

나노선-나노입자 결합에 따른 FETs 전기적 특성 고찰

강정민, 김기현, 정동영, 윤창준, 염동혁, 김상식
고려대학교 전기전자전파공학과

Electronic characteristics of nanowire-nanoparticle-based FETs

Jeongmin Kang, Kihyun Keem, Dong-Young Jeong, Changjoon Yoon, Donghyuk Yeom, Sangsig Kim
Department of Electrical Engineering, Korea University

Abstract - 본 연구에서는 이중 차원 나노선과 나노입자의 결합에 따른 단일 나노선 소자의 전기적 특성 및 메모리 효과를 연구하였다. 열 증착법으로 성장된 p형 Si 나노선에 Atomic Layer Deposition (ALD) 방법으로 10nm의 Al₂O₃를 증착한 후 Low Pressure - Chemical Vapor Deposition (LP-CVD)를 이용하여 Polycrystalline Silicon(Poly-Si)을 Si 나노선 위에 5nm 증착하고 습식 에칭법을 이용하여 poly Si 내의 SiO_x를 제거하여 Si 나노입자를 Si 나노선 위에 형성시켰다. 그 후 포토 리소그래피 공정을 이용하여 Top gate 형태의 나노선-나노입자 이중결합 Field-Effect Transistor (FET) 소자를 제작하여 게이트 전압에 따른 드레인 전류-전압(I_{DS}-V_{DS})의 변화를 측정하여 나노선의 전기 소자로서의 특성을 확인하고, 게이트 전압을 양방향으로 swing 하면서 인가하여 I_{DS} 전류 특성이 변화하는 것을 통해 메모리 효과를 조사하였다. 또한 나노입자의 결합이 게이트 전압의 인가 시간에 따라 드레인 전류에 영향을 미치는 것을 확인하여 메모리 소자로서의 가능성을 확인하였다.

1. 서 론

최근 들어 metal-oxide-semiconductor(MOS)구조를 가지는 nano floating gate memory(NFGM) 소자에 대한 연구가 차세대 비휘발성 메모리로서의 가능성으로 인해 활발해 지고 있다. 그 중 나노 입자를 이용한 NFGM 소자 연구는 기존의 비휘발성 메모리 보다 낮은 동작 전압, 빠른 입출력 속도, 장시간 동작 특성 유지 등의 특성을 가지고 있어 특히 연구가 많이 되고 있다. 또한 반도체 나노선은 기존의 벌크나 에피층 형태의 소자와 비교하여 높은 표면대비부피 비를 가지고 있어 그 전기적 및 광학적 특성이 우수하여 자외선 레이저 [1], LED [2], 가스 센서 [3], 전계효과 트랜지스터 [4], 자외선 광검출기 [5] 등과 같은 광전자 및 전자 소자 분야에서 널리 연구되어왔다. 그러나 나노선을 메모리 소자로 이용하는 분야는 아직까지 연구가 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 나노선을 전하의 이동경로로, 나노 입자를 전하의 저장층으로 이용한 나노선-나노 입자 이중결합 소자를 제작하여 게이트 전압 인가 시간에 따른 전기적 특성 변화를 통한 메모리 효과와, V_{GS}-I_{DS}의 양방향 측정을 통하여 전하가 나노 입자에 저장되는 전기적 특성을 연구하였다.

