전기장 특성과 전극 형상이 다중벽 탄소나노튜브 정렬에 미치는 영향

권세훈 · 정영근 · 정창식^a · 강명창 · 이형우*

부산대학교 하이브리드소재솔루션 국가핵심연구센터(NCRC), “부산대학교 기계공학부

The Effect of Electrical Characteristics and Electrode Shape on Alignment of Multi-walled Carbon Nanotubes

Se-Hun Kwon, Young Keun Jeong, Changsik Jung^a,
Myung Chang Kang, and Hyung Woo Lee*

National Core Research Center for Hybrid Materials Solution, Pusan National University,
Busan 609-735, Republic of Korea

^aSchool of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Republic of Korea
(Received July 12, 2010; Revised July 28, 2010; Accepted August 10, 2010)

Abstract In this paper, the effect of electrical characteristics and electrode shape on the alignment and attachment of multi-walled carbon nanotubes (MWNTs) has been studied. The attraction and alignment of MWNTs between the gaps has been investigated by applying electric field which is called electrophoresis and dielectrophoresis. According to the frequency of electric field, positive or negative dielectrophoretic force can be determined. The concentration of MWNTs solution was 5 $\mu\text{g/ml}$, and a droplet of 1.0~1.5 μl was dropped between two electrodes. Through the repeated experiments, the optimal electrical conditions for aligning and attaching MWNTs in the desired places were obtained. Since the frequency range of 100 kHz~10 MHz generated positive dielectrophoretic force, MWNTs were attracted and aligned between the gaps with this frequency range. For generating enough force to attract MWNTs, the appropriate voltage range was 0.3~1.3 $\text{V}_{\text{rms}}/\mu\text{m}$. Furthermore, the effect of electrode shape on the alignment of MWNTs was investigated. A single MWNT attachment was accomplished on the round shaped with 70% yield.

Keywords : Electric field, Dielectrophoresis, Multi-walled carbon nanotubes, Electrical characteristics, Electrode shape

1. 서 론

탄소나노튜브는 완벽한 물성과 구조로 인하여 전자정보통신, 환경, 에너지 및 의학 분야로 산업적 응용성의 기대가 큰 소재이며, 향후 나노 과학을 이끌고 갈 중요한 기반 요소로 많은 기대를 모으고 있다. 1991년 Iijima에 의해 처음 알려진 탄소나노튜브는 그 독특한 전기적, 물리적, 화학적, 기계적 특징 때문에 마이크로 나노 공학 분야에서 많은 각광을 받고 있는 물질 중 하나이다[1]. 탄소나노튜브를 이용한 DNA, 단백질과 같은 바이오 물질에 대한 연구는 원

자 수준에서의 관찰과 특성에 대한 분석과 이해를 통해 예전에 접근하기 어려웠던 분자생물학의 많은 영역을 발전시켜 왔으며, 메모리, logic circuit, 그리고 각종 첨단 센서에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[2-7]. 최근에는 에너지의 중요성이 그 어느때보다 부각되면서 신재생에너지에 관한 연구[8]가 시급히 요구되고 있는 상황이다. 이러한 많은 나노 기술에 대한 연구의 중심에는 탄소나노튜브라는 나노 물질이 자리잡고 있다.

탄소나노튜브는 다른 나노 물질과 비교하여, 고종횡비(high aspect ratio), 강성(strength), 전도성(electrical

*Corresponding Author : [Tel : +82-51-510-3160; E-mail : LHW2010@pusan.ac.kr]

conductivity) 등 매우 독특한 특성을 가진다. 이런 독특하고 특별한 탄소나노튜브만의 특징 때문에 탄소나노튜브는 나노 기술의 기초적인 연구뿐만 아니라, 많은 응용 분야에도 널리 이용되고 연구되어지고 있다. 하지만, 이 작은 물질을 어떻게 원하는 곳에 위치하도록 하느냐는 탄소나노튜브를 이용한 소자 제작과 같은 응용기술 실현에 있어서 매우 중요한 부분이다. 탄소나노튜브를 정렬 시키는 기술로 원자힘 현미경(Atomic Force Microscopy) 팁을 이용한 직접 조작하는 기술과 화학기상증착법(chemical vapor deposition) 등 몇몇 정렬 방법이 소개되었다[9-11]. 하지만, 나노 사이즈의 작은 물질을 직접 조작하기에는 시간적으로 매우 비효율적이며, 직접 탄소나노튜브를 성장시키는 방법은 소자 제작에 있어서의 공정상 제약을 받는다.

