

## 다이하프램 구조를 이용한 탄소나노튜브 가스 센서의 가스 감응 특성

조우성\* · 문승일\* · 김영조\*\* · 박정호\* · 주병권†

### Gas sensing characteristics of carbon nanotube gas sensor using a diaphragm structure

Woo-Sung Cho\*, Seung-Il Moon\*, Young-Cho Kim\*\*, Jung-Ho Park\*, and Byeong-Kwon Ju†

#### Abstract

The micro-gas sensor based on carbon nanotubes (CNTs) was fabricated and its gas sensing characteristics on nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>) have been investigated. The sensor consists of a heater, an insulating layer, a pair of contact electrodes, and CNT-sensing film on a micromachined diaphragm. The heater plays a role in the temperature change to modify sensor operation. Gas sensor responses of CNT-film to NO<sub>2</sub> at room temperature are reported. The sensor exhibits a reversible response with a time constant of a few minutes at thermal treatment temperature of 130 °C.

**Key Words :** gas sensor, carbon nanotube, nitrogen dioxide, recovery

## 1. 서 론

나노물질에 대한 관심은 지난 몇 년 동안 빠르게 증가해왔다. 특히, 탄소나노튜브는 많은 응용 잠재력에 의해서 새로운 물질로써 제안되었다<sup>[1]</sup>. 현존하는 전기적 센서의 물질들에는 반도체 성질을 가지는 산화물<sup>[2,3]</sup>, 실리콘 소자<sup>[4,5]</sup>와 전도성 폴리머<sup>[6]</sup>등이 있다. 반도체 성질의 산화물은 이산화질소와 암모니아를 검출하는 가장 널리 사용되고 있지만, 이러한 센서들은 산화물과 가스 분자 사이의 화학적 반응을 향상시키기 위해 높은 동작 온도(200~600 °C)를 요구한다. 또한 전도성 폴리머들은 이산화질소를 검출하기 위해 사용되고 있지만, 매우 높은 초기 저항(10 GΩ 이상)으로 인하여 센서 감도에 한계를 가지고 있다. 최근, 탄소나노튜브를 기본으로 하는 가스 센서<sup>[7-14]</sup>들은 넓은 표면적, 화학적 안정성, 상온에서의 가스 흡착성, 나노 크기의 직경 등의 탄소나노튜브의 특성에 의해서 주목받고 있다. 기존

연구에서 알려진 가스 센서로써 탄소나노튜브의 응용 가능성은 하나의 단일벽 탄소나노튜브와 단일벽 탄소나노튜브로 이루어진 매트 형태로 나누어져 있다<sup>[7]</sup>. 하나의 단일벽 탄소나노튜브를 소자에 적용하기 위한 제작 공정에는 어려움이 많고, 탄소나노튜브의 특성에 크게 영향을 받아 재현성이 떨어지기 때문에, 단일 탄소나노튜브에 크게 영향을 받지 않는 탄소나노튜브로 이루어진 매트 형태에 대한 관심이 모아지고 있다. 이러한 결과로부터 수-ppm 농도의 이산화질소(NO<sub>2</sub>), 오존(O<sub>3</sub>), 일산화탄소(CO)와 같은 산화 가스들을 검출하기 위한 가스 센서로써 탄소나노튜브의 응용성을 이끌어냈다. 그러나 탄소나노튜브는 가스 흡착 후 탈착에 의한 초기값으로 돌아오는 회복 시간이 어떠한 처리없이 상온 상태에서 수십 시간(~12시간)이 걸릴 정도로 매우 길다는 문제점을 가지고 있다<sup>[15]</sup>. 이러한 까닭에 가스 센서에 적용하기 위해선 탄소나노튜브의 완전한 가스 탈착이 이루어지는 시간을 줄이고 동시에 일정한 회복 특성을 갖도록 하는 것이 중요하다.

이에 본 논문에서는 센서의 흡탈착 특성을 개선시키기 위해, 다이하프램<sup>[16,17]</sup> 위에 히터, 접촉 전극쌍과 열화학기상증착법<sup>[18]</sup>으로 선택적 수직 성장된 탄소나노튜브 감지막이 통합되어 있는 센서를 제작하였다. 통합된 구조와 탄소나노튜브 성장 공정을 다룬 후에, 이산화질소에 노출되었을 때 센서의 특성을 측정하였다.

