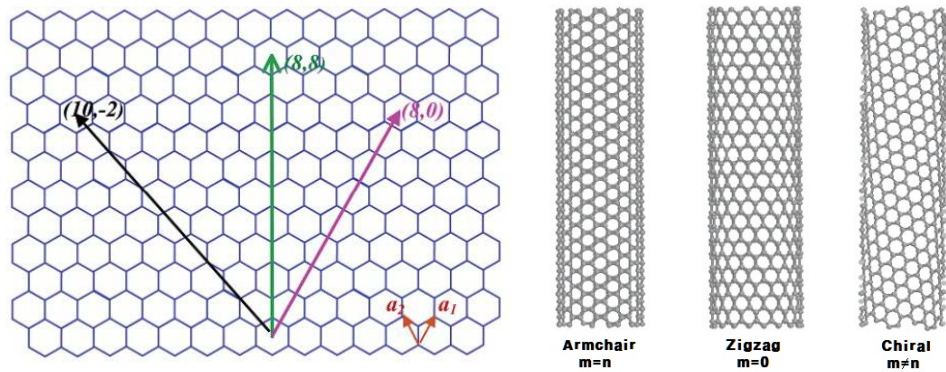
서론

1.1 탄소나노튜브

탄소나노튜브(CNT; carbon nanotube)는 탄소 동소체 중 하나로, 흑연 면(graphite sheet)이 나노 크기의 직경으로 실린더 형태를 취하고 있다. 탄소나노튜브는 화학적으로 간단한 구조로 이루어져 있으면서도, 우수한 물리적 강도, 탄성계수, 열전도도와 높은 전기전도도 등 나노 물질들 중에서도 가장 풍부하고 다양하게 이용할 수 있는 가능성을 가지고 있다 [1].

탄소나노튜브는 흑연 면이 말리는 구조에 따라 단일벽나노튜브(SWNT; single wall nanotube), 다중벽나노튜브(MWNT; multi walled nanotube), 다발형나노튜브(rope nanotube)로 분류된다 [2].

단일벽나노튜브는 말려있는 모양에 따라 반도체성 탄소나노튜브(sCNT)와 도체성 탄소나노튜브(mCNT)로 분류될 수 있다. 말리는 방향의 벡터는 그래핀의 유닛벡터 \mathbf{a}_1 과 \mathbf{a}_2 를 이용하여 표시할 수 있는데, 이를 chiral vector \mathbf{C}_h 라 하며 다음과 같이 표현할 수 있다.



[그림 1.1] 탄소나노튜브의 구조 [2].

$$C_h = na_1 + ma_2 \equiv (n, m), \quad (n, m \text{ are integer}, 0 \leq m \leq n) \quad (1.1)$$

[그림 1.1]에서 여러 종류의 단일벽나노튜브와 단일벽나노튜브의 특성에 영향을 주는 여러 변수를 확인할 수 있다. 특히 $n-m$ 이 3의 정수배일 경우 도체성, $n-m$ 이 3의 정수배가 아닐 경우 반도체성 성질을 띤다. 또한 탄소나노튜브의 말린 방향에 따라 Chiral vector가 $n=m$ 을 만족할 경우 금속성을 띠는 arm-chair tube라고 하며, $m=0$ 일 경우 zigzag tube라고 한다. 그 이외의 모든 튜브는 chiral tube라고 한다.

탄소나노튜브의 벽의 개수가 2개 이상일 경우 다중벽나노튜브라고 하며, 직경은 100 nm 미만이다. 또한 단일벽나노튜브가 서로간의 반데르발스 힘에 의해 엉켜 있을 경우 다발형 나노튜브(CNT Bundle)라고

한다. 다발형나노튜브는 구성하고 있는 단일벽 나노튜브가 하나라도 도체성 탄소나노튜브 라면 쉽게 도체의 성질을 가지기 때문에, 대부분의 다발형탄소나노튜브는 도체성을 띤다.

1.2 원심분리법

밀도가 다른 부유물이 있는 현탁액을 가만히 두면 밀도가 높은 물질은 중력의 영향으로 서서히 바닥으로 가라앉고 밀도가 낮은 물질은 서서히 상층부로 이동하게 된다. 이런 과정을 침전이라 하며, 중력대신 원심력을 이용하면 쉽게 침전현상을 가속시킬 수 있다. 위 과정을 원심분리라 하며, 이 원리를 사용한 장비를 원심분리기라 한다.