본 논문에서는 탄소나노튜브를 부착시키고자 하는 부분에 전기장을 형성하여 유전영동 힘(dielectrophoretic force)을 이용하여 탄소나노튜브를 정렬, 부착시킨다. 실험을 통해 정렬이 잘 이루어지는 전기장 조건을 알아보도록 한다. 또한, 전극 형상에 따라 탄소나노튜브 정렬 현상을 알아보도록 한다.

2. 실험방법

본 연구에서는 탄소나노튜브를 정렬하여 부착하는 방법으로 전기장을 이용하려고 한다. 양 전극 사이에 교류(ac)나 교류(ac)+직류(dc) 전원을 가하면 유전영동(Dielectrophoresis)과 전기영동(Electrophoresis)이 발생한다. 그림 1은 전기장의 균일 유무에 따른 중성

입자와 대전입자(Charged particle)의 운동을 나타낸다. 그림 1(a)는 균일한 전기장에서의 중성입자와 대전입자의 움직임을 나타내는 것으로, 대전입자는 반대 극성의 전극으로 전기장 라인을 따라 움직인다. 하지만, 중성입자는 입자 내에서 극화만 일어난다. 이러한 결과로 입자에 토크가 발생할 수도 있지만 어느 한쪽 전극으로 끌려가지는 않는다. 그림 1(b)는 균일하지 않은 전기장에서의 중성입자와 대전입자의 움직임을 나타낸 것이다. 대전입자는 균일한 전기장과 마찬가지로 반대 극성의 전극으로 전기장의 라인을 따라 움직인다. 하지만, 중성입자의 경우 입자 내에서의 전하는 균등하나 전기장이 균등하지 않으므로 전기장의 세기가 강한 곳으로 끌려간다. 이것이 유전영동(Dielectrophoresis)이며 작용하는 힘을 유전영동 힘(Dielectrophoretic force)이라 한다. 탄소나노튜브가 원통형의 모양을 이루고 있으므로, 원통형의 물질에 대한 유전영동 힘은 식 (1)과 (2)와 같이 나타낼 수 있다[12].

$$F_{DEP} = \frac{\pi r^2 l \epsilon R e[K(\omega)] |\nabla E_0|^2}{6} \quad (1)$$

$$K(\omega) = \frac{\epsilon_p^* - \epsilon_m^*}{\epsilon_p^* + 2\epsilon_m^*} \quad \epsilon^* = \epsilon - i\frac{\sigma}{\omega} \quad (2)$$

여기서, F_{DEP} 는 유전영동 힘, r 은 물질의 반경, l 은 물질의 길이, E 는 교류 전원 사용 시 발생하는 전기장 세기의 R.M.S. 값을 나타낸다. 또, 식 (3.2)의 $K(\omega)$ 는 complex 형태의 클라우셔스-모조티(Clausius-Mossotti) 함수로써 입자(p)와 매개물(m)의 전도율(Conductivity)과 유전율(Permittivity)로 이루어져 있다. 여기서 ω 는 각주파수로서 $\omega = 2\pi f$ 로 나타낸다.

Fig 1. Behaviors of neutral and charged bodies in (a) an uniform electric field and (b) a nonuniform electric field.

Fig. 2. 80% purified multi-walled carbon nanotubes powder.

주파수의 크기에 따라 유전영동 힘은 positive 또는 negative로 결정된다. 식 (1)에서 알 수 있듯이, 길이가 긴 물질의 경우 균일하지 않은 전기장 내에서 큰 유전영동 힘을 받기 때문에 길이가 작은 물질에 비해 강한 힘으로 빨리 정렬될 수 있다.

본 실험에서는 Iijin社에서 만든 다중벽 탄소나노튜브를 사용하였다. 그림 2는 실험에 사용하기 위해 Iijin社에서 80% 정제한 탄소나노튜브를 보여주고 있다. 사용된 탄소나노튜브의 평균 길이는 10 μm 이며 평균 직경은 15~20 nm이다. 탄소나노튜브 용액 농도와 실험 시 두 전극 사이에 투여하는 탄소나노튜브 용액의 농도는 5 $\mu\text{g/ml}$ 로 고정하였으며, 실험 시 전극 사이에는 1.0~1.5 μl 의 탄소나노튜브 용액을 투여하였다.

