

CNT-TFET 을 이용한 저전력 인버터 설계

진익경, 정우진

한국과학기술원 전기 및 전자공학과, 대전광역시 305-806, 대한민국

E-mail: jik0930@kaist.ac.kr, jee-nee0919@kaist.ac.kr

최근 에너지 효율과 소형화측면에서 한계를 보이는 Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor(MOSFET)을 대체할 수 있는 소자로 Tunneling FET(TFET)이 주목받고 있다. 본 논문에서는 탄소나노튜브(Carbon Nanotube, CNT) TFET을 시뮬레이션하여 전자회로의 기본 단위인 인버터(Inverter)를 설계한다. 설계한 인버터의 성능을 CNT-MOSFET 인버터와 비교하여 저전력 디지털 회로로서의 가능성을 확인한다.

소개

Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor(MOSFET)은 회로의 고성능 및 집적도 증가를 위하여 무어의 법칙[1]에 맞춰 지속적으로 소형화를 이루어 왔다. 이에 따라 동작 전압 또한 낮아졌으며, 저전압에서 소자를 동작시키기 위해서 스위칭 속도를 높이는 것은 필수적이다.[2] 그러나 MOSFET은 열전자 방출(thermionic emission)을 통해 에너지 준위를 이동한다는 특성상 이론적으로 Subthreshold voltage Slope(SS)을 60 mV/dec 이하로 줄일 수 없어 소자 스케일링(scaling)에 있어 한계에 도달하였다.[3]

이를 극복할 수 있는 대안으로 제시된 것이 Tunneling FET(TFET)이다. TFET은 MOSFET의 동작 원리와 달리 source의 valence band와 channel의 conduction band 사이의 밴드-밴드 터널링(band-to-band tunneling)을 이용하기 때문에 60mV/dec 이하의 기울기를 가질 수 있다는 점에서[4] 기존의 MOSFET을 대체할 대표적인 저전력 소자로 주목받고 있다. 이러한 TFET을 구현하기 적합한 소자 중 하나가 탄소나노튜브(Carbon Nanotube, CNT)이다. CNT는 이동자의 유효 질량(effective mass)이 작고 direct energy bandgap을 갖고 있어[5] 트랜지스터로 응용하기에 용이하다.

본 논문에서는 CNT-TFET를 이용하여 디지털 회로의 기본이 되는 인버터를 설계한다. 또한 동일한 구조의 CNT-MOSFET과 band diagram, voltage transfer characteristic, voltage gain, energy dissipation 등의 특성을 비교분석하여 CNT-TFET의 디지털 회로 소자로서의 가능성을 확인해본다.

계산 방법

본 논문에서는 CNT 소자의 수송 특성을 시뮬레이션하기 위하여 EDISON의 '탄소나노튜브 FET 소자 시뮬레이션 소프트웨어'를 이용하였다. 이 소프트웨어는 (13,0) zigzag CNT 소자를 실린더 모양의 quasi-1D 형태로 가정하고 ballistic transport를 NEGF-Poisson 방법으로 계산한다. 소자의 모양은 <그림1>에 나타나 있듯이 안쪽에 차례로 위치한 source, channel, drain을 oxide와 gate가 원기둥 모양으로 둘러싸고 있는 형태이다.

우리는 온도 300K에서 source와 drain의 doping density를 $8.00 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$, source와 drain의 길이를 20nm, oxide thickness를 2 nm, oxide dielectric constant를 16으로 통일한 후, drain과 source의 도핑 타입을 다르게 하여 MOSFET과 TFET을 각각 시뮬레이션 하였다. 양쪽을 모두 n-type으로 하면 n-type MOSFET, 모두 p-type으로

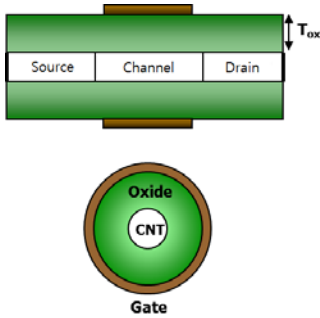


Fig. 1. 본 논문에서 사용한 CNT-FET 의 구조

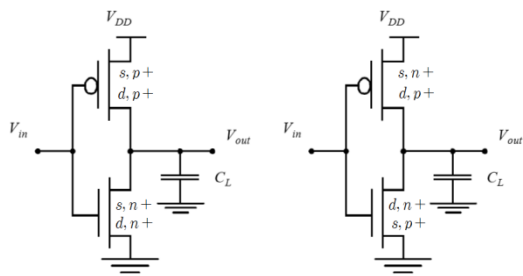


Fig. 2. MOSFET 인버터 (좌), TFET 인버터 (우)

하면 p-type MOSFET, 양쪽을 각각 n-type, p-type으로 다르게 하면 TFET을 구현할 수 있다.

