

나노선 네트워크에서의 정류다이오드 특성과 1/f 잡음 특성

강병현, 안승언, 김강현, 김남희, 피성훈, 장유진, 성만영, 김규태
고려대학교 전기공학과

Rectifying diode with 1/f noise made of nanowire networks

Byung-Hyun Kang, Seung-Eon Ahn, Kang-Hyun Kim, Nam-Hee Kim, Sung-Hoon Pieh, Yu-Jin Chang,
Man-Young Sung, Gyu-Tae Kim
Department Of Electrical Engineering, Korea Univ.

Abstract

네트워크상태의 탄소나노튜브 나노선과 바나듐 옥사이드 나노선의 전압-전류 특성을 측정하고 음성 전압전류특성과 함께 정류 다이오드 특성을 관측하였다. 정류특성을 Schottky diode 관점에서 분석하였고 나노선을 이용한 다이오드의 이상지수가 10을 초과하는 큰 값을 가짐을 알았다. 2단자 전극상태에서 전류잡음 1/f 잡음형태가 관측되었다.

Key Words : Nanowire, Schottky diode, Carbon nanotube, V_2O_5 nanowire, 1/f noise

1. 서론

1991년 S.Iijima에 의해 탄소나노튜브가 발견된 이래 1차원 나노물질에 대한 연구가 급속히 진행되고 있다 [1]. 이것은 1차원 나노물질이 3차원 물질과 비교하여 양자속박현상(quantum confinement effect)에 기인한 양자효과가 두드러질 수 있는 흥미로운 신물질이며 Bottom-up 방식에 의한 분자 전자소자에 대한 관심을 불러일으킬 수 있는 좋은 소재이기 때문이었다. 1차원 나노물질인 탄소나노튜브는 각각의 지름과 카이럴 정도에 따라 금속과 반도체성질을 갖는 것으로 알려져 있다 [2]. 또한 탄소나노튜브를 이용한 전자소자로서, SET (Single Electron Transistor) [3,4], FET (Field Effect Transistor) [5,6]등의 연구가 보고 되어 있다. 이러한 연구방향은 기존의 반도체 공정과정에서 해결할 수 없는 기술적 한계와 고전적 설계규칙의 한계를 극복할 수 있다는 것에 그 의의가 있다. 예를 들어 기존의 반도체 소자들은 MOSFET의 최소 선폰이 30 nm 이하에서는 관통효과가 두드러져서 Short-Channel 효과가 나타나고 Zener 항복, 단채널효과, 게이트 산화막을 통한 누설전류 문제등의 단점이 나타난다. 이러한 단점들 때문에 Top-down 방식의 소자를 대신할 Bottom-up 방식

의 소자개발 기술의 연구가 활발히 진행되고 있다.

Cees Dekker에 의해 탄소나노튜브가 양자선으로 기능할 수 있음을 보고한 후[5] 1998년 R.Martel에 의해 탄소나노튜브가 반도체로서 트랜지스터와 같은 게이트에 의한 효과가 실험결과로 발표되었고 이후에 많은 연구그룹들에 의해 나노트랜지스터에 대한 연구도 진행되었다. 2000년 V_2O_5 나노선을 이용하여 트랜지스터 효과가 보고된 후 탄소나노튜브 이외의 나노선도 트랜지스터효과를 보인다는 것이 보고 되었다.[7]

또 나노선의 1/f 잡음 (Noise)과 같은 전기적 잡음특성 연구들 통해 전자 소자로서의 신뢰성에 대한 연구가 진행되고 있고, 잡음특성을 통해 나노선에서의 전하 수송원리에 대한 연구도 진행되고 있다.[8, 9] 일반적으로 1/f잡음은 전자소자에서 저주파에서 전자소자의 파라미터를 제한하는 요소로 알려져있다. 본 연구에서는 네트워크 상태의 탄소나노튜브와 V_2O_5 나노선에 전극을 형성시켜 관측된 정류 특성에 대해 분석하고 네트워크 나노선의 전기적 잡음특성을 조사하였다.