고려대학교 전기공학과(Department of Electrical Engineering, Korea University)

\*고려대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Korea University)

\*\*청운대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Chungwoon University)

†Corresponding author: bkju@korea.ac.kr

(Received : August 29, 2005, Accepted : September 12, 2005)

## 2. 실험 방법

### 2.1. 다이아프램이 포함된 구조체 제작

면적이  $3 \times 3 \text{ mm}^2$ 이고 두께가  $450 \mu\text{m}$ 인 실리콘 기판은 뒷면을 식각하여 면적이  $1.5 \times 1.5 \text{ mm}^2$ 이고 두께가  $20 \mu\text{m}$ 인 다이아프램을 형성하였다. 다이아프램 면적 안에 크롬(Cr) 히터, 전극, 절연막과 면적이  $1.05 \times 1 \text{ mm}^2$ 인 탄소나노튜브 감지막이 위치한다. 그림 1은 센서의 모식도와 패키징된 실제 센서 사진을 보여주고 있다. 센서 제작 공정은 그림 2와 같다.

- (1) 양면 가공된 p형 웨이퍼 위에 열산화 공정으로  $\text{SiO}_2$ 를 1 성장시키고, 그 위에 저압 화학기상증착

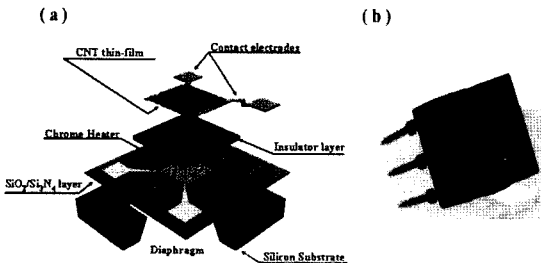


그림 1. (a) 탄소나노튜브 가스 센서의 모식도 (b) 패키징된 가스 센서  
Fig. 1. (a) Schematic of the CNT gas sensor (b) Packaged gas sensor.

- 법(LPCVD, Low Pressure Chemical Vapor Deposition)으로  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 를 증착 하였다[그림 2의 (b)].
- (2) 히터 위에 절연막의 평탄화를 위해서  $\text{SiO}_2$ 를 플라즈마 화학기상증착법(PECVD, Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition)으로 증착하고, 반응성 이온 식각(RIE, Reaction Ion Etching)공정으로 히터 패턴을 형성하였다[그림 2의 (c)].
- (3) 형성된  $\text{SiO}_2$  박막 위에 RF-스퍼터링법으로 크롬(Cr)을 증착하고 lift-off 공정으로 저항성 크롬(Cr) 히터를 형성하였다[그림 2의 (d)].
- (4) 히터와 전극 및 탄소나노튜브 감지막의 전기적 절연을 위해  $\text{SiO}_2$ 를 플라즈마 화학기상 증착법(PECVD)으로 증착하고, 패턴을 형성 후 반응성 이온 식각으로  $\text{SiO}_2$  절연막을 형성하였다[그림 2의 (e)].
- (5) 촉매 금속 코발트(Co)는 RF-스퍼터링법으로 8 nm 증착하고, lift-off 공정으로 형성하였다[그림 2의 (f)].
- (6) 크롬(Cr) 전극은 RF-스퍼터링법으로 증착하고, lift-off 공정으로 형성하였다[그림 2의 (g)].
- (7) 웨이퍼 뒷면에  $\text{CF}_4$  가스를 이용한 반응성 이온 식각 공정으로 실리콘을 식각하기 위한  $\text{Si}_3\text{N}_4$  식각창을 형성한 후에, 식각액인 수산화칼륨(KOH)를 사용하여 두께  $20 \mu\text{m}$ 의 다이아프램을 형성하였다[그림 2의 (h)].

