저차원 결정 복합체에 대한 연구의 발전 전망

DOI: 10.3938/PhiT.23.037

손 영 우

Looking Forward on the Physics of Low-dimensional Crystals Heterostructures

Young-Woo SON

Based on a review of the explosive developments in fabricating and understanding two-dimensional van der Waals crystals and their heterostructures over the last ten years, a rough sketch of expected expansions in this research area over the next ten years will be given. More attention will be paid to conceptual progress in physics rather than applications.

공간에 대한 차원의 크기를 변화시키며 기본입자들의 개별적인 운동과 집단적인 들뜸에 대한 변화 양상을 관찰하고 이해하는 것은 현대 물리학이 시작된 이후에 변함없이 중요한 주제 중에 하나이다. 특히 전자들이 잘 정돈된 원자들 사이를 서로 상호작용하면서 운동할 때 원자들의 종류, 배열 및 그 배열들이 형성된 공간의 차원의 크기가 미치는 영향에 대한 연구가 지난 세기 고체물리학의 바탕을 이루었다고 할 수 있다. 이러한 연구를 시작으로 해서 더 복잡한 상황, 예를 들어서, 전기장, 자기장 등의 외부 자극이 있는 경우나, 온도와 압력 등이 변하는 경우, 혹은 내부의 불순물과 결함 등이 존재하는 경우에서 전자들의 양자역학적 상태변화에 대한 매우 활발한 연구가 있어 왔다. 특히, 20세기 후반부터 실험기술의 비약적인 발전에 힘입어서 원자들의 배열이 삼차원보다 낮은 차원에서 이루어진 자연적으로 형성된 물질들과 인공적으로 만들어진 구조들에서 앞서 말한 물리적 현상에 대한 연구가 중요한 과제로 대두되었다. 이는 차원이 변화하면서 이미 익숙하게 알고

있던 전자의 양자역학적 상태가 다양하고 새로운 모습으로 바뀌기 때문이다. 특히, 나노과학과 기술에 사용되는 물질군들이 주로 저차원 결정들과 분자들이어서 이 분야에 대한 연구가 폭발적으로 증가하는 한 가지 요인이 되었다. 이 글에서는 지난 십여 년간 활발하게 이루어진 저차원 결정물질에 대한 연구가 현재 우리가 가지고 있는 물질의 성질에 대한 이해에 어떠한 영향을 미쳤는지 간략하게 살펴보고 어렵게나마 앞으로의 발전가능성에 대해 짚어보고자 한다. 매우 많은 논문들이 출간되고 있는 이유로 이 분야에서 벌어지고 있는 모든 일들을 적절하게 인용할 수 없음을 먼저 밝히고 이 글에서의 참고 문헌은 매우 제한적임을 알린다.

탄소원자 60개로 이루어진 새로운 탄소동소체의 발견^[1] 이후 촉발된 새로운 탄소물질에 대한 다양한 연구는 원통모양의 탄소나노튜브의 합성^[2]으로 큰 전환점을 맞게 된다. 탄소나노튜브는 흑연의 한 층을 원통형으로 말아서 형성된 나노미터 크기의 반지름을 가지는 선으로 이해하는 것이 가장 자연스럽기 때문에 먼저 흑연의 한 층에서 전자의 양자역학적 상태를 이해한 후, 적절한 경계조건으로부터 나노튜브의 전자구조 및 여러 가지 물리적 성질을 이해하려는 시도가 있었다.^[3] 이러한 이유로 벌집모양으로 이루어진 이차원 탄소격자에 대한 연구가 1960년대와 70년대의 몇몇 소수 연구자들의 간헐적 업적을 바탕으로 1990년대 초반부터 매우 활발하게 진행되었다. 이미 이 당시부터 육각형으로 배치된 탄소구조에서 전자의 양자역학적 상태의 특이성에 대한 논의가 있어왔다. 특히, 매우 넓은 에너지 구간에서 전자의 운동량과 에너지 사이의 상관관계가 서로 비례하는 관계에 있다는 점에서 이전부터 연구된 여러 이상적인 물리학 이론 모델들이 실현될 수 있는 물질로 생각

저자약력

손영우 교수는 2004년 저차원 물질의 양자전도도에 대한 제일원리계산으로 서울대학교 물리학과에서 박사학위를 취득 후 미국 버클리 소재 캘리포니아대학교에서 박사후연구원, 건국대학교 물리학과 조교수를 거쳐 2008년부터 고등과학원 계산과학부 교수로 재직 중이다. (hand@kias.re.kr)

REFERENCES

- [1] H. W. Kroto *et al.*, *Nature* **318**, 162 (1985).
- [2] S. Iijima, *Nature* **354**, 56 (1991).
- [3] R. Saito, G. Dresselhaus and M. S. Dresselhaus, *Physical Properties of Carbon Nanotubes* (Imperial College Press, London, 1998).