전기장을 이용한 탄소나노튜브의 정렬, 부착시키는 실험을 위해 전극을 만들고, 프로브 스테이션(Probe Station)과 오실로스코프(Oscilloscope)를 연결하였다. 두 전극 사이에 연결된 오실로스코프를 통해 두 전극 사이에 탄소나노튜브의 부착 여부를 확인하고자 한다. 간단한 MEMS 공정을 통해 금속 전극을 제작하였다. 실리콘 웨이퍼 위에 절연층 역할을 하는 SiO_2 를 1500Å의 두께로 증착한 다음, 전극으로 알루미늄(Al)이나 금(Au)을 패터닝 하였다. 실험에서는 2~4 μm 의 갭을 가지는 전극을 사용하였다.

전원은 교류 전원만 가했으며, 0~1.9 $\text{V}_{\text{rms}}/\mu\text{m}$ 를 인가하였을 때 탄소나노튜브의 정렬 및 부착 현상을 관찰하였다. 주파수에 있어서는 저주파수(10 Hz)에서 고주파수(20 MHz) 영역까지 인가되는 전압의 주파

수를 변화시켜 탄소나노튜브의 정렬 및 부착 정도를 알아보았다.

3. 결과 및 고찰

본 논문에서는 탄소나노튜브의 정렬 및 부착에 있어서 최적의 전기적 조건을 찾고 그 특성을 알아보고자 한다. 탄소나노튜브의 정렬에 크게 영향을 미치는 요소로 주파수, 전압의 크기, ac/dc ratio, 탄소나노튜브 용액 농도, 그리고 실험 시 두 전극 사이에 떨어뜨리는 탄소나노튜브 용액의 양을 들 수 있다[10].

주파수의 변화는 유전영동에 있어서 매우 중요한 역할을 차지한다. 식 (1)과 (2)에서 보였듯이, 인가되는 전압의 주파수에 따라 유전영동 힘이 positive 또는 negative로 결정한다. 주파수에 따른 탄소나노튜브의 정렬 및 부착 정도를 알기 위한 실험이므로 인가되는 전압은 0.8 $\text{V}_{\text{rms}}/\mu\text{m}$ 로 고정하였다. 그림 3은 주파수에 따른 탄소나노튜브 정렬 및 부착 결과를 SEM(Scanning Electron Microscope) 이미지로 보여 주고 있다. 그림에서 보이듯이, 저주파 영역인 100 Hz까지는 탄소나노튜브가 거의 존재하지 않음을 확인할 수 있으며, 1 kHz 이상에서 탄소나노튜브가 전극 사이에 존재함을 알 수 있다. 하지만, 100 kHz 이상에서 탄소나노튜브가 정렬되고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 특이한 점은 주파수가 증가하면서 탄소나노튜브도 어느 정도 증가하다가 20 MHz에서 많이 줄어든 결과를 얻었다. 실험 결과를 통해 100 kHz~10 MHz 범위에서 다중벽 탄소나노튜브가 정렬됨을 알 수 있었다. 또한, 100 kHz 이하, 20 MHz 이상에서 유전영동 힘이 negative를 띄어서 탄소나노튜브를 밀어내어 원하는 곳에 정렬할 수 없는 것으로 확인되었다.

전압의 크기는 탄소나노튜브의 부착에 직접적인 영향을 미치는 요소이다. 두 전극 사이에 떨어뜨리는 탄소나노튜브 용액의 농도는 5 $\mu\text{g/ml}$ 로 고정하였으며, 실험 시 전극 사이에는 1.0~1.5 μl 의 탄소나노튜브 용액을 떨어뜨렸다. 또한 인가되는 전압의 주파수는 주파수 실험을 통해 얻어진 범위의 중간점인 5 MHz를 인가하였다. 그림 4는 전압의 크기에 따른 탄소나노튜브 정렬 및 부착 실험 결과를 보여준다. 그림에서 보이듯이, 0.1 $\text{V}_{\text{rms}}/\mu\text{m}$ 까지는 탄소나노튜브가 거의 끌려오지 않음을 확인할 수 있다. 0.3

Fig. 3. Carbon nanotube alignment and attachment according to frequency of (a) 10 Hz, (b) 100 Hz, (c) 1 kHz, (d) 10 kHz, (e) 100 kHz, (f) 1 MHz, (g) 10 MHz and (h) 20 MHz [13].

Fig. 4. Carbon nanotube alignment and attachment according to voltage of (a) $0.0V_{rms}/\mu m$, (b) $0.1 V_{rms}/\mu m$, (c) $0.3 V_{rms}/\mu m$, (d) $0.5 V_{rms}/\mu m$, (e) $0.7 V_{rms}/\mu m$, (f) $0.9 V_{rms}/\mu m$, (g) $1.3 V_{rms}/\mu m$ and (h) $1.6 V_{rms}/\mu m$ [13].