마지막으로 위에서 시뮬레이션한 소자를 이용해 TFET 인버터와 MOSFET 인버터를 각각 설계하여 그 특성을 비교해본다. 인버터의 설계도는 <그림 2>와 같다.

결과 및 논의

1) TFET 및 MOSFET 설계

<그림 3>은 앞서 소개한 조건으로 시뮬레이션한 MOSFET과 TFET의 band diagram이다. 두 경우 모두 $V_D=0.3V$ 로 같으며 off-state는 $V_G=0$ 을, on-state는 $V_G=0.4V$ 를 말한다. TFET의 경우 on-state에서 channel의 conduction band가 valence band의 source보다 낮아 source - channel 부분에서 tunneling이 일어나는 것을 알 수 있다.

2) 단일 소자 성능 비교

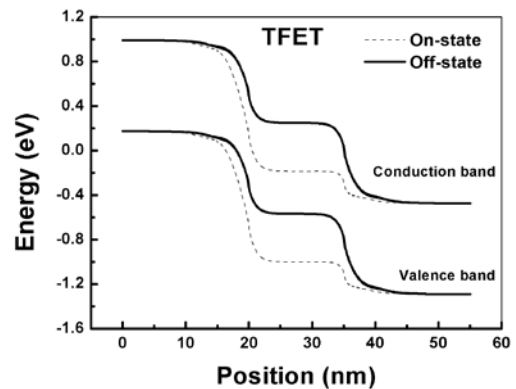
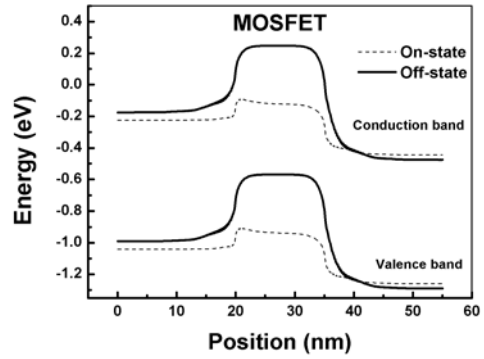


Fig. 3. n-type MOSFET 과 TFET 의 band diagram

CNT-TFET이 인버터로 동작하기에 적합한지 알아보기 위해 인버터를 구성하기 전에 단일 소자 성능을 먼저 분석해본다. 분석방법은 저전압에서의 스위칭 성능을 확인하기 위해 전압-전류 특성을 비교해 보는 것이다.

<그림 4>는 CNT-TFET과 CNT-MOSFET의 $I_{DS}-V_{GS}$ 그래프이다. MOSFET의 경우 SS의 값이 이론적 한계값인 60mV/dec에 머무른 반면 TFET의 경우 SS가 34 mV/dec로 MOSFET 한계값 이하의 값을 가짐을 알 수 있다. 이는 적은 전압으로 더 많은 전류값을 끌어올릴 수 있다는 의미로 TFET이 저전력 디지털 회로 설계에 있어 유리한 특성을 갖고 있음을 확인할 수 있는 결과이다.

3) 인버터성능 비교

앞서 시뮬레이션 한 소자를 이용하여 <그림2>

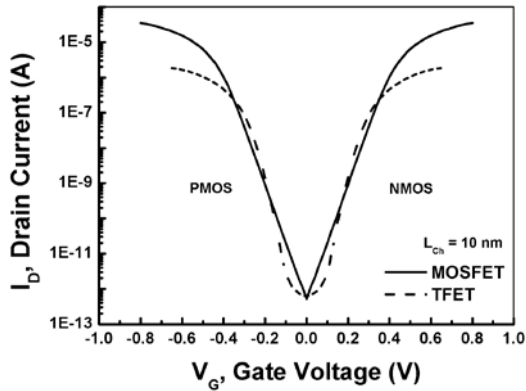


Fig. 4. MOSFET 과 TFET 의 SS 값 비교

과 같이 인버터 회로를 구성하였다. 우선 인버터가 잘 만들어졌는지를 알아보기 위해 V_{in} 에 대한 V_{out} 을 계산한 voltage characteristic을 <그림 5>와 같이 계산하였다. <그림5>를 보면 MOSFET 인버터에 비해 TFET 인버터가 더 적은 전압 범위 내에서 전이가 일어남을 관찰할 수 있다. 정량적 분석을 위해 MOSFET의 gain의 절대값이 1이 되는 지점인 noise margin 값을 비교해보면 MOSFET의 경우 180 mV, TFET의 경우 185 mV로 TFET 인버터의 noise margin이 5 mV 만큼 더 큰 것을 알 수 있다.

<그림 6>은 V_{in} 에 따른 gain 값을 측정한 곡선으로 $V_{DD}/2$ 에서 TFET 인버터의 gain이 10.4 만큼 큼을 확인할 수 있다.