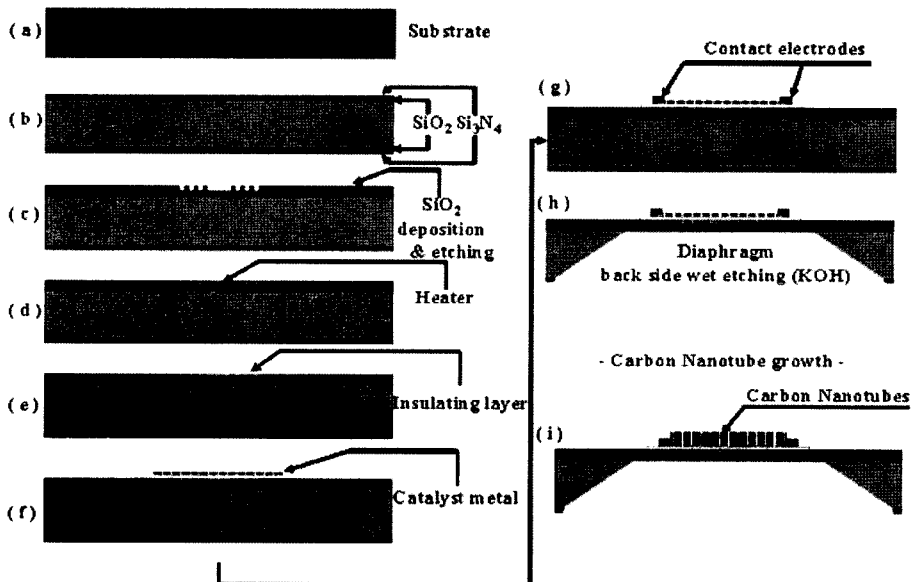


그림 2. 탄소나노튜브 가스 센서 제작 공정  
Fig. 2. Fabrication process of MWCNT gas sensor.

(8) 최종적으로, 탄소나노튜브 감지막은 열 화학기상 증착법<sup>[18]</sup>에 의해서 합성한다[그림 2의 (i)]. 열 화학기상증착법은 생성물이나 원료가 다양하고, 고순도 물질을 합성하기에 적합 하며, 미세구조를 제어할 수 있고, 대면적, 선택적 성장이 가능하여 폭넓게 사용되고 있는 합성법이다. 아르곤(Ar)/수소(H<sub>2</sub>)분위기 하에 아세틸렌(C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>)과 촉매 금속(Cobalt)을 이용하여 합성하였다. 제작된 구조체를 열 화학기상증착장치의 반응로 안쪽에 석영판 위에 올려놓고 10<sup>-3</sup> torr 진공을 형성시킨 후에 헬륨램프에 의해 10분 동안 빠르게 750 °C까지 상승시켰다. 이 과정 동안, 촉매 금속의 표면을 활성화하고, 반응로 안에 잔존 가스에 의한 촉매 금속과 전극의 산화를 막기 위해서 반응로 내부를 수소 분위기로 형성시켰다. 합성하는 동안에, 반응로의 총 압력은 20 torr, Hydrocarbon 원료인 아세틸렌(C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) 가스의 유량은 5 sccm이고, 암모니아(NH<sub>3</sub>)가스의 유량은 80 sccm으로 일정하게 유지하였다. 탄소나노튜브 합성 후에, 반응로는 상온에 도달할 때까지 수소와 아르곤을 혼합하여 계속해서 주입하였다.

2.3. 가스 센서 성능 시험 시스템

센서를 밀폐된 챔버에 넣고, 건조한 공기 속에 이산화질소 농도가 10, 50, 100 ppm으로 혼합된 혼합 가스를 사용하여 센서의 저항 변화를 측정하였다. 그림 3은 제작된 가스 센서의 측정 시스템을 보여주고 있다. 이산화질소를 측정하기 위한 주챔버, 이산화질소를 주챔버에 주입하기 전에 가스를 모아두는 보조 챔버, 챔버 안의 이산화질소를 제거해주기 위한 진공펌프, 센서의 저항

변화를 측정하는 Keithley 2400 series source measure meter, 저항 데이터를 모으기 위한 컴퓨터, 마이크로 히터에 전압을 인가할 전압원으로 구성되어 있다.