2. 실험방법

바나듐 옥사이드 나노선(V_2O_5 nanowire)은 졸-

겔 방법에 의해 Ammonium-vanadate 0.4 g과 Acidic ion exchange resin 4 g을 40 ml의 DI (Deionized water)에 넣어 혼합한 후 상온에서 3일 동안 보관하여 합성하였다.

그림 1은 바나듐 옥사이드 나노선(V_2O_5 nanowire)의 원자현미경 사진이다.

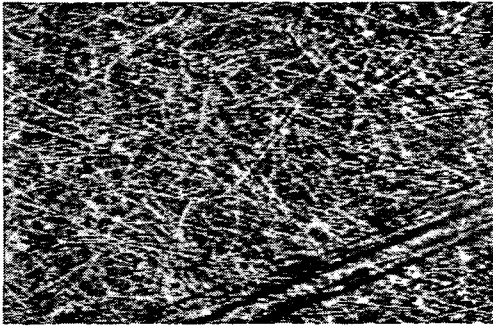


그림 1. 바나듐옥사이드 나노선의 원자현미경 이미지.

탄소 나노튜브(Carbon nanotube)의 경우에는 CVD (Chemical Vapor Deposition)방법에 의해 합성된 MWNT (Multi-wall Carbon nanotube)와 arc-discharge에 의해 합성된 SWNT (Single-wall Carbon nanotube)을 일진 나노텍에서 구입하여 Sodium dodecyl sulfate 0.1% 수용액에 초음파를 가해 분산을 고르게 시켰다. 이렇게 만들어진 액상의 나노선 용액을 기판위에 올리고 나노선을 1시간 동안 흡착 시킨후 기판을 DI water에 씻은 후 건조시켰다. 완전 건조가 된 기판위에 17 μm 두께의 Au선을 올리고 Au를 Thermal Evaporator를 통해 50nm두께로 증착하고 Au선을 제거하여 그림 2와같이 17 μm 의 폭을 갖는 전극을 만들었다.

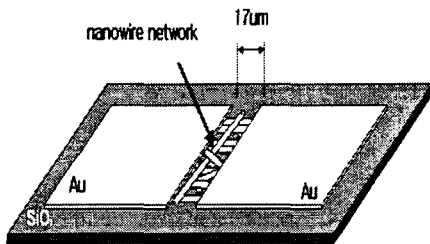


그림 2. 네트워크 나노선과 전극.

그리고 DAQ(National Instrument)와 Preamplifier (5182)를 이용하여 전압을 -1V부터 1V까지 변화시키며 나노선의 전압-전류 특성을 측정하였고 건전지로 바이어스 전압을 가한 상태에서 시간에 대한 전류크기 측정하고 fourier 변환을 하여 저주파에서의 잡음 스펙트럼을 계산하였다.

3.결과 및 고찰

탄소나노튜브, V_2O_5 나노선 네트워크의 전류-전압특성중 그림 3, 4, 5에 나타난 것처럼 대칭적인 전극형태에서 기대되는 대칭적인 전류-전압 특성과는 달리 특이하게도 비대칭적인 전류 특성이 발견되었다.

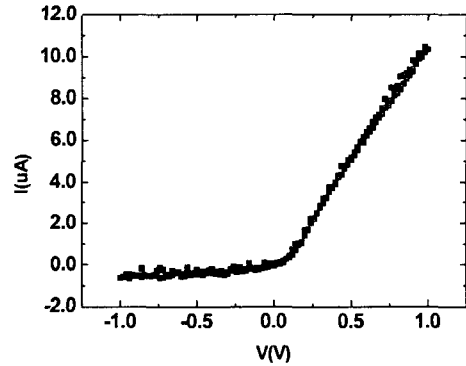


그림 3. V_2O_5 나노선 네트워크의 전압-전류 곡선.