물체가 원운동을 할 때, 관성의 원리에 의해 원의 중심방향에서 원 바깥 방향으로 나가려는 힘, 즉 원심력이 생긴다. 원심력은 다음 식으로 주어진다.

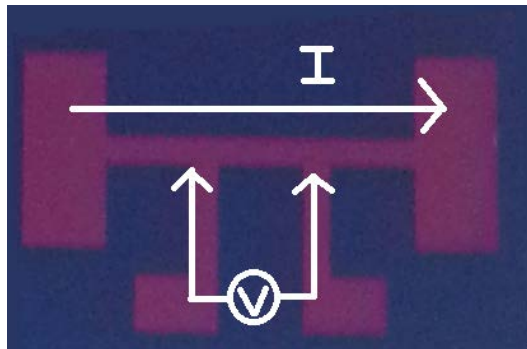
$$F=mrw^2 \quad (1.2)$$

여기서 m 은 질량밀도이고, r 은 중심축으로부터 수직으로 벗어나 있는 거리, w 는 회전 각속도이다. 원심분리기는 원심력의 크기를 조절하여 물질간의 상대적 밀도 차를 조절한다. 원심분리기에서 각속도는 분당 몇 바퀴 회전하는 가를 나타내는 단위인 rpm 이라는 단위로 표기할 수 있으며, 원심분리 되는 물체가 받는 힘은 중력가속도 G 를 주로 사용한다. 실제로

원심분리에 물체에 가해지는 힘은 반지름과 각속도, 원심분리 되는 대상물질의 질량 이외에 물질의 점도, 밀도, 반지름, 부력이 함께 관여한다.

1.3 4-point probe measurement

저항은 소자의 기본적인 특성 중에 하나지만, 소자의 저항이 낮아져서 프로브와 소자 사이의 접촉저항이 무시하기 힘들게 된다면 소자의 저항을 정확하게 측정하기 어려워진다. 이러한 접촉저항의 영향을, 측정에서 제거하기 위해 4-point probe measurement 를 사용한다. 4-four point probe 는 동일선상에 놓여진 4 개의 텅스텐 와이어 프로브를 말하며, 소자의 표면을 접촉하도록 되어 있다. 그림 [1.2]는 4-point probe measurement 를 위한 샘플이다.



[그림 1.2] 4-point probe measurement 를 위한 샘플.

[그림 1.2]를 보면, 전류(I)는 바깥쪽 프로브를 통해 흐르며, 전압(V)를 안쪽 프로브 사이에서 측정하여 전류의 손실이 없도록 하였다. 소자가 어느

정도 무한한 부피를 가지고 있고 프로브 안쪽의 간격이 $t_1 = t_2 = t_3 = t$ 라면, 어느 정도 무한한 볼륨의 저항은 다음과 같다.

$$\rho = 2\pi t \frac{V}{I} \quad (1.3)$$

측정된 결과와 위의 식을 이용하여 비저항을 구할 수 있으며, 이때 구한 비저항은 프로브 팁과 소자 사이의 접촉저항을 무시할 수 있다.

Chapter 2.

Pristine mCNT 를 이용하여 향상된 전도도

2.1 서론

금속은 인간이 처음으로 사용한 물질들 중 하나이며, 그 우수한 성능으로 지금까지도 전도체로서 보편적으로 사용되고 있다. 하지만 최근 기술의 개발로 인해 전자기기 분야에서 더욱더 전기전도도 등의 성능이 우수한 전도체의 수요가 늘어나고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방안으로 최근 각광받고 있는 연구분야는 탄소나노튜브나 그래핀(Graphene)을 이용한 탄소기반의 전도체이다. 그 중 탄소나노튜브는 완벽한 물성과 구조로 인하여 전자/정보통신, 환경/에너지, 의약 등의 산업적 응용 가치가 높은 것으로 판단 되고 있다 [6, 12-15]. 최근 이러한 탄소나노튜브의 이점을 이용하여, 금속과 탄소나노튜브를 합성하는 등 탄소나노튜브 합성물을 제작하여 특성을 개선시키는 연구가 각광받고 있다 [16-26].