측정 전에 30분 동안 챔버 안의 가스를 배출하고, 탄소나노튜브 안에 화학적 분자들을 제거하기 위해서 크롬(Cr) 히터를 사용하여 3분 동안 130 °C 온도를 유지하였다. 상온에서 산소, 일산화탄소, 질소, 습기 등과의 다른 가스 분자의 흡착에 의한 센서의 영향을 제거하고, 측정된 이산화질소를 배출하기 위해서, 챔버 내부의 분위기를 진공 상태에서 이산화질소 분위기로, 이산화질소 분위기에서 진공 상태로 변화시키면서 센서의 저항 변화를 측정하였다. 챔버 내부 분위기가 이산화질소에서 진공 상태로 변화할 때(센서가 초기값으로 회복될 때) 증착된 탄소나노튜브 감지막에 히터를 사용하여 130 °C, 3분 동안 가열하고 다시 상온으로 온도를 내리는 열처리 방법을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

두 개의 평행하게 패턴된 전극 사이에 포토리소그래피 공정에 의해서 패턴링된 얇은 코발트 촉매층 위에 선택적 수직 성장한 탄소나노튜브 감지막을 형성시켰다.

그림 4는 제작된 센서의 표면과 합성된 탄소나노튜브 감지막에 대한 FE-SEM 이미지를 보여주고 있다. 감지막의 선포는 20 μm이고, 탄소나노튜브의 직경과 길이는 각각 30-40 nm와 3-4 μm이다. 탄소나노튜브는 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/NH<sub>3</sub>/Ar 분위기 하에 5분동안 750 °C에서 8 nm의 두께를 가지는 코발트 촉매 위에 성장되었다. 밝게 보이는 부분은 정렬된 탄소나노튜브를 나타낸다. 탄소나

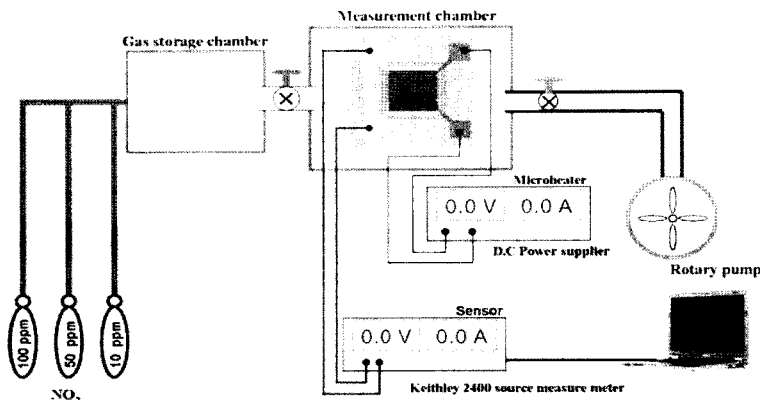


그림 3. 측정 시스템 개략도

Fig. 3. Schematic of flow system used for measuring the sensitivity of sensor.

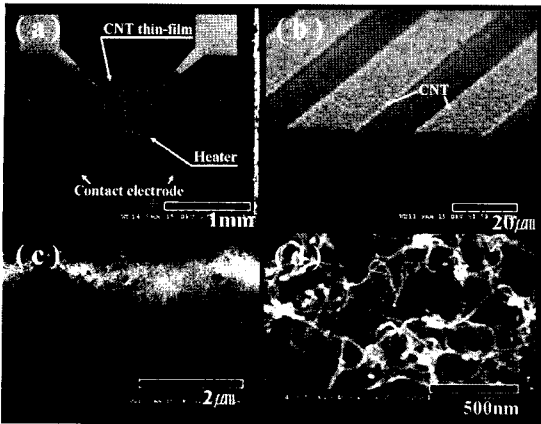


그림 4. 제작된 센서의 FE-SEM 사진; (a) 센서 표면 (b) 센서 단면 (c) 탄소나노튜브 감지막 단면 (d) 탄소나노튜브 감지막 표면

Fig. 4. FE-SEM images of fabricated CNT gas sensor; (a) Top view of the sensor (b) Cross sectional view of the sensor (c) Cross sectional view of the MWCNT thin-film (d) Top view of the MWCNT thin-film.

