고이동도 저전력 트랜지스터용 이차원 전이금속 칼코겐화합물

DOI: 10.3938/PhiT.22.011

최 웅·김선국

Two-dimensional Transition-metal Dichalcogenides for High-mobility and Low-power Transistors

Woong CHOI and Sunkook KIM

The remarkable properties of graphene have made it the most widely studied two-dimensional material. However, its lack of a bandgap limits its transistor applications. Recently, interest in transition-metal dichalcogenides, such as molybdenum disulfide (MoS_2), has been growing rapidly because, unlike graphene, the existence of bandgaps, combined with mobility enhancement by dielectric engineering, offers an attractive possibility of using MoS_2 field-effect transistors in low-power switching devices and photodetectors. Here, we review the historical development, properties and prospects of MoS_2 .

탄소 원자들이 육각형의 벌집 모양으로 배열된 그래핀(그림 1)은 대표적인 이차원 물질로 그 놀라운 특성으로 인해 매우 큰 관심을 받고 있으며,^[1] 2004년 그래핀을 발견한 영국 맨체스터 대학의 가임 교수와 노보셀레프 교수는 불과 6년 후인 2010년 노벨상을 수상하였다. 그래핀은 강철보다 200배 이상 강하며, 다이아몬드보다 2배 이상 열전도율이 높으며, 구리보다 100배 이상 전기가 잘 통하며, 실리콘보다 100배 이상 전자가 빠르게 움직일 수 있다. 그래핀의 이러한 기계적, 열적, 전기적 특성은 에너지 띠틈이 없는 그래핀의 전자구조에서 기인하고 있다. 그러나 역설적으로 이러한 에너지 띠틈이 없는 그래핀은 반도체가 아닌 준금속의 특성을 보이며, 전자산업의 핵심소재인 트랜지스터로의 상용화에 큰 장벽이 되고 있다. 따라서 트랜지스터 응용을 위해 그래핀에 에너지 띠틈을 만들 수 있는 그래핀 나노리본이나 그래핀 겹층에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔으나, 약 0.4 eV의 제한적인 띠틈만이 가능

저자약력

최웅 교수는 UC 버클리 재료공학과에서 박사학위를 받았으며, 이후 로스 알라모스 국립연구소, 어플라이드 머티리얼즈, 삼성종합기술원을 거쳐 현재 국민대학교 신소재공학부에 재직 중이다. (woongchoi@kookmin.ac.kr)

김선국 교수는 퍼듀대학교 전기컴퓨터공학과에서 박사학위를 받았으며, 이후 인텔과 삼성종합기술원을 거쳐 현재 경북대학교 전자전파공학과에 재직 중이다.

Fig. 1. Crystal structure of graphene.^[1] Fig. 2. Band structure around the K point of (i) large-area graphene, (ii) graphene nanoribbons, (iii) unbiased bilayer graphene, and (iv) bilayer graphene with an applied perpendicular field.^[2]

하며 띠틈이 형성되면 이동도가 급격히 감소하는 문제가 있어 실질적인 응용에는 한계가 있는 상황이다(그림 2).^[2]

이러한 문제를 극복하기 위하여 연구자들은 그래핀 이외의 이차원 물질에 주목하기 시작하였으며, 그 가운데 최근 이황화몰리브덴(MoS_2)과 같은 전이금속 칼코겐화합물에 대한 관심이 급증하고 있다. 전이금속 칼코겐화합물은 MX_2 의 화학식으로 표현되며 여기서 M은 전이금속 원소(주기율표 4~6족)이고 X는 칼코겐 원소(주기율표 7족인 S, Se, Te)이다. 이러한 전이금속 칼코겐화합물은 흑연과 유사한 층상구조를 가지며, 공유결합으로 이루어진 X-M-X층이 느슨한 판데르발스 결합으로 유지되고 있다(그림 3). 이러한 전이금속 칼코겐화합물 가운데 현재 트랜지스터 응용을 위해 가장 활발히 연구가 진행

REFERENCES

- [1] www.lbl.gov.
- [2] F. Schwierz, Nat. Nanotech. **5**, 487 (2010).