본 연구에서는 탄소나노튜브와 금속박막의 복합체를 제작하고, 그 전기적 특성을 분석하여 일반 금속박막의 전기적 특성보다 우수함을 보이고자 한다. 소자제작을 위해 원심분리법으로 bundle 이 제거된 pristine mCNT 를 만든 후, SiO₂ 기판위에 흡착시켰다. 그 후 mCNT 가 흡착된 SiO₂ 기판에 금속을 증착하여 mCNT 금속박막 복합구조를 완성하였다. 소자가 성공적으로

완성되었음을 확인하기 위하여 AFM, Raman spectroscopy 등을 이용하여 확인하였다. 또한 전기전도도를 측정하기 위하여 4-point probe measure 를 상온, 저온에서 실시하였으며, 그 결과 mCNT 와 금속박막의 복합구조기반 소자의 전기전도도가 일반 금속박막에 비하여 향상되었음을 확인할 수 있었다. 이러한 탄소나노튜브-금속 복합체는 차세대 나노 일렉트로닉스에 많은 도움을 줄 수 있을 거라 생각된다.

2.2 실험방법

2.2.1 원심분리를 이용한 pristine mCNT 분리

mCNT bundle 을 분리하기 위해 탄소나노튜브를 원심분리하였다. 실험방법은 다음 그림 [2.1]과 같다 [4]. 첫째, 금속성 95 % 탄소나노튜브 필름(Nanointegris Inc.)을 *o*-dichlorobenzene (*o*-DCB) 용액에 0.05 mg/mL 농도로 분산시켰다. 둘째, 분산된 탄소나노튜브 용액을 평균 원심가속도 30,000 G 에서 10 분간 원심분리기(Hitachi, CS 120GXL)로 회전시켰다. 이때 원심분리튜브가 *o*-DCB 용액에 녹는 것을 방지하기 위해 테플론 재질로 만들어진 튜브를 사용하였다. 원심분리 후, 원심분리튜브 내에 아래에는 밀도가 큰 bundle 이 깔리게 되고, bundle 을 비교적 이루지 않아서 떠있는 용액의 윗부분의 1/3 만 추출하여 사용하였다.



[그림 2.1] 원심분리를 이용한 pristine mCNT 용액 추출 [4].

2.2.2 4-probe point measurement 를 위한 소자

제작

단순히 금속을 올렸을 때와, bundle 이 제거된 pristine mCNT 가 아래에 흡착된 경우를 비교하기 위해 샘플을 두 개 준비하였다. mCNT 를 흡착한 방법은 다음과 같다. 원심분리 후의 pristine mCNT(0.05mg/mL)를 24 시간 담근 후, *o*-dichlorobenzene 을 이용하여 린싱하였다. 보통 탄소나노튜브 용액을 assembly 하는 시간(~1 분)보다 긴 시간을 담갔는데, 그 이유는 원심분리기를 이용하면서 mCNT 용액의 농도가 많이 줄었기 때문이다.

이렇게 mCNT 가 도포된 SiO₂ 기판과 아무런 처리를 하지 않은 SiO₂ 기판 두 개를 동시에 thermal evaporator 를 이용하여 금속 Pd 와 Au 를 순차적으로 증착 시켰다. Au 의 두께 별로 전기 전도도를 비교하기 위해서 Pd 는 5 nm 로 모든 소자의 두께가 같고, Au 는 5 nm, 7.5 nm, 10 nm, 12.5 nm, 15 nm 로 각각 증착시켰다. 증착된 금속은 4-probe measure 을 위하여 그림 [1.2]와 같은 모양으로 제작되었으며, 이때 Shadow mask 를 이용하였다.