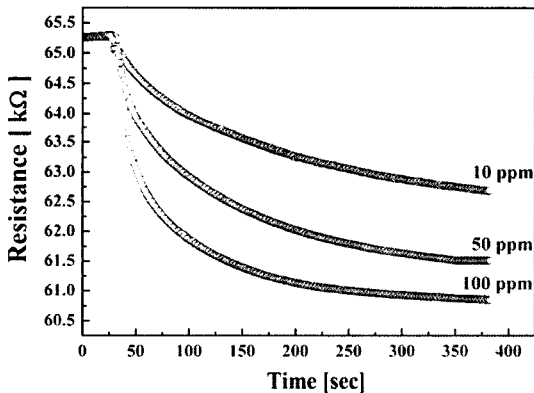


그림 5. 10에서 100 ppm 사이의 이산화질소 농도에 대한 센서의 저항 변화

Fig. 5. Electrical resistance variation of sensor at NO<sub>2</sub> concentrations between 10 and 100 ppm.

노튜브 꼭대기에 존재하는 촉매 nano particle의 전도도에 의해서 탄소나노튜브는 밝게 나타난다.

그림 5는 10, 50, 100 ppm의 이산화질소에 대한 저항 변화를 보여주고 있다. 초기 저항 R<sub>0</sub>는 진공 상태에서 열처리 방법을 적용한 후에 측정된 저항값으로 약 65.25 kΩ를 나타내었다. 센서의 저항 변화율 ΔR은 R<sub>0</sub>/R로 정의하였다. 여기서 R은 이산화질소에 노출되었을 때의 센서 저항이다. 표 1은 각 농도별 센서의 저항 변화율을 보여주고 있다. 이산화질소 100 ppm에서, 센서

표 1. 농도별 센서 저항 변화율

Table 1. According to the concentrations, the resistance change rate of the sensor

저항 변화율 ΔR		
100 ppm	50 ppm	10 ppm
1.04	1.06	1.073

의 저항은 2분 동안에 65.25~60.84 kΩ (ΔR≒1.07)로 감소하였다. 이산화질소에 대한 저항 변화는 p형 반도체 이론에 의해서 설명되어질 수 있다. 전자 억셉터에 노출되었을 때, 전하는 p형 반도체에서 전자 억셉터 쪽으로 이동한다. 그런 까닭에, 이산화탄소와 이산화질소와 같은 전자를 억셉터하는 가스들은 탄소나노튜브의 페르미 레벨을 가전자대쪽으로 이동시키는 결과를 발생시킨다. 따라서 탄소나노튜브 안에 정공 캐리어들이 증가하게 되고 이로 인해 탄소나노튜브의 저항이 감소한다.

한 개의 반도체성 탄소나노튜브를 이용한 센서인 경우에는 이산화질소 200 ppm에서 저항 변화율 ΔR≒1000에 달하나, 매트 형태의 탄소나노튜브를 이용한 센서의 경우에는 저항 변화율이 ΔR≒1.5로 나타난다<sup>[7]</sup>. 이러한 현상은 크게 두 가지 측면으로 해석할 수 있다. 첫째, 열 화학기상증착법에 의해서 증착된 탄소나노튜브 감지막 내부에 금속성과 반도체성 탄소나노튜브가 모두 존재하고 있으며, 이 중 금속성 탄소나노튜브가 대다수를 차지하며, 그 사이에 반도체성 탄소나노튜브가 넓게 퍼져 존재하는데 기인하여 이산화질소와 상호 작용하여 센서의 특성을 결정하는 반도체성 탄소나노튜브의 밀도 변화와 금속성 탄소나노튜브와의 전기적 상호 작용에 의해 발생한다. 둘째 탄소나노튜브 감지막 내부의 튜브들 사이에 간격이 매우 작아 가스 분자들이 침투하여 존재할 확률이 매우 낮아진다. 이에 따라 가스 분자와의 상호반응에 참여할 수 있는 탄소나노튜브의 표면적이 감소하여 발생한다<sup>[1,7,13]</sup>. 제작된 센서는 저항 변화율에 있어서 패턴을 가지는 매트 형태의 탄소나노튜브 감지막을 사용하였지만, 매트 형태의 탄소나노튜브 감지막과 큰 차이를 나타내지 않았다.