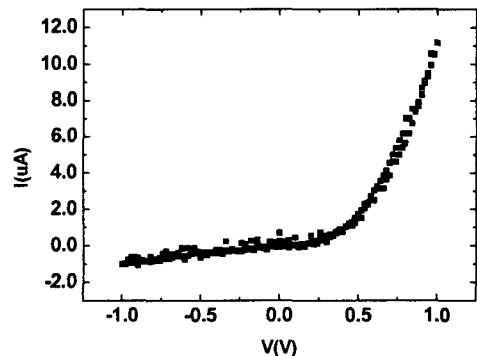


그림 4. MWNT 네트워크의 전압-전류 곡선.

나노선 다이오드가 열여기전도모델에 따른 이상적인 다이오드라면 나노선 다이오드의 전류-전압 특성곡선은 다이오드의 일반식

$I = I_0 [\exp(\frac{qV}{\eta kT}) - 1]$ 을 따르게 되고 이상지수 η 가 1이 될 것이다 [10]. 여기서 I_0 는 역포화 전류를 나타내며 η 는 이상지수를 나타낸다. 다이오드의 전류-전압 관계식에서 $qV \gg k_B T$ 를 만족하는 고전압에서는 $I \approx I_0 \exp(\frac{qV}{\eta kT})$ 로 근사해서 쓸 수 있다. $k_B T (T = 300K) = 1/40$ eV이므로 전압이 약 0.3 V만 되어도 근사식을 사용할 수 있다. y-축을 $\log(I)$ 로 x-축을 전압으로 그리면 직선에 근사될 것이고 $\ln I = \frac{qV}{\eta kT} + \ln I_0$ 의 식에서 알 수 있듯이 $\frac{q}{\eta kT}$ 가 직선의 기울기가 된다. 이 기울기를 통하여 우리는 이상지수의 값을 알 수 있게 되고 y축 절편을 통하여 $\ln I_0$ 값도 알 수 있다. 이렇게 하여 얻은 탄소나노튜브, V_2O_5 나노선 네트워크의 이상지수값을 표 1에 정리해 보았다.

표 1. 나노선과 이상지수(Ideal factor).

나노선	이상지수	이상지수 (저항 직렬모델)
V_2O_5 원액	25.23	18.58
V_2O_5 :DI Water = 1:5	19.6	15.03
V_2O_5 :DI Water = 1:10	29.53	20.6
탄소나노튜브(MWNT)	18.04	13.61
탄소나노튜브(MWNT)	11.06	8.26
탄소나노튜브(SWNT)	13.49	10.24

그림 4와 그림5와 같이 다이오드와 유사한 전류-전압 곡선을 보이는 나노선 네트워크들의 다이오드로서의 이상지수가 1이 아닌 $10 \sim 30$ 까지 여러 가지 값들을 가지고 있지만 공통적으로 10보다 훨씬 큰 값을 가지고 있다. 따라서 전류-전압 곡선의 경향은 다이오드와 유사한 경향을 보이지만 이상적인 다이오드와는 거리가 있음을 알 수 있다.

나노선 자체의 극한길이를 고려한다면 직렬저항의 기여 또한 무시할 수 없음을 고려하여 그림 8과 같이 다이오드와 직렬로 항이 연결된 것으로 생각하여 이상지수도 산출해 보았다.

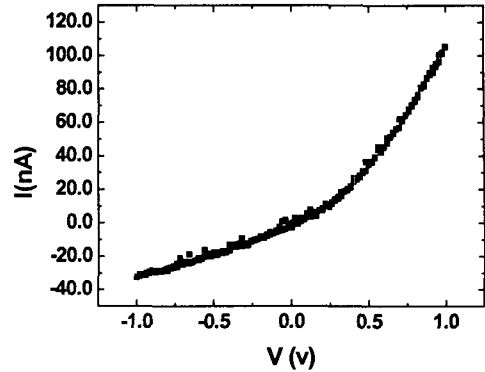


그림 5. SWNT의 전류-전압 곡선.