2.2.3 전기적 특성 측정

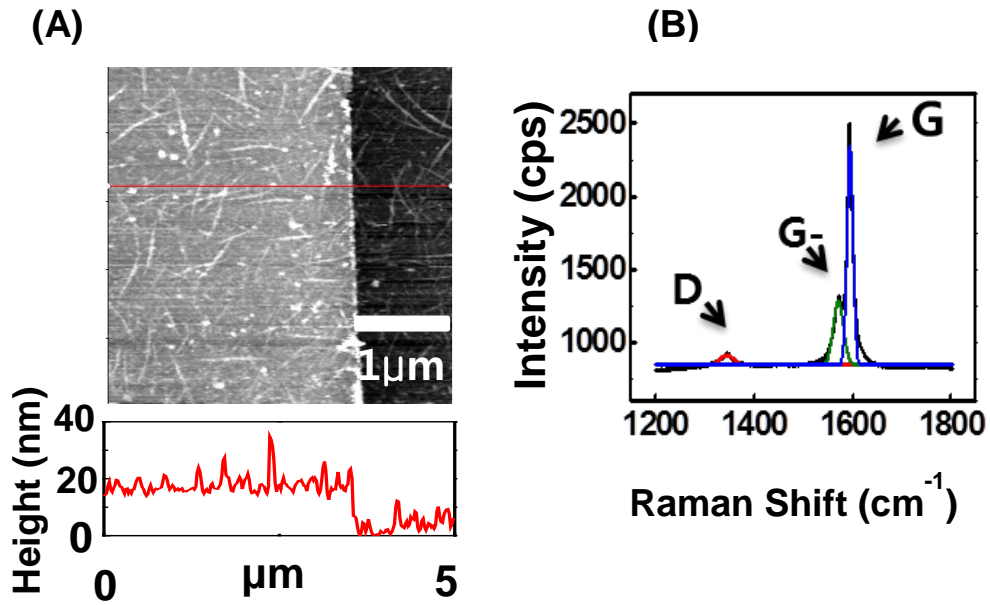
제작된 소자의 전기적 특성은 Semiconductor Characterization System(Kiethly, 4200-SCS)를 이용하여 측정하였다. 소자는 Au 의 두께 별로(5 nm, 7.5 nm, 10 nm, 12.5 nm, 15 nm) 각각 30 개씩 측정하였다. 4-point probe measure 을 위하여 4 개의 프로브를 사용하였으며, 한쪽에서 10 μA , 100 μA 를 흘려주고, 가운데 두 지점에서의 전위차를 측정하여 저항비를 계산하였다.

2.3 실험결과 및 토의

2.3.1 Pristine mCNT 의 성분분석

그림 [2.2] (A)는 purify 된 mCNT(Nanointegris Inc.)를 흡착하고 금속 Pd 5 nm 와 Au 10 nm 를 thermal evaporator 로 증착한 샘플을 Atomic force microscopy 로 측정한 이미지다. 금속이 올라가지 않은 오른쪽과 비교해 보면 대략 ~15 nm 로 Pd(5 nm)와 Au(10 nm)가 잘 올라갔음을 확인할 수 있고, mCNT(Nanointegris Inc.)의 높이는 평균 6nm 정도로 잘 purify 되었음을 알 수 있다 [4].

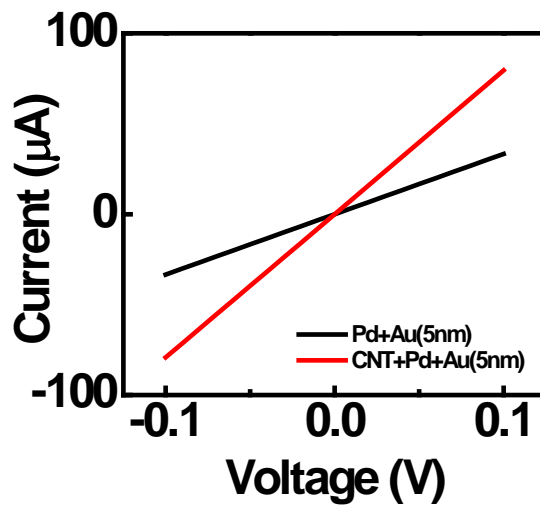
다음 그림 [2.2] (B)는 mCNT(Nanointegris Inc.)를 SiO₂ 기판 위에 흡착해 둔 시료를 Raman spectroscopy 로 측정한 그래프이다. 각각의 peak 을 잘 확인하기 위하여 3 개의 peak 을 Gaussian Distribution 으로 나누었다. 맨 왼쪽의 D-band 가 1300-1400 cm⁻¹ 에 작은 intensity 로 보이고 1600 cm⁻¹ 근처에서 G-band 와 G⁻-band 를 볼 수 있다. Defect 을 의미하는 요소인 D-band 의 Intensity 가 매우 작게 나와있는 걸로 보아 깨끗한 mCNT 가 SiO₂ 표면에 흡착되어 있음을 알 수 있다 [5,6].