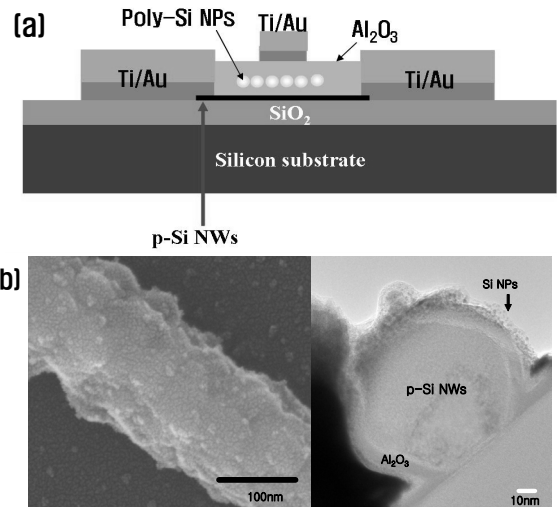
2. 실험

본 연구에서 사용된 Si 나노선은 Si와 p-type 불순물인 Boron을 2000:1의 무게비로 섞은 후 가열로에 집어넣어 Si기판 위에서 Thermal chemical vapor deposition(Thermal CVD) 방법을 이용하여 p-type 으로 성장하였다. 성장된 나노선이 있는 Si 기판을 메탄올 용액에 분산하여 Si 나노선이 섞여 있는 메탄올 용액을 제작하였다. 실리콘 산화막이 300 nm 증착된 4인치 실리콘 기판위에 나노선이 분산된 메탄올 용액을 분산하여 기판위에 나노선을 도포하고 그 위에 atomic layer deposition(ALD) 장비를 이용하여 Al₂O₃를 10nm를 증착하였다. 증착이 완료된 실리콘 기판을 Low Pressure - Chemical Vapor Deposition (LP-CVD)를 이용하여 다결정 Si을 5 nm 증착하였다. 기판을 시편 단위로 나눈 후 각각의 시편에 대해 HNO₃, H₂O, HF를 무게비 50:20:1로 혼합한 용액으로 습식식각공정을 통하여 다결정 Si 내에 있는 SiO_x를 제거하여 Si 나노입자를 형성하였다. 나노선과 나노입자의 이중 결합 형태를 가지게 된 시편을 광사진식각 공정을 통하여 소스와 드레인 전극 패턴을 형성하였다. 소스와 드레인 패턴에 메탈을 올리기에 메탈과 나노선간의 접촉을 좋게 하기 위해 H₃PO₄ 용액을 이용하여 55 °C에서 30 초간 Si 나노선 표면의 Al₂O₃를 식각하였으며 Si 나노선 표면의 자연 산화막을 제거하기 위하여 BOE를 이용하여 25 °C에서 30초간 식각하여 나노선 표면의 자연 산화막을 제거하였다. 이후 전극은 thermal

evaporator를 이용하여 Ti/Au (50 nm / 50 nm)를 증착하여 형성하였다. 다시 ALD 공정을 통하여 게이트 전극을 올리기 위해 Al₂O₃ 25 nm 두께의 산화물 층을 증착하고, 광사진 식각공정을 통하여 나노선 중앙 부분에 top-gate 형태의 패턴을 형성한 후 thermal evaporator를 이용하여 게이트 전극을 형성하여 Top-gate 형태의 단일 나노선 FET 소자를 제작하였다. 이렇게 제작된 소자는 Semiconductor analyzer measurement (HP 4155C)와 Probe station을 이용하여 전기적인 특성을 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

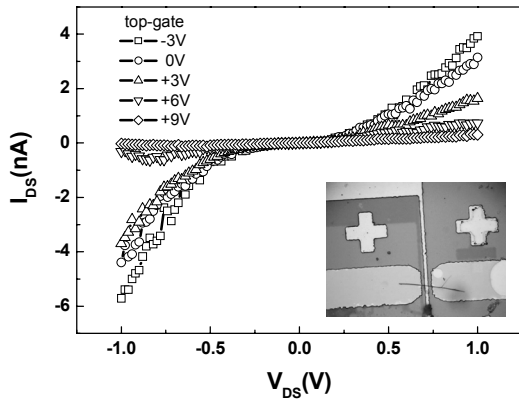
그림 1. (a)는 본 연구에 사용된 이중결합 나노선-나노 입자 구조를 이용해 제작한 소자의 모식도이다. 모식도에 표시된 구조가 실제로 구현된 것을 Field Emission Scanning Electric Microscopy (FE-SEM; JEOL JSM-6700F)과 High Resolution Tunneling Electric Microscopy(HR-TEM; FEI Technai 300)를 이용하여 Si 나노 입자가 p-type Si 나노선 위에 형성된 것을 확인하였다.