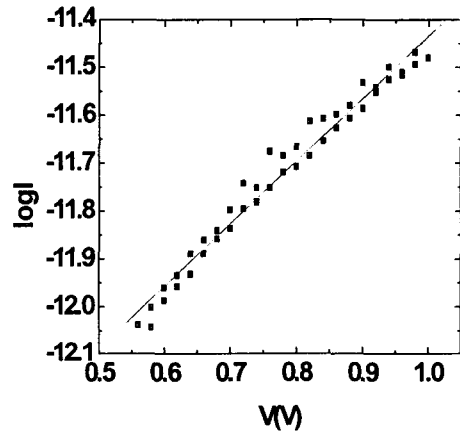


그림 6. 전압과 logI의 관계.

다이오드와 저항이 직렬로 연결되었다고 할 때 전

압분배 법칙에서 $V = IR + \frac{\eta k_B T}{q} \ln(\frac{I}{I_0})$ 로 쓸

수 있으며 양변을 미분했을 때 $\frac{dV}{dI} = R + \frac{\eta k_B T}{qI}$

관계가 만족되어야 함을 알 수 있다. 이 방법을 통해 이상지수를 계산해 봐도 이상지수는 여전히 1보다 큰 값을 알 수 있었고 이상적인 다이오드와는 다른 경향을 보여주고 있음을 볼 수 있다. 네트워크 나노선에 대해서도 문헌에 따르면 일반적으로 음성 접촉 특성을 보여준다고 알려져 있는데 특이하게도 본 실험에서는 쇼트키성 접촉특성을 보여주고 있다.

측정된 탄소나노튜브, 바나듐옥사이드 네트워크 나

노선의 전압-전류 특성을 통해 네트워크된 나노선의 전기적 잡음을 관찰할 수 있는데 그림 8는 네트워크 나노선에서 나타나는 1/f의 모습이다.

노이즈의 Spectral density는 $S(f) \propto \frac{V^2}{f}$ 로 표현되는데 특히 1/f 노이즈는 $S(f) = \frac{1}{f^\gamma}$ 로 표현할 수 있다. 그림8에서 saturation 영역을 나타내지 않았지만 주파수가 1kHz 이상의 고주파 영역에서는 백색잡음(Thermal Noise)과 산탄잡음(Shot Noise) 때문에 saturation 영역이 보일 것이다. 탄소나노튜브, 바나듐옥사이드 네트워크 나노선은 0.01Hz에서 1Hz의 저주파 영역에서 γ 의 값이 0.92에서 1.02 정도의 값을 가져 1Hz이하의 저주파에서는 나노튜브가 1/f 노이즈특성을 보임을 알 수 있다. 표 2는 나노선 네트워크의 종류에 따른 γ 의 값을 보여준다.

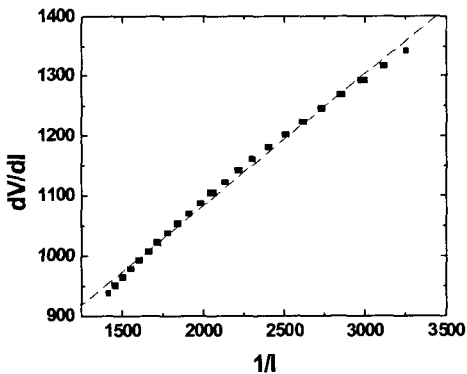


그림 7. 저항 존재 모델에서 1/I와 dV/dI의 관계.