<그림 7>은 V_{DD} 에 대한 switching energy를 계산한 그래프이다. 이 그래프에서 우리는 switching energy의 최솟값이 TFET에 비해 MOSFET이 3.15배 정도 큼을 알 수 있다. 이는 TFET이 에너지 측면에서도 더 효율적임을 나타낸다.

이렇듯 TFET 인버터특성이 MOSFET보다 좋은 이유는 낮은 SS와 관련이 있다. MOSFET에 비해 상대적으로 작은 SS값을 가지는 TFET은 MOSFET에 비해 off state - resistive region - saturated region을 거치는 과정이 빠르게 일어나기 때문에

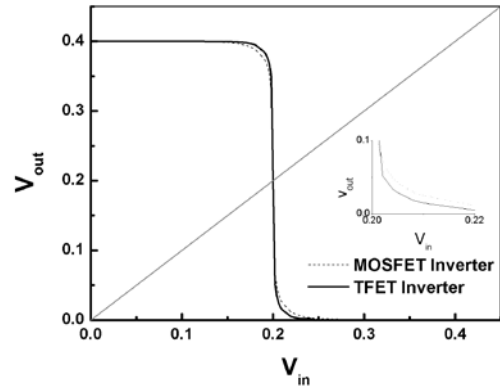


Fig. 5. MOSFET 인버터와 TFET 인버터의 voltage characteristic 곡선

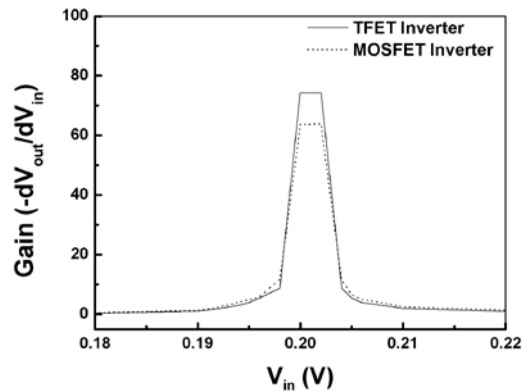


Fig. 6. MOSFET 인버터와 TFET 인버터의 gain 곡선

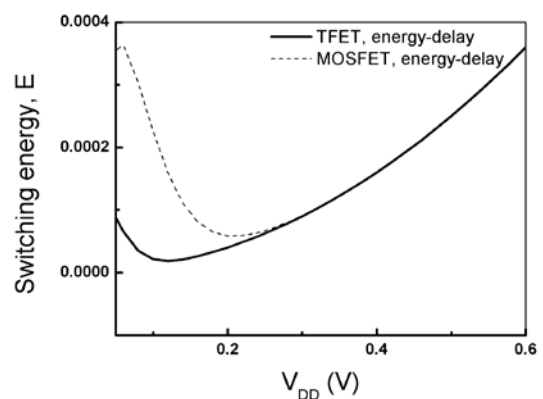


Fig. 7. MOSFET 인버터와 TFET인버터의 에너지 곡선

더 급격한 전이가 일어나는 것이다. 따라서 TFET

으로 만든 인버터 역시 더 스위칭과 에너지 면에서 효율적으로 작동하게 되는 것이다.

결론

'탄소나노튜브 FET 소자 시뮬레이션 소프트웨어'를 이용하여 CNT-MOSFET과 CNT-TFET을 설계하고 그 특성을 알아보았다. 또한 이 소자들을 이용해 디지털 회로인 인버터를 설계하여 이들 성능을 비교 및 분석하였다. 그 결과 noise margin과 gain이 더 크며 switching energy의 최솟값이 더 작다는 사실을 통해 TFET 인버터가 MOSFET 인버터에 비해 저전력 디지털 회로 소자로서 더 좋은 특성을 가진다는 결론을 내릴 수 있었다. 0.4V 이하의 동작 전압에서 효율적으로 작동하는 TFET은 인버터 뿐 아니라 다른 저전압 회로에도 응용되어 널리 쓰일 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 첨단 사이언스·교육 허브 개발 사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2012-M3C1A6035302)

참고문헌

- [1]G. E. Moore,Cramming more components onto integrated circuits. Electronics, 38, 8 (1965)
- [2]A.M.Ionescu, Heike Riel, Tunnel field-effect transistors as energy-efficient electronic switches. Nature 479, 329 (2011)
- [3] Sakurai, T. Perspectives of low power VLSI's. IEICE Trans. Electron E87-C, 429 (2004)
- [4]W. Y. Choi, B.-G. Park, J. D. Lee, and T.-J. K. Liu, Tunneling field-effect transistors (TFETs) with subthreshold swing (SS) less than 60 mV/dec. IEEE Electron Device Lett. 28, 743 (2007).

- [5] J. Appenzeller, Y. M. Lin, J. Knoch, Z. H. Chen, and P. Avouris, Comparing carbon nanotube transistors-The ideal choice: A novel tunneling device design. IEEE Trans. Electron Devices, 52, 2568(2005)