Fig. 3. Crystal structure of molybdenum disulfide MoS_2 .^[3]

Fig. 4. Single crystal MoS_2 ; a commercial MoS_2 lubricant product; MoS_2 powders.^[4-6]

되고 있는 물질은 이황화몰리브덴이며, 본 논문에서는 이황화몰리브덴에 초점을 맞춰 물질의 특성 및 연구현황 등에 대해 소개하고자 한다.

단결정 덩어리 이황화몰리브덴의 전기적 특성

이황화몰리브덴은 자연에 존재하는 매장량이 풍부하여 몰리브덴 금속 제련용 원광석으로 주로 사용되며, 결정구조의 특성으로 인해 자동차용 고체 윤활제 및 석유화학 탈황공정의 촉매 등으로도 사용되고 있다(그림 4).^[4-6] 이황화몰리브덴은 에너지 띠를 가지는 반도체이나 마찰 특성에 대해서는 그동안 많은 연구가 진행되어 온 반면, 전기적인 특성에 대한 연구는 최근에 와서야 활발히 진행 중이다. 자연적으로 존재하는 이황화몰리브덴은 대부분 n-형 도핑이 되어있는 것으로 알려져 있으며, 그림 3에서 나타난 것과 같이 층상구조를 갖는 이황화몰리브덴의 결정구조로 인해 전기전도도가 결정방향에 따라 큰 차이를 보이고 있다(그림 5).^[7] 단결정 덩어리 형태의 이황화몰리브덴은 약 1.3 eV의 간접 띠를 가지며, 상온에서 약 $50 \sim 200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 의 이동도를 갖는 것으로 알려져 있다(그림 6).^[8] 그래핀을 발견한 영국 맨체스터대학 연구팀은 2005년 그래핀과 더불어 유사한 이차원 결정구조를 갖는 단층 전이금속 칼코겐화합물들의 전기적 특성을 보고하였으나,

Fig. 5. Temperature behavior of resistivity in MoS_2 crystals.^[7]

Fig. 6. Hall mobility-temperature dependence for MoS_2 crystals.^[8]

단층 이황화몰리브덴은 약 $0.5 \sim 3 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 의 이동도를 나타내어 큰 관심을 받지 못하였다.^[9]

단층 이황화몰리브덴의 전기적 특성

2010년 미국 UC 버클리와 콜럼비아대학 연구진은 독립적으로 단층 이황화몰리브덴의 전자구조를 연구하여, 이황화물

REFERENCES

- [3] B. Radisavljevic, A. Radenovic, J. Brivio, V. Giacometti and A. Kis, Nat. Nanotech. **6**, 147 (2011).
- [4] genevalunch.com.
- [5] www.amazon.com.
- [6] www.alibaba.com.
- [7] B. L. Evans and P. A. Young, Proc. R. Soc. A **284**, 402 (1965).
- [8] R. Fivaz and E. Mooser, Phys. Rev. A **163**, 743 (1967).
- [9] K. S. Novoselov, D. Jiang, F. Schedin, T. J. Booth, V. V. Khotkevich, S. V. Morozov and A. K. Geim, Proc. Natl. Acad. Sci. USA **102**, 10451 (2005).
- [10] A. Splendiani, L. Sun, Y. Zhang, T. Li, J. Kim, C.-Y. Chim, G. Galli and F. Wang, Nano Lett. **10**, 1271 (2010).
- [11] K. F. Mak, C. Lee, J. Hone, J. Shan and T. F. Heinz, Phys. Rev. Lett. **105**, 136805 (2010).

Fig. 7. Calculated band structures of (a) bulk MoS₂, (b) quadrilayer MoS₂, (c) bilayer MoS₂, and (d) monolayer MoS₂.^[10]

Fig. 8. Bandgap energy of thin layers of MoS₂.^[11]

Fig. 9. Three-dimensional schematic view of a single-layer MoS₂ transistor.^[3]

리브텐의 두께가 줄어들면서 락이 커지고, 궁극적으로 단층이 되면 약 1.9 eV의 직접 락을 갖게 된다고 발표하였다(그림 7 및 그림 8).^[10,11] 이는 이황화몰리브덴이 광전자소자로 응용될 수 있음을 보여주는 매우 흥미로운 결과이다. 또한, 2011년 스위스 EPFL 연구진은 단층 이황화몰리브덴과 고유 전상수 절연체를 이용하여 트랜지스터를 제작하여 이동도 200 cm²/Vs, on/off비 10⁸, subthreshold swing 70 mV/dec의 매우 우수한 트랜지스터 특성을 보고하였다(그림 9 및 그림