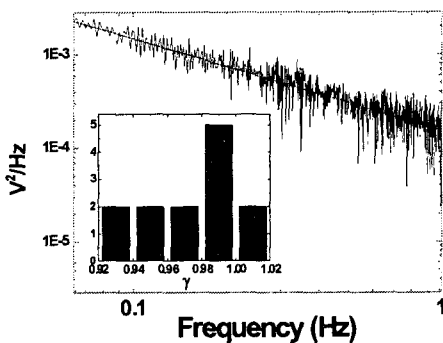


그림 8. 나노선의 1/f노이즈.

표 1. 나노선 종류에 따른 γ 의 값.

나노선 종류	주파수 범위 (Hz)	γ
MWNT on SiO_2	0.07~1.29	0.93~1.00
SWNT on SiO_2	0.06~1.00	0.90
V_2O_5 nanowires on SiO_2	0.07~1.46	0.97~0.99

4. 결론

본 실험 결과로부터 탄소나노튜브나 바나듐 옥사이드 나노선의 전류-전압특성이 정류 다이오드와 유사한 특성을 보이지만 이상지수가 10이상의 값을 갖는 것으로 보아 극단적으로 뾰족한 모양에 의한 결과라고 예측된다. 일반적으로 1차원 쇼트키 접합 다이오드가 사실 한방향 이외의 두방향에 대해서는 무한대로 확장되어 있는 경우임을 고려한다면 나노선과 같은 순수 일차원 선에 형성된 쇼트키 접합다이오드는 다른 경향을 보일 것이 예측되었다.[11] 이와 같이 나노스케일로 내려갈수록 관통현상 때문에 기존 다이오드와는 특성이 달라지는 것을 볼때 나노선이 나노소자로서 과연 그대로 이용가능한지 냉정하게 판단해 볼 필요도 있다고 하겠다. 전기적 잡음에 있어서도 예상되는데로 1/f잡음을 보여주고 있어서 일반적인 현상과 부합된다.

감사의 글

본 연구는 고려대학교 특별연구비에 의하여 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] S. Iijima, "Helical microtubules of graphitic carbon", *Nature*, 354, 56 (1991).
- [2] M.S Dresselhaus, G. Dresselhaus. and P.C. Eklund, *Science of Fullerene and Carbon Nanotubes* (Academic, New York, 1996).
- [3] S. J. Tans, M. Devoret, H. Dai,

- A.Thess,Smalley, L. Geerlings, C. Dekker,
 "Individual single-wall carbon nanotubes as
 quantum wires", *Nature*, **386**, 474
 (1997).
- [4] Marc Bockrath, David H.Cobden, Paul L.
 McEuen, Nasreen G. Chopra, A. Andreas
 Thess, and R. E. Smalley "Single-Electron
 Transport in Ropes of Carbon Nanotubes",
Science, **28**, 1922, (1997).
- [5] S.J.Tans, A.R.M. Verschueren & C.Dekker,
 "Room-temperature transistor based on a
 single carbon nanotube", *Nature*, **393**, 49
 (1998).
- [6] R.Martel, T.Schmidt, H.R.Shea, T.Hertel, and
 Ph. Avouris, "Single- multi-wall carbon
 nanotube field effect transistors" *Appl.*
Phys. Lett. **73**, 2447 (1998).
- [7] G.T.Kim, J.Muster, V.Krstic, J.G. Park,
 Y.W.Park, S. Roth and M. Burghard,
 "Field-effect transistor made of individual
 V2O5 nanofibers", *Appl. Phys. Lett.*, **76**,
 1875 (2000).
- [8] P.G. Collins, M. S. Fuhrer, and A. Zettl, "1/f
 noise in carbon nanotubes", *Appl. phys.*
Lett. **76**, (7), 894 (2000).
- [9] Sh. Kogan "Electronic Noise and
 Fluctuations in Solid", (Cambridge
 University Press)
- [10] E.H.Rhoderick, *Metal-semiconductor*
contacts, (Clarendon Press, Oxford, 1978).
- [11] F. Leonard and J. Tersoff, *Phys. Rev.*
Lett. **83**, 5174 (1999).