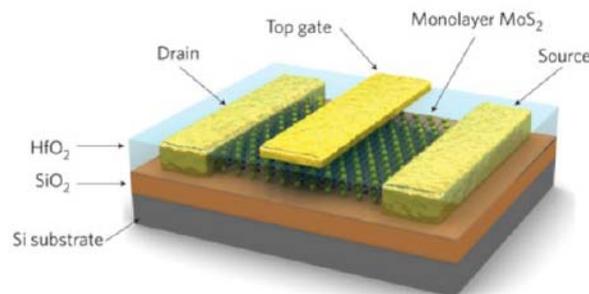


MoS₂의 소자 활용 최신 연구동향 - 1

중앙대학교 화학신소재공학부

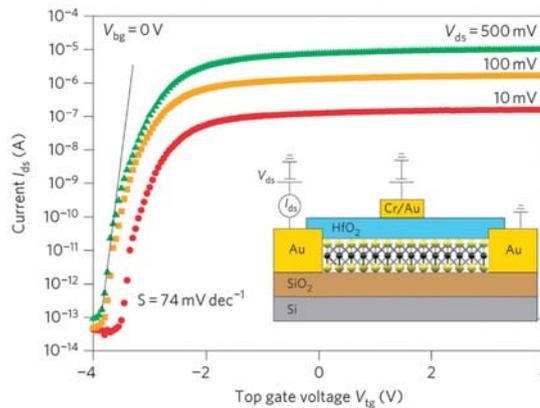
권기창, 김수영

그래핀을 기반으로 하는 전자소자는 최근 뛰어난 전기적, 광학적 특성으로 인해 많은 주목을 받았다. 그러나 실리콘을 금속산화물 반도체 기반의 디지털 논리 회로에서 대체하기 위해서는 전류의 on/off 비가 $10^4 \sim 10^7$ 에 이르는 값을 가져야만 하며, 밴드갭도 최소한 400 meV 이상이 요구된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 그래핀의 밴드갭을 조절하는 연구가 진행되어 그래핀 나노리본, 나노메쉬와 같은 기술이 개발되었으나, 이러한 기술은 캐리어 이동도를 낮추는 단점이 있다. 이동도 문제를 해결하기 위해서 그래핀을 적층하여 만들 경우, 전기장을 가하기 위해서는 높은 전압이 필요하게 되고, 밴드갭 250 eV를 얻기 위해서 약 100 V의 전압이 필요하게 된다. 이러한 이유로 전이금속 디칼코게나이드는 그래핀과 비슷한 구조를 가지는 물질이며 반도체적 특성과 여러 다양한 뛰어난 특성으로 인해서 지난 몇 십년간에 걸쳐 반도체적 특성을 가지는 벌크상태의 전이금속 디칼코게나이드의 전기적 특성에 대해서 연구되어왔다. 그러나 전계-효과 트랜지스터에 사용하게 된 것은 불과 10년 안팎이다. 그래핀을 처음 분리해낸 맨체스터 대학교에서부터 이러한 연구가 시작되었다. 초창기의 연구결과에서 전계-효과 이동도는 몰리브덴 이황화물을 이용했을 때 그래핀을 이용했을 때보다 3배나 높은 결과를 보였다. 최근 연구동향을 살펴보면, 몰리브덴 이황화물을 채널로 이용한 전계-효과 트랜지스터에 대한 연구가 주로 이루어지고 있다. 그 이유는 단일 층의 몰리브덴 이황화물은 1.83 eV의 direct 밴드갭을 가지고 있으며 낮은 파워를 요구하는 전자소자에서 주로 각광받고 있다. 이 장에서는 몰리브덴 이황화물을 이용한 전계-효과 트랜지스터에 대한 연구를 간략하게 알아보려고 한다.