[그림 2.2] Pristine mCNT 용액의 성분분석. (A) mCNT 가 흡착된 SiO₂ 표면 위에 금속을 증착한 샘플의 AFM Image. (B) mCNT 가 흡착된 SiO₂ 표면의 Raman 데이터.

2.3.2 전류-전압 특성 비교

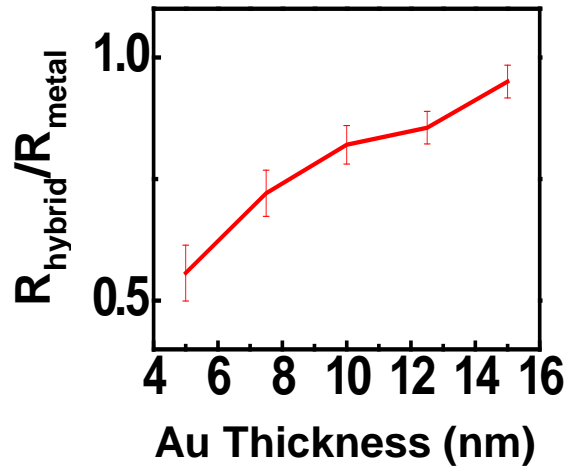
그림 [2.3]은 일반 금속박막과 금속과 mCNT 복합체의 전류-전압 특성을 비교 한 그래프이다. 일반 금속박막과 mCNT 와 금속 복합체, 모두 Pd 5 nm, Au 5 nm 를 thermal evaporator 로 증착하였고, 전압을 -0.1V 에서 0.1V 까지 변화시켜가면서 전류를 측정하였다. 그 결과 일반 금속박막의 전기전도도는 3.3×10^4 S/m, mCNT 와 금속 복합체의 전기전도도는 8×10^4 S/m 로, 일반 금속박막보다 복합체의 전도도가 41% 향상되었음을 확인할 수 있었다.



[그림 2.3] 전류-전압 특성 비교 그래프.

2.3.3 Au 의 두께에 따른 저항

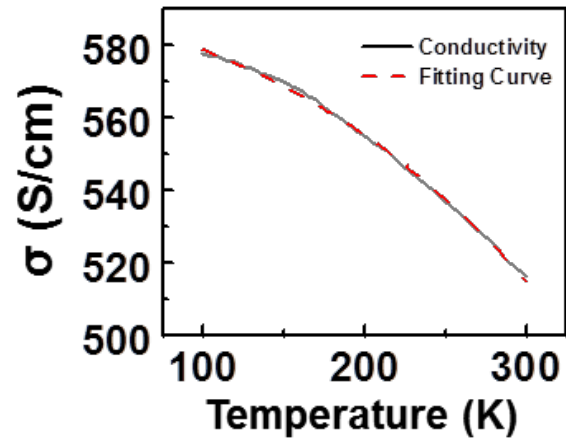
그림 [2.4]은 Au 의 두께에 따른 저항비를 나타낸 그래프이다. mCNT 를 흡착한 SiO₂ 기판과 아무 처리 하지 않은 SiO₂ 기판 위에, 동시에 thermal evaporator 로 Pd(5 nm)를 먼저 올린 후, Au 를 두께별로(5 nm, 7.5 nm, 10 nm, 12.5 nm, 15 nm) 증착하여 두 샘플의 저항을 4-point probe measurement 로 측정하였다. 각 두께 별로 30 개씩 만든 후, 두 샘플의 저항비를 나타내었다. Au 가 가장 얇을 때 두 샘플의 저항의 비가 ~0.5 정도로 mCNT 가 흡착되어 있는 샘플의 저항이 순수 금속만 올라가있는 샘플의 저항보다 두배 가량 낮은 경향성을 보였다. 그림 [2.4]에서 볼 수 있듯이 Au 의 두께가 증가할수록 두 샘플의 저항의 비는 낮아지는 경향성을 보였다. 그 이유로는 낮은 Au 두께에서는, 각각의 좋은 전도성을 갖고 있는 mCNT 가 mCNT 와 금속의 복합체 내에서 훌륭한 current path 역할을 하게 되지만, Au 의 두께가 증가하면 Au 가 current path 로써 dominant 하면서 저항이 비슷해지는 것으로 판단된다 [7,8].



[그림 2.4] Au 의 증착 두께에 따른 저항 비율.