Fig. 5. Carbon nanotube alignment and attachment according to dc/ac ratio of (a) only ac, (b) 0.2, (c) 0.4, (d) 0.6, (e) 0.8, (f) 1.0, (g) 1.4 and (h) only dc.

$V_{rms}/\mu m$ 이상부터 탄소나노튜브가 정렬되기 시작함을 알 수 있다. $1.3 V_{rms}/\mu m$ 이상에서는 탄소나노튜브가 전극 사이로 끌려와 정렬이 되지만 그래파이트(Graphite)나 계면활성제(Surfactant)와 같은 많은 불순물들도 끌려와 부착됨을 확인 할 수 있었다. 이러한 불순물들은 구조물의 원하는 곳에 탄소나노튜브를 부착함에 있어서 문제점으로 작용한다. 본 실험을 통해 $0.3 \sim 1.3 V_{rms}/\mu m$ 값에서 탄소나노튜브가 끌려와 부착됨을 확인하였다. 또한 너무 높은 전압은 탄소나노튜브 뿐 아니라 불순물도 같이 끌려오게 함으로 탄소나노튜브를 원하는 곳에 정렬하기 위해서는 범위 내의 전압 인가가 요구된다.

전기적 요소 중 마지막으로 ac, dc, ac+dc 전원에 대한 탄소나노튜브의 정렬 현상에 대해 알아보았다. 교류 전원에 대한 직류 전원의 비율을 $0 \sim \infty$ 로 변화시켜 AC와 DC 전압에 의한 영향을 살펴보았다. 인가되어 지는 전압의 크기는 $0.8 V_{rms}/\mu m$ 로 하였으며 주파수는 5 MHz를 가하였다. 그림 5에서 보듯이, 교류 전원만 인가하였을 때 탄소나노튜브가 전극 사이에 잘 정렬됨을 볼 수 있다. 비율이 $0 \sim 0.6$ 내에서 어느 정도 끌려와 정렬됨을 볼 수 있지만, 비율이 증가함에 따라 정렬도가 떨어짐을 볼 수 있으며 비율이 0.8 이상에서는 교류 전원에 의한 현상보다 직류 전원 성분이 강하여 탄소나노튜브가 끌려오기는 하나 정렬이 잘 이루어지지 않음을 볼 수 있다. 직류 성분은 탄소나노튜브를 끌려오게 하는 힘을 가지고 있지만 정렬에는 문제점을 나타내었다. 결과에서 보듯이 교류 성분만으로도 탄소나노튜브를 끌려오게 할 수 있으며 또한 정렬 효과도 볼 수 있다. Positive 유전영동 힘을 이용하여 다중벽 탄소나노튜브를 전극 사이에 정렬, 부착할 수 있는 전기적 특성은 주파수는 100 kHz~10 MHz, 전압 크기는 $0.3 \sim 1.3 V_{rms}/\mu m$ 범위임을 알 수 있었다(그림 6).

이렇게 얻어진 전기적 조건 범위 내에서, 전극의 형상이 탄소나노튜브 정렬 및 부착에 어떠한 영향을 미치는가에 대해 알아보기 위해 세 가지 형상의 전극(sharpened, round, and rectangular electrodes)에 대해 실험하였다. 실험을 위한 전기적 조건으로 그림 6에서 보인 정렬 및 부착 가능한 범위 내에서 두 전극 사이에 인가하였다. 그림 6은 탄소나노튜브가 정렬되고 부착될 수 있는 전기적 조건 범위를 보여주지만, 하나의 탄소나노튜브를 원하는 곳에 부착시키

Fig. 6. Possible range of frequency and voltage for carbon nanotube alignment and attachment.

기 위해서는 최적의 전기적 조건을 찾아야 한다. 전기적 조건 범위를 찾는 실험과 마찬가지로, 탄소나노튜브 용액의 농도는 $5 \mu g/ml$ 로 하였으며, 실험 시 전극 사이에 떨어뜨리는 양은 $1.0 \sim 1.5 \mu l$ 로 하였다.