〈그림 1〉 (a) 나노선-나노입자 결합의 단일 나노선 소자의 모식도 (b) p-Si 나노선과 Si 나노입자의 SEM 이미지와 HR-TEM 이미지

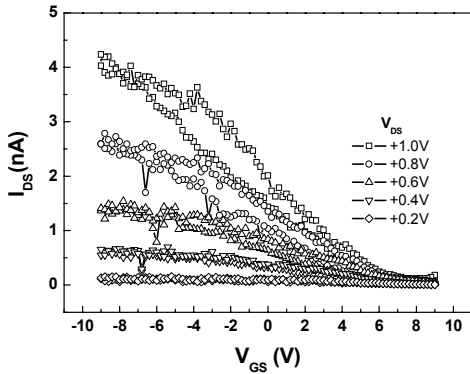
그림 1(b) FE-SEM 결과에서 보듯 Si 나노선 주위에 Si 나노 입자가 서로 구별할 수 있게 형성 되어 있는 것을 확인하였고 제작된 소자의 단면 HR-TEM에서도 보듯이 나노선 주위에 균일하게 증착된 Al₂O₃위에 Si 나노입자가 형성되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 또한 나노입자가 3~4 nm의 크기를 가지고 있는 것도 확인할 수 있었다. 모식도에서 보는 것처럼 Si 나노 입자는 나노선/Al₂O₃/나노입자/Al₂O₃의 형태로 나노선 위에만 일정하게 형성된 것을 확인할 수 있었다.

그림 2는 게이트 전압의 변화에 따른 드레인 전류-전압(I_{DS}-V_{DS}) 결과이고 내부에 표시된 것은 본 실험에 사용된 소자의 광학현미경 사진이다. V_{DS} -1 V ~ +1 V, V_{GS} 0 V 일 때 드레인 전류의 크기는 -6 nA 에서 4 nA임을 확인할 수 있었으며, 게이트 전압 -3 V ~ +9 V까지 +3 V 단계로 증가시킬 때 -3 V에서 채널이 완전히 차단되고, 게이트 전압의 증가함에 따라 드레인 전류가 증가함을 보여 본 실험에서 사용된 나노선이 p형 성질을 가지는 나노선임을 확인하였다.



<그림 2> 나노선-나노입자 결합의 단일 나노선 소자의 게이트 전압에 따른 I_{DS} - V_{DS} 특성 곡선 (제작된 소자의 광학현미경(x1200) 사진)

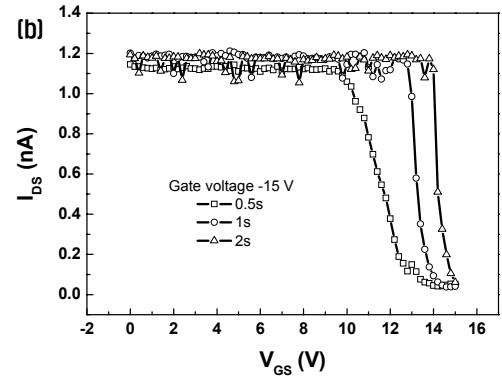
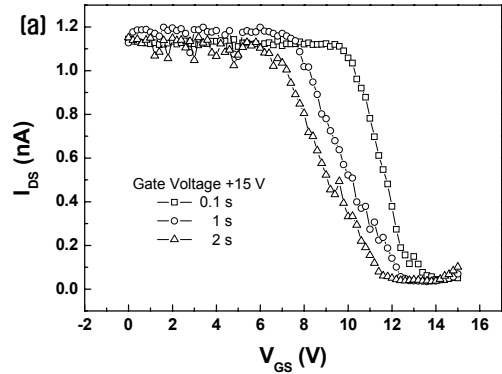
그림 3은 게이트 전압을 (-)에서 (+)로 다시 (+)에서 (-)로 변화시키면서 게이트 전압의 변화에 따른 드레인 전류값의 (V_{GS} - I_{DS}) 변화를 나타낸 그래프이다. 이때 V_{DS} 는 +0.2 V ~ +1 V 까지 +0.2 V 단계로 증가하며 측정을 하였다. 이 때 게이트 전압의 변화에 따라 드레인 전류가 이력 곡선을 그리는 것을 관측하였다. 이것은 게이트 전압이 감소함에 따라 나노선에 존재하던 전하가 나노 입자에 트래핑 되고 반대로 게이트 전압이 증가할 때는 전하가 나노 입자에서부터 나노선으로 방출되는 현상으로 게이트 전압에 따라 메모리 효과가 발생하는 것을 알 수 있었다. 이러한 메모리 효과를 명확하게 규명하고자 그림 4와 같이 Si 나노 입자에 전하를 빼내거나 주입하기 위해 +15 V를 0.1, 1, 2 초 동안 인가하고 측정하고 다시 -15 V를 0.1, 1, 2 초 동안 인가하고 측정한 특성 곡선을 보면, 시간에 따라 나노선 내부의 전하가 나노 입자로 주입되거나 빠져나가는 양의 변화에 의해 게이트 전압의 변화에 따른 드레인 전류의 값의 변화가 명확하게 들어나는 것을 알 수 있었다. 그림 3과 4의 결과로부터 나노 입자는 나노선으로부터 주입되는 전하를 저장하고 또한 나노선으로 전하를 방출하는 역할을 하는 것을 명확히 알 수 있어 이중 결합 된 나노선-나노 입자 전기소자는 메모리소자로서의 가능성이 있음을 확인하였다.