2.3.4 온도변화에 따른 전도도의 변화

그림 [2.5]는 온도에 따른 mCNT 와 금속의 복합체의 전도도의 변화를 나타낸 그래프이다. mCNT 와 금속의 복합체를 상온에서부터 온도를 낮추면서 저항을 4-point probe measurement 로 측정하였다. 그리고 저항값을 전도도로 바꾼 후, 그래프로 나타낸 것이 검정색 선이고, 전도도 식 $\sigma(T) = \sigma(0) + mT^{1/2} + BT^{3/2}$ 에 fitting 한 것이 붉은 line 이다. 위 식에 fitting 했을 때, m 값은 $-0.27 \text{ Scm}^{-1}\text{T}^{-1/2}$, B 값은 $-2.8 \times 10^{-6} \text{ Scm}^{-1}\text{T}^{-3/2}$ 로 나왔다. 위의 내용이 의미하는 바로 우선, mCNT 와 금속 복합체는 Nominal metal 특성을 갖고 있다는 것을 알 수 있다. 다음으로 첫번째 항은 Residual conductance 를 나타내고, 두번째 항은 electron-electron scattering, 세번째 항은 electron-phonon scattering 을 의미한다. m 값이 B 값에 비해 상당히 큰 값을 나타내는 것으로 보아, mCNT 와 금속의 복합체의 scattering mechanism 이 electron-electron scattering 을 따른다는 것을 알 수 있다 [9-11].



[그림 2.5] 온도에 따른 전도도 변화.

Chapter 3.

결론

이 논문에서 mCNT 와 금속의 복합체가 단순히 금속만 올린 소자보다 전도도가 더 좋음을 확인할 수 있었다. mCNT 는 Raman Spectroscopy 와 AFM 으로 깨끗이 흡착되었음을 확인하였다. 실험결과 Raman 데이터에서 낮은 D-band 로 defect 이 적음을 알 수 있었고, AFM 이미지에서 mCNT 의 직경이 평균 6nm 정도로 bundle 이 제거되었음을 알 수 있었다.

또한 mCNT 가 흡착된 SiO₂ 표면 위에 Pd 와 Au 를 순차적으로 증착하였고, 그렇게 만들어진 복합체를, mCNT 가 없는, 같은 두께의 금속만 올라간 샘플과 저항을 비교하였다. 저항을 측정할 때는 접촉저항을 무시할 수 있도록 4-point probe measurement 를 이용하였고, Au 의 각 두께 별로 30 개씩 측정하였다. 실험결과 Au 가 낮은 두께로 증착될 수록 복합체의 저항이 금속만 증착된 샘플보다 현저히 낮음을 확인할 수 있었다. 이 연구결과는 CNT 와 금속을 섞어서 전극으로 사용하는 등 다양하게 응용이 가능할 것으로 보인다.

Reference

- [1] R. Satio, G. Dresselhaus and M. S. Dresselhaus., *Physical Properties of Carbon Nanotubes*, Imperial College Press (1998).
- [2] H. Dai., *Carbon Nanotubes: Synthesis, Integration, and Properties*, *Acc. Chem. Res.*, **35**, 12 (2002).
- [3] F. Banhart., *Interactions between metals and carbon nanotubes: at the interface between old and new materials*, *Nanoscale*, **1**, 201–213 (2009)
- [4] J. Kim, D. Hong, H. Lee, Y. Shin, Y. Khang, M. Lee, S. Hong., *Large Scale Assembly of Pristine Semiconducting Carbon Nanotube Network-Based Devices Exhibiting Intrinsic Characteristics*, *J. Phys. Chem. C*, **117**, 19721–19728 (2013).

- [5] R. Graupner., *Raman spectroscopy of covalently functionalized single-wall carbon nanotubes*, J. Raman Spectrosc., **38**, 673–683 (2007).
- [6] A. Ferrari, J. Robertson., *Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon*, Phy. Rev. B, **61**, 20 (1999).
- [7] B. Kim, J. Im, B. Lee, M. Sung, K. Heo, J. Bak, Y. Park, S. Hong., *Carbon nanotube-metal nano-laminate for enhanced mechanical strength and electrical conductivity*, Carbon, **49**, 2549–2554 (2011).
- [8] C. Subramaniam, T. Yamada, K. Kobashi, A. Sekiguchi, D. Futaba, M. Yumura, K. Hata., *One hundred fold increase in current carrying capacity in a carbon nanotube-copper composite*, Nat. Comm., **4**, 2202 (2013).
- [9] D. Korn, W. Murer, G. Zibold., *Temperature Dependence of the Electrical Resistivity in Amorphous Metals*, Z. Physik, **260**, 351–360 (1973).