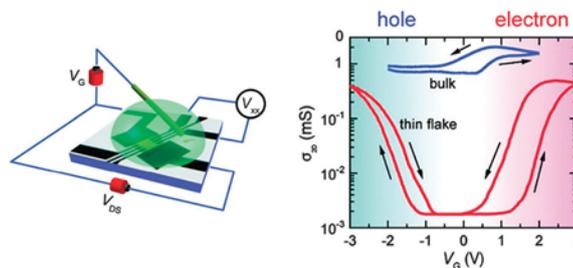


Field-Effect Transistors

초창기 몰리브덴 이황화물 나노시트를 이용해서 back-gate 트랜지스터를 제작하여 특성을 평가했을 때는 캐리어 이동도가 $10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 이하로 나타났다. 트랜지스터 성능을 향상시키기 위해서는 여러 가지 방법이 있지만, dielectric 물질을 바꾸거나 조절하는 것이 가장 효과적인 접근법이다. Radisavljevic 외 여러 연구자들은 high-k gate dielectric 물질로 알려져 있는 HfO_2 (dielectric constant = 25, band gap = 5.7 eV) 을 이용하여 이동도를 증폭시키는 역할을 수행할 수 있도록 하여 상온에서 $200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, 그리고 높은 on/off 비율 ($\sim 10^8$)을 보이는 트랜지스터를 제작하였다. 이러한 연구에 이어서 또 다른 연구자 Yoon과 그의 연구자들은 HfO_2 를 이용한 몰리브덴 이황화물 트랜지스터의 궁극적이 소자 특성을 이론적으로 계산하였다. 계산 결과에서 몰리브덴 이황화물을 사용한 트랜지스터에서 여러 가지 특징적인 이점이 있었으며, $\sim 10^{10}$ 을 뛰어넘은 높은 on/off ratio 값과 short channel effect에 대한 면역과 abrupt switching 거동을 보이는 것이다. 몰리브덴 이황화물과 다른 전이금속 이황화물과의 비교에서도, 상대적으로 낮은 이동도를 가지는 몰리브덴 이황화물이 높은 효율을 보일 수 있는 물질이라고 여겨지지 않지만, 넓은 밴드갭과 2D 형태의 물질 구조가 낮은 파워 전자소자 응용에서 엄청난 이점을 가질 수 있게 해준다. [1]

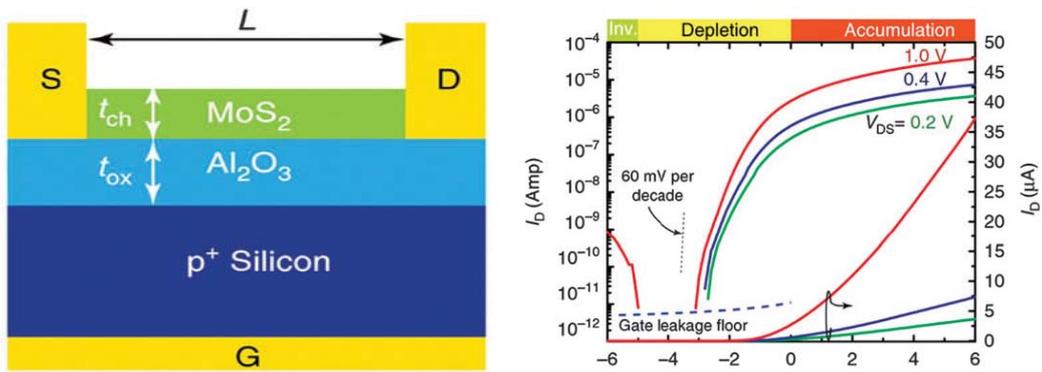


[From ref. 1]



[From ref. 2]

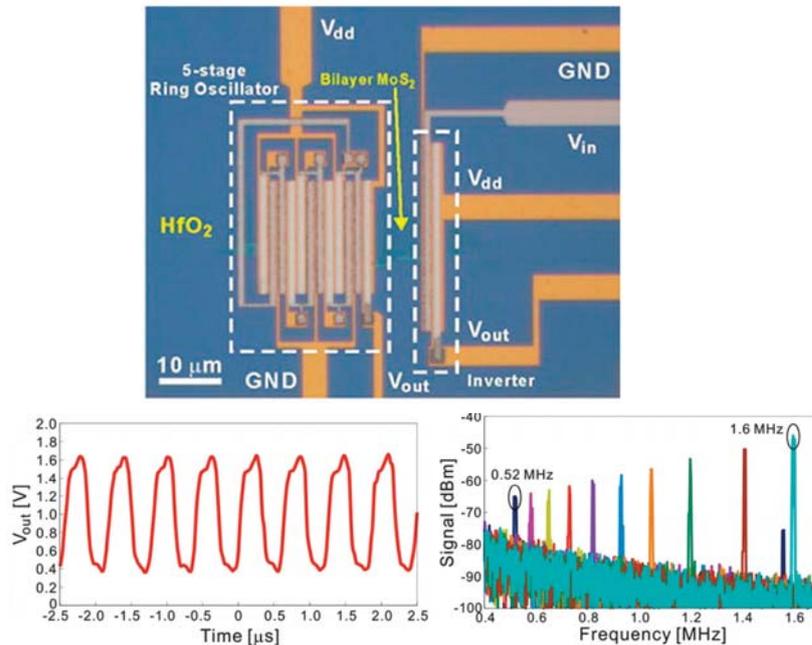
몰리브덴 이황화물을 이용한 트랜지스터의 성능을 향상시키는 또 다른 전략적인 방법으로 는 ionic liquid를 top gate 물질로 사용하여 electric double layer의 원리를 이용한 트랜 지스터가 최근 보고되었다. 이렇게 제작된 트랜지스터는 기존에 보고되었던 트랜지스터의 이동도에 비해서 2 order나 높은 이동도를 보였으며, 전자 이동도는 44, 정공 이동도는 86 cm^2/Vs 의 높은 소자 특성을 보였다. 게다가 electrical double layer로부터 유발된 높은 캐 리어 농도는 전자와 정공의 경우 모두 10^{14} cm^{-2} 의 결과를 보이며 몰리브덴 이황화물을 채널로 사용했음에도 거의 금속이 가지는 수송능력을 보이기도 했다.