되었다.^[4] 대표적으로, 상호작용하지 않는 단일 입자 상태의 전자가 가장 단순한 형태의 상대론적 양자전기역학의 지배를 받아서 운동하는 모델이 광범위하게 사용되었다. 이때, 적절한 경계조건을 사용하여 차원이 하나 줄어든 일차원에서의 나노튜브 전자상태를 간단하게 구할 수 있었다. 이를 바탕으로 반도체성 나노튜브를 이용하여 일차원 트랜지스터를 만들어 그 소자특성을 연구하거나,^[5] 강하게 상호작용하는 러틴저 액체 (Luttinger liquid) 상태의 전자들의 운동을 나노튜브를 대상으로도 연구할 수 있게 되었고 이러한 현상들을 실험적으로도 확증하였다.^[6] 그 이외에 매우 많은 연구들이 이루어져 왔고 그 바탕에는 흑연 한 층으로 이루어진 그래핀에서 이차원 디랙방정식의 지배에 따라 움직이는 전자의 운동에 대한 이해가 있었다. 여러 가지 새로운 방식의 나노튜브 합성법이 1990년대 후반부터 매우 활발하게 개발되었지만, 이차원 그래핀 한 층의 분리에는 매우 더딘 발전을 보였다. 2004년이 되어서야 그래핀의 한 층이 분리되었고, 이론적으로 예측된 전자의 양자역학적 상태가 실험적으로 확인되었다.^[7] 이로부터 지난 십여 년간 이 분야의 연구가 매우 활발하게 진행되었고, 새로운 물리적 현상과 다양한 이차원 결정들을 분리하였으며^[8] 또한 대면적으로 합성되었다.^[9] 그래핀이 한 층 분리되고 그 독특한 성질들이 확인된 후에^[10] 이에 힘입어 다양한 이차원 결정들이 분리되었다. 또한 이론적으로도 새로운 결정들의 분리 가능성을 탐구하게 되었다. 이렇게 층층으로 각각 분리된 이차원 결정들에 대한 연구들이 가능하게 된 것이 그래핀 연구가 시작된 후 가장 새로운 점이라고 할 수 있다.

그래핀이 분리된 이후 매우 많은 연구들이 축적되었으며, 여러 방면에서 광범위한 개발 논문들이 있으므로 본 원고에서는 간단하게 그 이후 진행된 일들의 의미를 짚어보고자 한다. 가장 먼저 그 의미를 생각해 볼 점은, 이전까지 많이 연구되었던 층상물질들을 거의 모두 단일층 단위까지 분리시켜서 각각의 층수에 따른 물질의 성질 변화를 이해하고 측정할 수 있게 되었다는 것이다. 가장 먼저 이런 일이 시도된 물질은 역시 이중층, 삼중층 그래핀인데, 한 층짜리 그래핀이 앞서 언급한 상대론적 양자역학의 지배를 받는다면 이중층, 삼중층 그래핀은 이와 판이하게 다른 전자구조를 보여주었다.^[11] 이렇게 층수가 하나씩 바뀔 때마다 그 물리적 성질이 판이하게 다른 현상은 그래핀에만 국한된 것이 아니다. 최근 많이 연구되고 있는 2H-MoS₂에서도 층수가 바뀔 때마다 반도체 에너지 띠의 정성적 변화가 관찰되고 있다.^[12] 또한 금속성을 가지고 상태 변화가 있는 물질인 1T-TaS₂에서도 층수가 바뀔 때마다 전하밀도와 및 초전도 상태로의 상전이 현상의 정성적 차이가 관찰되었다.^[13] 앞으로도 이렇게 새로운 이차원 결정들이 분리될 때마다 개별적으로 각각의 물질들의 층수변화에 따른 물성의 변

화들을 연구하게 될 것으로 보인다.

이렇게 정상적으로 켜켜이 쌓여 있는 구조뿐만이 아니라, 각각의 층들이 비정상적으로 쌓여 있는 구조 역시 매우 흥미롭다. 대표적인 예를 들면 서로 비켜서 돌아가 쌓여 있는 이중층 그래핀을 들 수 있다.^[14] 이는 그래핀 한 층 위에 다른 한 층이 원래 쌓여야 하는 구조에서 일정한 각도로 회전한 후에 쌓여있는 경우이다. 이렇게 되면 아래위 두 층의 육각형 격자들은 매우 긴 구간에서 서로 보강-상쇄 간섭을 일으켜서, 멀리 보면 원자구조보다 훨씬 큰 격자 구조를 보이게 되고 이를 흔히 모아레(moire) 구조라고 한다. 이런 구조에서는 매우 넓은 면적에서 결맞음이 유지되는 초격자를 형성할 수 있게 되어서 자기장이 있을 때 초격자가 주는 위상과 자기장에 의해서 발생하는 전자의 위상이 서로 경쟁할 수 있게 된다. 이는 매우 흥미로운 물리학적 결과를 보여주게 되고 최근에 실험적으로 확인되었다.^[15] 이렇게 같은 종류의 이차원 결정물질이 여러 가지 방식으로 쌓일 수도 있지만 다른 이차원 결정물질들을 켜켜이 쌓아서 원하는 물리적 성질을 만들어보거나 혹은 조절하려는 시도도 있다. 앞으로 이러한 방향의 실험적 시도들이 계