- [10] A. Bid, A. Bora, A. Raychaudhuri, *Temperature dependence of the resistance of metallic nanowires (diameter $\geq 15\text{nm}$): Applicability of Bloch–Gruneisen theorem.*, Phys. Rev. B, **74**, 035426 (2006).
- [11] M. Ahlskog, R. Menon, A. Heeger., *Metal–Insulator transition in oriented poly(*p*-phenylenevinylene)*, Phys. Rev. B, **55**, 11 (1997)
- [12] K. Kim, Y. Zhao, H. Jang, S. Lee, J. Kim, K. Kim, et al., *Large scale pattern growth of graphene films for stretchable transparent electrodes*, Nature, **457**, 706–710 (2009).
- [13] C. Curtis, J. Ritchie, M. Sailor., *Fabrication of conducting polymer interconnects*, Science, **262**, 2014–2016 (1993).
- [14] M. Halik, H. Klauk, U. Zschieschang, G. Schmid, W. Radlik, W. Weber., *Polymer gate dielectrics and conducting–polymer contacts for high–performance organic thin–film transistors*, Adv. Mater, **14**, 1717–1722 (2002).

- [15] R. Murali, K. Brenner, Y. Yang, T. Beck, J. Meindl., *Resistivity of graphene nanoribbon interconnects*, IEEE Electron Device. Lett., **30**, 611–613 (2009).
- [16] H. Peng, M. Jain, D. Peterson, Y. Zhu, Q. Jia., *Composite carbon nanotube/silica fibers with improved mechanical strengths and electrical conductivities*, Small, **4**, 1964–1967 (2008).
- [17] J. Bak, Y. Kim, S. Hong, B. Lee, S. Lee, J. Jang, et al., *High frequency micromechanical resonators from aluminium carbon nanotube nanolaminates*, Nat. Mater., **7**, 459–463 (2008).
- [18] A. Aliev, J. Oh, M. Kozolv, A. Kuznetsov, S. Fang, A. Fonseca, et al., *Giant-stroke, superlastic carbon nanotube aerogel muscles*, Science, **323**, 1575–1578, (2009).
- [19] E. Kymakis, G. Amaratunga., *Single-wall carbon nanotube/conjugated polymer photovoltaic devices*, Appl. Phys. Lett., **80**, 112–114 (2002).

[20] P. Ajayan, J. Tour., *Materials science : nanotube composites*, Nature, **447**, 1066–1070 (2007).

[21] J. Li, Q. Ye, A. Cassell, H. Ng, R. Stevens, J. Han, et al., *Bottom-up approach for carbon nanotube interconnects*, Appl. Phys. Lett., **82**, 2491–2493 (2003).

[22] K. Koo, H. Cho, P. Kapur, K. Saraswat., *Performance comparisons between carbon nanotubes, optical and Cu for future high-performance on chip interconnect applications*, IEEE Trans. Electron Devices, **54**, 3206–3215 (2007).

[23] M. Guo, J. Chen, J. Li, B. Tao, S. Yao., *Fabrication of polyaniline/carbon nanotube composite modified electrode and its electrocatalytic propert to the reduction of nitrite*, Anal. Chim. Acta., **512**, 71–77 (2005).

[24] S. Zheng, J. Hu, L. Zhong, W. Song, L. Wan, Y. Guo., *Introducing dual functional CNT networks into CuO nanomicrospheres toward*

superior electrode materials for lithium-ion batteries, Chem. Mater., **20**, 3617–3622 (2008).

[25] T. Laha, S. Kuchibhatla, S. Seal, W. Li, A. Agarwal., *Interfacial phenomena in thermally sprayed multiwalled carbon nanotube reinforced aluminum nanocomposite*, Acta. Mater., **55**, 1059–1066 (2007).

[26] S. Bakshi, V. Singh, S. Seal, A. Agarwal., *Aluminum composite reinforced with multiwalled carbon nanotubes from plasma spraying of spray dried powders*, Surf. Coat. Technol., **203**, 1544–1554 (2009).