그림 6은 챔버로부터 이산화질소가 배출되는 동안 시간 대 저항 변화를 보여주고 있다. 여기서 R<sub>0</sub>는 가스 배출 후에 저항 변화를 나타낸다. 내부에 있는 그래프는 다이아프램의 활성 영역 온도 대 히터에 제공되는 인가 전력을 보여주고 있다. 공기 중에서, 활성 영역은 약 0.18 °C/mW의 열효율을 나타내었다. 활성 영역은 다이아프램 위에 탄소나노튜브 감지막이 존재하는 면적을 나타낸다. 활성 영역 온도는 써머커플을 사용하여

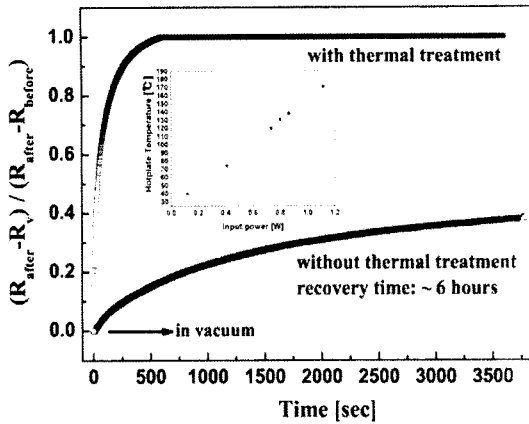


그림 6. 센서의 회복 시간  
Fig. 6. Recovery time of sensor.

측정되었다. 전체 저항 ~90%를 나타내는 시간을 회복 시간으로 정의하였다. 열처리 방법을 적용하지 않았을 경우에 느린 회복이(~6시간) 관찰되었지만, 열처리 방법을 적용한 경우에는 빠르게 회복(~10분)되는 것을 확인할 수 있었다.

탄소나노튜브와 반응 가스와의 상호반응은 물리적 흡착에 기인하기 때문에, 이론적 계산에 의하면 가스 탈착에 의한 회복 시간은 가스가 흡착되어 반응하는 시간과 거의 유사하다<sup>[6,14]</sup>. 그러나 위의 결과에서 알 수 있듯이, 회복하는데 상당한 시간(~6시간)을 소비하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 탄소나노튜브에 이산화질소가 흡착되는 동안에, 일산화질소(NO)와 이산화질소(NO<sub>2</sub>)의 약한 결합에 의한 낮은 확산 장벽은 강한 결합 에너지를 가지고, 탄소나노튜브 표면에 긴 시간동안 존재하는 삼산화질소(NO<sub>3</sub>)를 생성할 가능성이 있다고 가정하면, 이렇게 생성된 삼산화질소(NO<sub>3</sub>)가 가스 탈착 시간을 증가시켜 최종적으로 긴 회복 시간을 필요하게 한다는 것으로 설명할 수 있다<sup>[14]</sup>.

그림 7은 10, 50, 100 ppm의 이산화질소 농도에 대한 이산화질소 노출(sensing) 및 배기(recovery)를 반복적으로 진행했을 때의 시간 대 센서 저항 변화를 보여 주고 있다. 곡선 (i)는 상온에서 이산화질소에 대한 센서 저항 변화를 나타내고 있으며, 곡선 (ii)는 130°C에서 25°C로 냉각되는 동안 이산화질소에 대한 센서 저항 변화를 나타내고 있다.

센서는 감응 주기 동안에 많은 감도 차이를 나타내지 않아, 안정하게 동작하며 또한 재현성을 나타내고 있다는 것을 확인할 수 있었다. 만일 센서에 가열과 냉각의 열적 순환을 25~130°C 유지한다면, 센서의 감응 특성은 항상 되풀이 될 것으로 사료된다.

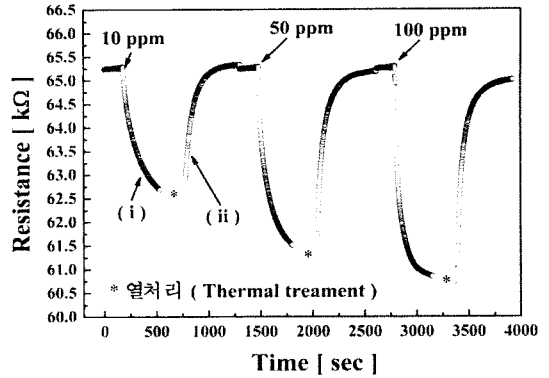


그림 7. 10~100 ppm 농도의 이산화질소에 대한 3주기 동안에 센서 저항 변화 대 시간  
Fig. 7. Resistance changes of the sensor as a function of time under three cycles of a sequence of NO<sub>2</sub> concentrations ranging from 10 to 100 ppm.