REFERENCES

- [4] 디랙방정식을 거의 처음으로 언급한 논문으로는, D. P. DiVincenzo and E. J. Mele, Phys. Rev. B **29**, 1685 (1984).
- [5] C. Dekker, S. J. Tans and A. R. M. Verschueren, Nature **393**, 49 (1998).
- [6] M. Bockrath, D. H. Cobden, J. Lu, A. G. Rinzler, R. E. Smalley, L. Balent and P. L. McEuen, Nature **397**, 598 (1999).
- [7] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva and A. A. Firsov, Science **306**, 666 (2004).
- [8] K. S. Novoselov, D. Jiang, F. Schedin, T. Booth, V. V. Khotkevich, S. V. Morozov and A. K. Geim, PNAS **102**, 10451 (2005).
- [9] K. S. Kim, Y. Zhao, H. Jang, S. Y. Lee, J. M. Kim, K. S. Kim, J.-H. Ahn, P. Kim, J.-Y. Choi and B. H. Hong, Nature **457**, 706 (2009).
- [10] A. K. Geim and P. Kim, Scientific American **90-97** (2008).
- [11] A. H. Castro Neto, F. Guinea, N. M. R. Peres, K. S. Novoselov and A. K. Geim, Rev. Mod. Phys. **81**, 109 (2009).
- [12] Q. H. Wang, K. Kalantar-Zadeh, A. Kis, J. N. Coleman and M. S. Strano, Nature Nanotech. **7**, 699 (2012).
- [13] Y. Yu, F. Yang, X. F. Lu, Y. J. Yan, Y. H. Cho, L. Ma, X. Niu, S. Kim, Y.-W. Son, D. Feng, S. Li, S.-W. Cheong, X. H. Chen and Y. Zhang, Gate-tunable Phase Transitions in 1T-TaS₂, arXiv:1407.3480 (2014).
- [14] J. M. B. Lopes dos Santos, N. M. R. Peres and A. H. Castro Neto, Phys. Rev. Lett. **99**, 256802 (2007).
- [15] M. Yankowitz *et al.*, Nature Physics **8**, 382 (2012); L. A. Ponomarenko *et al.*, Nature **497**, 594 (2013); C. R. Dean *et al.*, Nature **497**, 598 (2013).

속될 것으로 예상된다. 이는 원자 수준으로 정밀하게 산화물의 결정을 성장시키고 다른 산화물과의 단면을 만들어 내는 방식^[16]과 더불어 가장 깨끗한 결정간의 단면을 만들어 낼 수 있을 것으로 기대되고 이를 통해서 두 개의 결정들 혹은 그 이상의 개수의 다양한 결정들이 매우 깨끗하게 접합되어진 구조에서 나타날 완전히 새로운 물리적 성질에 대한 연구들이 벌어질 것으로 기대된다.