[From ref. 3]

이렇게 만들어진 트랜지스터는 HfO_2 를 사용하여 엄청난 효율 향상을 보였으나, 이를 이용 한 소자제작에는 어려움이 따른다. 최근에 복수 층의 몰리브덴 이황화물을 이용하고 단일 back-gate insulator (50 nm Al_2O_3)를 사용하여 또 다른 추가적인 top dielectric이 필요하 지 않은 소자를 개발했다. 이 소자는 상온에서 높은 캐리어 이동도 (최소 $100 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 이상) 를 보였으며, 매우 낮은 sub-threshold swing과 높은 전압에서도 낮은 robust current saturation 현상을 보였다. 게다가 적절한 dielectric 기판을 사용함으로써, 단일 층의 몰 리브덴 이황화물 보다는 복수 층의 몰리브덴 이황화물을 사용하여 추가적인 장점들을 제시 하였다. 첫 번째로는 복수 층의 몰리브덴 이황화물이 단일 층보다 3배 이상의 density of states를 가지며 이는 상대적으로 상당한 높은 drive 전류를 가질 수 있게 하는 동력이 된 다. 게다가 복수 층으로 준비된 채널에서 더 높은 효율의 전계-효과가 발생하여 소자의 current drive를 상승시킬 수 있어 소자의 성능이 향상될 수 있다고 보고하였다.

이렇게 만들어진 트랜지스터를 논리회로에 적용하는 것은 실질적인 전자소자에의 적용에 서 가장 중요한 다음 단계이다. Radisavljevic 외 연구진들은 2개의 몰리브덴 이황화물 트랜지스터를 이용한 신호를 증폭시키고 기본적인 논리 연산이 가능한 논리회로를 시연하였 다. 더 복잡하고 통합된 몰리브덴 이황화물 논리회로를 Wang 외 연구진들에 의해서 개발되 었다. 이 연구 성과에 의하면, 12개의 트랜지스터를 통합하여 인버터나 NAND gate, S-RAM,



[From ref. 4]

5-stage ring oscillator로의 적용이 가능하다는 것을 시연하였다. 이러한 연구들은 반도체 나노시트를 실용적으로 트랜지스터뿐만 아니라 논리회로에도 충분히 적용될 수 있음을 보여주는 예이다.

References

- [1] B. Radisavljevic, A. Radenovic, J. Brivio, V. Giacometti and A. Kis, "Single-layer MoS₂ transistors.", *Nat. Nanotechnol.*, **6**, 147 (2011).
- [2] Y. J. Zhang, J. T. Ye, Y. Matsushashi and Y. Iwasa, "Ambipolar MoS₂ Thin Flake Transistors." *Nano Lett.*, **12**, 1136 (2012).
- [3] S. Kim, A. Konar, W.-S. Hwang, J. H. Lee, J. Lee, J. Yang, C. Jung, H. Kim, J.-B. Yoo, J.-Y. Choi, Y. W. Jin, S. Y. Lee, D. Jena, W. Choi and K. Kim, "High-mobility and low-power thin-film transistors based on multilayer MoS₂ crystals.", *Nat. Commun.*, **3**, 1011 (2012)
- [4] H. Wang, L. Yu, Y.-H. Lee, Y. Shi, A. Hsu, M. L. Chin, L.-J. Li, M. Dubey, J. Kong and T. Palacios, "Integrated Circuits Based on Bilayer MoS₂ Transistors." *Nano Lett.*, **12**, 4674 (2012).
- [5] X. Huang, Z. Zeng, and Hua Zhang, "Metal dichalcogenide nanosheets: preparation, properties and applications.", *Chem. Soc. Rev.* **42**, 1934 (2013).