그림 7은 날카로운 형상의 전극에 대한 실험 결과를 보여준다. 그림 7(a)~(c)는 $0.8 V_{rms}/\mu m @ 100 kHz$, 5 MHz, 20 MHz의 전압을 인가했을 때의 결과이다. 그림에서 보듯이 정렬이 잘 이루어지지 않음을 확인할 수 있다. 그림 (d), (e), (f)는 전기적 조건을 $0.3 V_{rms}/\mu m$ 로 낮춰 봤지만 하나의 탄소나노튜브가 연결된 실험 결과를 얻지 못하였다.

그림 8은 둥근 형상의 전극에 대한 실험 결과를 보여준다. 그림 8(a)~(c)는 $0.8 V_{rms}/\mu m @ 100 kHz$, 5 MHz, 20 MHz의 전압을 둥근 형상의 전극에 인가했을 때의 결과이다. 그림에서 보듯이 탄소나노튜브가 두 전극 사이를 연결하고 있지만, 많은 탄소나노튜브가 연결되고 있음을 확인할 수 있다. 하지만, 그림 8(e)에서 보이듯이 $0.3 V_{rms}/\mu m @ 5 MHz$ 의 전압을 가했을 경우 두 전극 사이에 하나의 탄소나노튜브가 연결된 결과를 얻을 수 있었다. 이렇게 얻어진 전기적 조건을 가지고 30개의 시편에 반복 실험한 결과를 SEM으로 확인한 결과, 70%의 수율(Yield)로 두 전극 사이에 하나의 탄소나노튜브를 부착한 결과를 얻을 수 있었다.

그림 9는 직사각형 형상의 전극에 대한 정렬 및 부착 실험을 한 결과이다. 앞선 실험과 마찬가지로

Fig. 7. FE-SEM images for sharpened electrode $0.8 \text{ V}_{\text{rms}}/\mu\text{m}$ @ (a) 100 kHz, (b) 5 MHz, (c) 20 MHz and $0.3 \text{ V}_{\text{rms}}/\mu\text{m}$ @, (d) 100 kHz, (e) 5 MHz and (f) 20 MHz.

Fig. 8. FE-SEM images for round electrode $0.8 \text{ V}_{\text{rms}}/\mu\text{m}$ @ (a) 100 kHz, (b) 5 MHz, (c) 20 MHz, and $0.3 \text{ V}_{\text{rms}}/\mu\text{m}$ @, (d) 100 kHz, (e) 5 MHz and (f) 20 MHz.

$0.8 \text{ V}_{\text{rms}}/\mu\text{m}$ @5 MHz의 전기적 조건에서 많은 탄소 나노튜브가 정렬, 부착되어 있다. 전압의 세기를 낮추어서 그림 9(e)와 같은 결과를 얻을 수 있었지만, 하나의 탄소나노튜브가 정렬, 부착된 결과는 얻을 수 없었다.

세가지 형상에 대한 여러 가지 전기적 조건에 대해 실험한 결과, 식 (1)에서의 전기장의 변화

(Gradient of electric field)가 최소가 되는 영역에 탄소나노튜브가 머물 확률이 높을 것으로 예상되었으며 날카로운 형상보다 둥근 형상이 보다 안정된 전기장을 형성함으로 하나의 탄소나노튜브가 정렬, 부착됨을 알 수 있다. 직사각형 형상의 경우 전기장의 변화가 최소가 되는 영역이 매우 넓으므로 하나의 탄소나노튜브가 정렬, 부착되기보다 많은 탄소나노튜브

Fig. 9. FE-SEM images for rectangular electrode $0.8 \text{ V}_{\text{rms}}/\mu\text{m}$ @ (a) 100 kHz, (b) 5 MHz, (c) 20 MHz and $0.3 \text{ V}_{\text{rms}}/\mu\text{m}$ @, (d) 100 kHz, (e) 5 MHz and (f) 20 MHz.

가 두 전극 사이에 부착된다. 주파수의 경우 고주파와 저주파에서 탄소나노튜브가 존재하지 않는 결과로 그 영역에서 유전영동 힘이 negative 영역일 것으로 사료된다. 또한, 날카롭거나 직사각형 형상의 전극보다 둥근 형태의 전극이 하나의 탄소나노튜브 정렬 및 부착에 매우 효과적인 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 나노 물질 중, 그 전기적, 화학적, 기계적 독특한 특성 때문에 IT, NT, BT 등 여러 첨단 연구에 있어서 요소 물질로 알려져 있는 탄소나노튜브의 정렬 및 부착 방법에 대한 연구를 하였다.