#### 4. 결 론

탄소나노튜브 가스 센서는 다이아프램 위에 히터, 집속 전극쌍, 절연막을 포함하는 통합 구조를 제작한 후, 열 화학기상증착법으로 합성된 탄소나노튜브로 이루어진 감지막을 형성하여 구현하였다. 제작된 센서의 특성은 다음과 같다.

(1) 이산화질소는 흡착시 탄소나노튜브의 전자를 빼앗아, 주 정공수가 증가하여 전도도가 증가한다. 따라서 이산화질소는 센서의 저항을 감소시킨다.

(2) 상온 회복보다 선정된 130°C 열처리 방법을 이용하였을 경우에 10분미만의 빠른 회복 시간을 나타내었다. 이것은 단순히 가스 배출에 의한 물리적 작용으로 가스를 빠르게 탈착시킬 수 없기 때문에 더 높은 열에너지를 줌으로써 빠른 가스 탈착이 일어나도록 하였다. 가스 탈착이 빠르게 이루어져, 연속 측정시 우수한 재현성을 보였다.

(3) 다이아프램 위에 히터를 위치시킴으로써 소비전력을 줄이고 약 0.18°C/mW의 열효율을 얻을 수 있었다.

이러한 개선된 특성들에 의해서 센서의 안정성과 재현성이 개선됨으로써 가스 분석을 위한 통합 센서 시스템에 사용되는 센서로서의 가능성을 보여주었다.

#### 감사의 글

본 연구는 2004학년도 청운대학교 학술연구조성비에 의해 수행되었습니다.

## 참고 문헌

- [1] H. Dai, "Carbon nanotubes: synthesis, integration, and properties", *Acc. Chem. Res.*, vol. 35, pp. 1035-1044, 2002.
- [2] Y. Takao, K. Miyazaki, Y. Shimizu, and M. Egashira, "High ammonia sensitive semiconductor gas sensors with double-layer structure and interface electrodes", *J. Electrochem. Soc.*, vol. 141, pp. 1028-1033, 1994.
- [3] 김승렬, 윤동현, 홍형기, 권철한, 이규정, "산화물 반도체형 후막 가스 센서의 이산화질소 감지 특성", *센서학회지*, 제6권, 제6호, pp. 451-457, 1997.
- [4] A. Mandelis and C. Christofides, *Physics, Chemistry, and Technology of Solid State Gas Sensor Devices*. New York: Wiley, 1993.
- [5] O. H. Elibol, D. Morissette, D. Akin, J. P. Denton, and R. Bashir, "Integrated nanoscale silicon sensors using top-down fabrication", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 83, pp. 4613-4615, 2003.
- [6] F. Zee and J. W. Judy, "Micromachined polymer-based chemical gas sensor array", *Sens. Actuators B*, vol. 72, pp. 120-128, 2001.
- [7] J. Kong, N. R. Franklin, C. Zhou, M. G. Chapline, S. Peng, K. Cho, and H. Dai, "Nanotube molecular wires as chemical sensors", *Science*, vol. 287, pp. 622-625, 2000.
- [8] P. Qi, O. Vermesh, M. Grecu, A. Javey, Q. Wang, H. Dai, S. Peng, and K. J. Cho, "Toward large arrays of multiplex functionalized carbon nanotube sensors for highly sensitive and selective molecular detection", *Nano Lett.*, vol. 3, pp. 347-351, 2003.
- [9] S. Santucci, S. Picozzi, F. Di Gregorio, L. Lozzi, C. Cantalini, L. Valentini, J. M. Kenny, and B. Delley, "NO<sub>2</sub> and CO gas adsorption on carbon nanotubes: experiment and theory", *J. Chem. Phys.*, vol. 119, pp. 10904-10910, 2003.
- [10] L. Valentini, L. Lozzi, C. Cantalini, I. Armentano, J. M. Kenny, L. Ottaviano, and S. Santucci, "Effects of oxygen annealing on gas sensing properties of carbon nanotube thin films", *Thin Solid Films*, vol. 436, pp. 95-100, 2003.
- [11] C. Cantalini, L. Valentini, L. Lozzi, I. Armentano, J. M. Kenny, and S. Santucci, "NO<sub>2</sub> gas sensitivity of carbon nanotubes obtained by plasma enhanced chemical vapor deposition", *Sens. Actuators B*, vol. 93, pp. 333-337, 2003.
- [12] K. G. Ong, K. Zeng, and C. A. Grimes, "A wireless, passive carbon nanotube-based gas sensor", *IEEE Sensor J.*, vol. 2, pp. 82-88, 2002.
- [13] O. K. Varghese, P. D. Kichamber, D. Cong, K. G. Ong, and C.A. Grimes, "Gas sensing characteristics of multi-wall carbon nanotubes", *Sens. Actuators B*, vol. 81, pp. 32-41, 2001.
- [14] 김민수, 윤광현, 허중수, "단층 탄소나노튜브의 일산화질소 가스에 대한 감응특성과 열 처리 효과", *센서학회지*, 제13권, 제4호, pp. 137-142, 2004.
- [15] S. Peng, K. J. Cho, P. Qi, and H. Dai, "Ab initio study of CNT NO<sub>2</sub> gas sensor", *Chem. Phys. Lett.*, vol. 387, pp. 271-276, 2004.
- [16] I. Simon, N. Barsan, M. Bauer, and U. Weimar, "Micromachined metal oxide gas sensors: opportunities to improve sensor performance", *Sens. Actuators B*, vol. 73, pp. 1-26, 2001.
- [17] M. Baroncini, P. Placidi, G. C. Cardinali, and A. Scorzoni, "Thermal characterization of a microheater of micromachined gas sensors", *Sens. Actuators A*, vol. 115, pp. 8-14, 2004.
- [18] C. J. Lee, D. W. Kim, T. J. Lee, Y. C. Choi, Y. S. Park, Y. H. Lee, W. B. Choi, N. S. Lee, G. S. Park, and J. M. Kim, "Synthesis of aligned carbon nanotubes using thermal chemical vapor deposition", *Chem. Phys. Lett.*, vol. 312, pp. 461-468, 1999.