Fig. 10. Local gate control of the MoS₂ monolayer transistor.^[3]

Fig. 11. Integrated circuit based on MoS₂.^[13]

10).^[3] 이는 이황화몰리브덴 트랜지스터가 고속 저소비전력 스위치 소자로 응용될 수 있음을 보여주어, 이후 이황화몰리브덴의 전기적 특성연구가 급속도로 증가하게 되는 계기가 되었다. 현재 이황화몰리브덴 트랜지스터에서는 이동도 500 cm²/Vs까지 보고되어 있으며, 단일 트랜지스터뿐 아니라 회로를 구현하는 가능성까지 보고되고 있다(그림 11).^[12,13]

고이동도 저소비전력 트랜지스터 응용

전자회로에서 스위치 역할을 하는 트랜지스터는 전자산업의 핵심소자로 컴퓨터, 휴대전화, LCD, OLED의 평판 디스플레이 등의 다양한 제품에서 사용되고 있다. 특히, 평판 디스플레이에는 비정질 실리콘 또는 다결정 실리콘을 이용한 박막트랜지스터가 주로 사용되고 있으나, 비정질 실리콘은 이동도가 낮으며 (< 1 cm²/Vs) 다결정 실리콘은 대면적화가 어려운 단점이 있다. 디스플레이 작동속도는 트랜지스터의 이동도와 밀접한 관련이 있으며, 향후 고화질 평판 디스플레이 및 구부러지는 플렉시블 디스플레이의 구현을 위해서는 속도가 빠르고(이동도 약 50 cm²/Vs) 소비전력이 적은 반도체 재료가 필요하다. 이를 위해 산화물 반도체 등을 이용한 트랜지스터 연구가

REFERENCES

- [12] H. Liu and P. D. Ye, IEEE Electr. Dev. Lett. **33**, 546 (2012).
- [13] H. Wang, L. Yu, Y.-H. Lee, Y. Shi, A. Hsu, M. L. Chin, L.-J. Li, M. Dubey, J. Kong and T. Palacios, Nano Lett. **12**, 4674 (2012).

Fig. 12. Methods of synthesizing MoS₂.^[14-16]

활발하나 이동도(약 10 cm²/Vs)와 소비전력이 산업계의 요구에는 미치지 못하고 있는 실정이다. 따라서 차세대 고화질 디스플레이는 이황화몰리브덴의 중요한 응용분야의 하나로 떠오르고 있다.

대표적인 연구진

현재 스위스 EPFL, 미국 퍼듀대학교, 미국 UC 버클리, 미국 MIT 등 세계적으로 많은 연구진들이 이황화몰리브덴과 관련해 뛰어난 연구 성과를 거두고 있다. 국내에는 필자를 비롯하여, 연세대학교와 성균관대학교 연구진들이 활발히 이황화몰리브덴 연구를 진행하고 있다.

이황화몰리브덴의 연구 방향

대면적 성장: 현재 대부분의 이황화몰리브덴 트랜지스터 연구는 기계적 박리법에 의해 단결정에서 분리한 수~수십 μm 크기의 단층 이황화몰리브덴 조각을 이용하여 진행되고 있다. 이 방법은 고품질의 이차원 단결정을 얻을 수 있는 장점이 있으나, 대면적 성장이 불가능한 한계를 가지고 있다. 따라서 이를 극복하기 위하여 크게 두 가지 방식이 제안되고 있다(그림 12).^[14-16] 우선, 기계적 박리법 대신 액체 내에서 리튬이온 또는 초음파를 이용한 박리법으로 잉크 형태의 이황화몰리브덴을 제조하고 대면적 기판 위에 적용하는 방법이다. 상대적으로 저비용으로 대량생산이 가능한 장점이 있으나, 리튬이온의 가연성 및 희소성, 그리고 잉크 내 이황화몰리브덴 조각의 두께 불균일성 등의 단점이 있다.^[17] 두 번째는 화학기상증착법을 이용한 대면적 증착 방법이다. 화학기상증착법은 기존의 반도체 산업에서 많이 사용하는 유용한 증착법의 하나이며 산업적으로 매우 큰 영향을 줄 수 있는 방법이나, 아직은 연구의 초기단계로 두께의 균일성 등에 문제를 보이고 있다.^[17]