다중벽 탄소나노튜브를 두 전극 사이에 정렬, 부착시키기 위해, 노광 작업을 통해 두 전극을 가지는 샘플을 제작하여 전기장을 이용한 탄소나노튜브의 정렬 및 부착 가능성을 알아보았다. 전기적 특성이 탄소나노튜브의 정렬 및 부착에 미치는 영향을 알아보기 위해, 탄소나노튜브 용액의 농도는 $5 \mu\text{g}/\text{ml}$ 로 하였으며, 두 전극 사이에 투여하는 용액의 양은 $1.0 \sim 1.5 \mu\text{l}$ 로 고정시켰다. 주파수 범위의 경우, 100 kHz 이하, 20 MHz 이상에서 유전영동 힘이 negative를 띄어 탄소나노튜브를 밀어내므로, 100 kHz~20 MHz 범위에서 다중벽 탄소나노튜브가 정렬됨을 알 수 있었

다. 전압의 경우, 낮은 전압에서는 탄소나노튜브를 끌어올 충분한 힘을 발생시키지 못하였으며, 또한 너무 높은 전압은 탄소나노튜브 뿐 아니라 불순물도 같이 끌려오는 결과를 보였다. 실험을 통해, $0.3 \sim 1.3 \text{ V}_{\text{rms}}/\mu\text{m}$ 값에서 탄소나노튜브가 두 전극 사이로 끌려와 정렬, 부착됨을 확인할 수 있었다. DC/AC 비율에 있어서는 0~0.6 내에서 탄소나노튜브가 끌려와 정렬됨을 볼 수 있지만, 비율이 증가함에 따라 정렬도가 떨어짐을 볼 수 있었다. 본 연구를 통해 교류 전원만으로도 탄소나노튜브가 충분히 정렬, 부착됨을 알 수 있다.

또한, 탄소나노튜브가 정렬 가능한 전기적 조건 범위 내에서 전극 형상이 탄소나노튜브 정렬에 미치는 영향을 알아보았다. 유전영동 힘은 전기장의 변화 (Gradient of electric field)가 최소가 되는 영역에서 최소가 되어, 탄소나노튜브가 끌려와서 머물 확률이 높기 때문에 날카롭거나 직사각형 형상의 전극보다 둥근 형상의 전극에서 보다 안정된 전기장을 형성함으로 하나의 탄소나노튜브가 정렬, 부착됨을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단을 통해 교육과학기술부의 선도연구센터육성사업 학제간융합 분야(NCRC)(2010-0008-276)와 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에

의하여 연구되었습니다.

참고문헌

- [1] S. Iijima: Nature, **354** (1991) 56.
- [2] T. Rueckes, K. Kim, E. Joselevich, G. Y. Tseng, C. Cheung and C. M. Lieber: Science, **289** (2000) 94.
- [3] M. J. Biercuk, M. Mason and C. M. Marcus: Nano Lett., **4** (2004) 1.
- [4] A. Bachtold, P. Hadley, T. Nakanishi and C. Dekker: Science, **294** (2001) 1317.
- [5] J. Kong, N. R. Franklin, C. Zhou, M. G. Chapline, S. Peng, K. Cho and H. Dai: Science, **287** (2000) 622.
- [6] K. Besteman, J. Lee, F. G. M. Wiertz, H. A. Heering and C. Dekker: Nano Lett., **3** (2003) 727.
- [7] H. W. Lee, S. H. Kim, C. S. Han and Y. K. Kwak: Rev. Sci. Instrum., **76** (2005) 046108.
- [8] M. W. Rowell, M. A. Topinka, H. Prall, G. Dennler, N. S. Sariciftci, L. Hu, G. Gruner and M. D. McGehee: Appl. Phys. Lett., **88** (2006) 233506.
- [9] A. M. Cassell, N. R. Franklin, T. W. Tombler, E. M. Chan, J. Han and H. Dai: J. Am. Chem. Soc., **121** (1999) 7975.
- [10] J. Liu, M. J. Casavant, M. Cox, D. A. Walters, P. Boul, W. Lu, A. J. Rimberg, K. A. Smith, D. T. Colbert and R. E. Smalley: Chem. Phys. Lett., **303** (1999) 125.
- [11] K. Yamamoto, S. Akita and Y. Nakayama: J. Phys. D: Appl. Phys., **31** (1998) L34.
- [12] H. A. Pohl, Dielectrophoresis: The behavior of neutral matter in nonuniform electric field, Cambridge university press, 1978.
- [13] S. Kwon, S. H. Kim, K. H. Kim, M. C. Kang, and H. W. Lee: Trans. Nonferrous Met. Soc. China, accepted.