**조 우 성**

- 1976년 4월 5일생
- 2002년 2월 청운대학교 전자공학과 졸업(학사)
- 2004년 2월 청운대학교 전자공학과 졸업(석사)
- 2004년~현재 고려대학교 대학원 전자컴퓨터공학과 박사과정
- 주관심분야 : MEMS, 화학 센서, 탄소나노튜브, 전계방출디스플레이



**문 승 일**

- 2000년 2월 청운대학교 전자공학과 졸업(학사)
- 2002년 2월 청운대학교 전자공학과 졸업(석사)
- 2002년 2월~현재 고려대학교 대학원 전자컴퓨터공학과 박사과정
- 주관심분야 : MEMS, 화학 센서, 탄소나노튜브



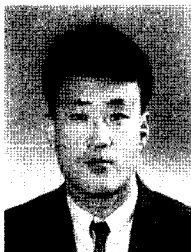
**김 영 조**

- 1989년 2월 서울시립대학교 전자공학과 졸업(학사)
- 1991년 2월 서울시립대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사)
- 1995년 2월 서울시립대학교 대학원 전자공학과 졸업(박사)
- 1995년 2월~현재 청운대학교 전자공학과 교수
- 주관심분야 : MEMS, 디스플레이



**박 정 호**

- 1981년 2월 고려대학교 전자공학과 졸업(학사)
- 1987년 12월 University of Delaware 전자공학과 졸업(박사)
- 1990년 2월 금성사 중앙 연구소 연구실장
- 1990년 3월~현재 고려대학교 전자공학과 교수
- 주관심분야 : 광소자, RF device, Microwave Monolithic IC



**주 병 권**

- 1962년 12월 2일생
- 1986년 2월 서울시립대학교 전자공학과 졸업(학사)
- 1988년 2월 서울시립대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사)
- 1995년 고려대학교 대학원 전자공학과 졸업(박사)
- 1995~2005년 2월 한국과학기술연구원(KIST) 마이크로 시스템 연구 센터 책임연구원
- 2005년 3월~현재 고려대학교 전기공학과 교수
- 주관심분야 : MEMS, 생체진단용 바이오 센서, 나노 소자