전기 전도: 이황화몰리브덴 트랜지스터의 이동도가 0.5~3 cm²/Vs에서 200 cm²/Vs 이상으로 증가하는 것은 주변의 고유전상수 유전체가 전하를 띤 불순물과의 쿨롱 산란을 막아주기 때문으로 여겨지고 있다.^[3] 그러나 산란 메커니즘의 역할에 대해 좀 더 깊이 이해하기 위해서는 더 많은 연구가 필요하다. 특히, 현재 원자층증착법으로 형성하는 산화하프늄과 같은

고유전상수 산화물을 안정적으로 형성할 수 있는 공정 개발이 필요하며, 아울러 고유전상수 산화물과 이황화몰리브덴의 계면에 대한 깊은 이해가 필요하다.

금속 접합: 현재 이황화몰리브덴 트랜지스터 연구에서는 전극으로 금을 이용하고 있다. 그러나 금과 이황화몰리브덴은 옴 접촉을 이루기 어려운 것으로 알려져 있으며,^[18] 이에 따라 접촉 저항이 낮아 옴 접촉을 형성할 수 있는 금속의 종류를 파악하고 옴 접촉을 형성할 수 있는 공정을 개발하는 것이 필요하다.

향후 전망

이황화몰리브덴과 같은 전이금속 칼코겐화합물은 오랫동안 연구되고 사용되어 왔으나, 최근에 들어서 그 전기적 특성에 대한 연구가 진행되고 있다. 1 eV 이상의 띠틈을 갖는 반도체 특성은 트랜지스터 응용에 큰 장점으로 작용하며, 직접 띠틈을 갖는 단층 전이금속 칼코겐화합물은 광전소자로도 유용할 것으로 예상된다.

실질적인 응용을 위해서는 용액의 형태나 기판 위에 형성할 수 있도록 대면적 성장법이 개발되어야 한다. 용액공정의 경우, 분리된 조각의 크기와 두께를 조절하는 방법 및 대량으로 제조할 수 있는 새로운 방법과 물질이 필요하다. 증착법의 경우, 균일하게 대면적을 형성하고 두께를 조절할 수 있는 방법이 필요하다. 대면적 고품질의 박막형성이 가능해지면 이를 바탕으로 여러 가지 기초적인 물리, 화학 특성의 이해가 가능하고, 폭넓은 응용연구가 가능해질 것이다. 이차원 전이금속 칼코겐화합물의 전기적 특성과 응용은 매우 짧은 역사를 가지고 있으나, 향후 연구전망이 매우 밝은 연구분야이다.

REFERENCES

- [14] J. N. Coleman, M. Lotya, A. O'Neill, S. D. Bergin, P. J. King, U. Khan, K. Young, A. Gaucher, S. De, R. J. Smith, I. V. Shvets, S. K. Arora, G. Stanton, H.-Y. Kim, K. Lee, G. T. Kim, G. S. Duesberg, T. Hallam, J. J. Boland, J. J. Wang, J. F. Donegan, J. C. Grunlan, G. Moriarty, A. Shmeliov, R. J. Nicholls, J. M. Perkins, E. M. Grieveson, K. Theuwissen, D. W. McComb, P. D. Nellist and V. Nicolosi, *Science* **331**, 568 (2011).
- [15] Y.-H. Lee, X.-Q. Zhang, W. Zhang, M.-T. Chang, C.-T. Lin, K.-D. Chang, Y.-C. Yu, J. T.-W. Wang, C.-S. Chang, L.-J. Li and T.-W. Lin, *Adv. Mater.* **24**, 2320 (2012).
- [16] Y. Zhan, Z. Liu, S. Jajmaei, P. M. Ajayan and J. Lou, *Small* **8**, 966 (2012).
- [17] Q. H. Wang, K. Kalantar-Zadeh, A. Kis, J. N. Coleman and M. S. Strano, *Nat. Nanotech.* **7**, 699 (2012).
- [18] I. Popov, G. Seifert and D. Tomanek, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 156802 (2012).