<그림 3> V_{GS} - I_{DS} 의 양방향 측정을 나타낸 특성 곡선

4. 결 론

Thermal CVD 법으로 성장시킨 p-Si 나노선을 이용하여 Poly-Si 을 LP-CVD를 이용하여 증착하였다. NH_3 , H_2O , HF를 무게비 50:20:1로 혼합한 용액, H_3PO_4 , BOE를 이용하여 식각공정을 이용하여 Si 나노입자를 형성하고, 전극과 나노선의 접촉을 하여 top-게이트 형태의 FET 소자를 제작하였다. SEM과 HR-TEM을 이용하여 나노선 표면과 소자 내부의 구조를 관찰 하여 이중 결합 된 Si 나노선- Si 나노 입자 확인 하였다. 이중 결합 된 나노선-나노 입자 전기소자의 전기적인 특성을 I_{DS} - V_{DS} , V_{GS} - I_{DS} 의 특성곡선을 통해 알 수 있었으며, V_{GS} - I_{DS} 이력곡선 으로부터 게이트 전압의 변화 방향에 따라 나노입자에 나노선으로 부터 전하가 트래핑되고 방출되는 것을 확인하여 나노선 소자를 메모리 소자로서 이용할 수 있다는 가능성이 있는 것을 알아내었다.



<그림 4> (a) V_{GS} - I_{DS} 의 (+)전압에 따른 특성 곡선
(b) V_{GS} - I_{DS} 의 (-)전압에 따른 특성 곡선

5. 감사의 글

본 연구는 2006년도 과학기술부 국가지정연구실업(M1050000004506J000004510), 한국 학술진흥재단 중점연구과제 (KRF-2006-J03601), 산업자원부 노기반업 (10022916-2006-22), 비휘발성 차세대메모리소자기술개발업(10022965-2006-13)에 의해 수행 되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] P. Yang, H. Yan, S. Mao, R. Russo, J. Johnson, R. Saykally, N. Morris, J. Pham, R. He, and H. Choi, "Controlled growth of ZnO nanowires and their optical properties," *Adv. Funct. Mater.* Vol.12, pp.323-331, 2002
- [2] O. Hayden, A. B. Greytak, and D. C. Bell, "Core-shell nanowire light-emitting diodes," *Adv. Mater.* Vol.17, pp.701-704, 2005
- [3] Z. Fan and J. G. Lu, "Gate-refreshable nanowire chemical sensors," *Appl. Phys. Lett.* Vol.86, pp.123510, 2005
- [4] Y. Huang, X. Duan, Y. Cui, and C. M. Lieber, "Gallium nitride nanowire nanodevices," *Nano Lett.* Vol.2, pp.101-104, 2002
- [5] Z. Fan, P. Chang, and J. G. Lu, "Photoluminescence and polarized photodetection of single ZnO nanowires," *Appl. Phys. Lett.* Vol.85, pp.6128-6130, 2004