새롭게 분리된 이차원 결정들에서 준입자 및 집단 들뜸들의 성질에 대한 연구 역시 지금까지 전 세계적으로 수행된 것 이상으로 더 활발하게 진행될 것으로 기대된다.^[17] 이미 이중층 그래핀에서 낮은 에너지 전자들의 상태가 보여주는 자발적 대칭성 붕괴에 대한 매우 활발한 연구가 이루어졌으며 이를 통해서 낮은 차원에서 전자의 근본적인 성질 변화에 대한 많은 이해를 촉진하였다.^[18] 하지만, 아직 대칭성 붕괴에 대한 더 많은 연구가 필요하다. 그래핀 혹은 그래핀과 다른 층상물질들을 합쳐서 만들어낸 복합물질들에 관련해서 여러 가지 대칭성붕괴 상태와 초전도 상태에 대한 이론적 연구가 있으나 이를 확증하거나 반증하는 실험들은 아직 많이 없는 상태이다. 이런 대표적인 집단 들뜸이나 대칭성이 깨진 상태에 대해서는 가장 최근에 들어서야 새롭게 분리된 층상 물질인 1T-TaS₂에서 층의 개수를 변화시키며 전하밀도파 및 초전도 현상을 실험적으로 관측하기 시작했다. 그리고 약 20여 층의 두께를 가진 2H-MoS₂에서도 매우 많은 전하를 주입한 후 특이한 초전도 현상을 관측하였으나 아직도 이해가 부족하다.^[19] 또한, 완벽한 반도체 이차원 결정을 분리할 수 있게 됨에 따라서 낮은 차원 반도체에서 준입자들과 집단 들뜸들에 관련된 새로운 연구들을 할 수 있게 되었다. 예를 들어서 완벽하게 이차원에 속박된 전자와 양공의 강한 상호작용으로 발생하는 엑서톤(exciton)^[20]과 트라이온(trion)^[21] 등에 관련된 연구 역시 증가할 것으로 예상된다. 물론, 외부에서 주입된 광자와 이차원 결정에서 전자, 양공, 포논 등의 상호작용으로 만들어내는 준입자들의 성질과 이들 사이의 상호작용 역시 완벽한 반도체 이차원 결정이 제공하는 좋은 연구기회가 될 것이다. 물론, 지난 세기 반도체 연구에서 축적된 수많은 지식들이 활용될 것이다. 이렇게 축적된 지식과 실험에서의 빠른 발전에 힘입어 멀지 않은 미래에 이차원에 강하게 속박된 이들 준입자들의 집단 상전이 현상 역시 연구될 가능성이 있다. 이와 같이 앞으로 더 많은 이차원 결정 및 그 복합체에서 여러 가지 집단 들뜸과 대칭성이 깨어진 상태에 대한 연구가 활발할 것으로 기대되며, 이를 통해서 여러 층상물질들에서 관찰되었으나 아직까지 잘 해결되지 못한 물리학의 오랜 난제들, 예를 들어 고온 초전도체성 물질의 성질 등을 해결할 새로운 실마리를 찾을 수도 있을 것이다.

표면에서의 이차원 물리나 반도체 구조 안에서 형성된 양자

우물로 만든 이차원 전자기체와는 다르게 이차원 결정에서의 물리학은 외부에서 주어진 힘으로 인한 결정구조 변화의 물리학적 결과를 직접적으로 볼 수 있다는 점에서 또 다른 흥미로운 특징이 있다. 이는 외부에서 비대칭적인 힘을 받아 형태가 변형된 그래핀에서 전자들이 마치 수백 테슬라 정도의 큰 크기의 자기장이 걸렸을 때를 흉내 낼 수 있다는 것을 알아내면서 상당히 많은 연구들이 시작되었다.^[22] 기계적 변형으로 전자구조의 영향을 주거나 혹은 그 반대로 전자구조의 변화가 기계적 성질을 바꾸는 점도 흥미롭다.^[23] 이는 폴리머나 박막 등의 유연물질을 다루는 물리학적 도구들을 양자역학이 지배하는 이차원 결정들에서 차용하여 두 분야를 새롭게 합쳐서 연구할 기회를 제공한다. 앞으로 이러한 기계적 변형이 주는 결과들은 그래핀뿐만 아니라 다른 새로운 이차원 결정, 그리고 그들의 복합체에서도 활발하게 연구될 것이고 조금 더 유연물질을 다루는 분야의 방식을 차용하여 풍부해질 것으로 예상된다.

이차원 결정을 층상물질에서 따로 내어서 실험을 수행하는 방법 이외에도 여러 가지 화학적 방법을 이용하여 대규모의 이차원 결정을 길러내는 방법도 연구되고 있다. 이는 실용적인 연구를 위하여 대단히 중요한 일이지만, 결정 성장에 관련된 근본적 연구에도 중요한 의미가 있다. 이를 통하여 서로 다른 두 가지 결정들을 연이어서 한 면에서 키우는 방법에 대한 연구가 발전할 것으로 예상된다.^[24] 결국, 서로 다른 이차원 결정이 끊어지지 않고 자라게 되어서 만들어진 경계면의 일차원 물리학을 연구하게 될 것이다. 이는 마치 삼차원 결정의 이차원 표면 물리학을 연구하듯, 이차원 결정의 일차원 모서리에

REFERENCES

- [16] A. Ohtomo and H. Y. Hwang, *Nature* **427**, 423 (2004).
- [17] V. N. Kotov, B. Uchoa, V. M. Pereira, F. Guinea and A. H. Castro Neto, *Rev. Mod. Phys.* **84**, 1067 (2012).
- [18] A. S. Mayorov, D. C. Elias, M. Mucha-Kruczynski, R. V. Gorbachev, T. Tudorovskiy, A. Zhukov, S. V. Morozov, M. I. Katsnelson, V. I. Falko, A. K. Geim and K. S. Novoselov, *Science* **333**, 860 (2011); R. T. Weitz, M. T. Allen, B. E. Feldman, J. Martin and A. Yacoby, *Science* **330**, 812 (2010).
- [19] J. T. Ye, Y. J. Zhang, R. Akashi, M. S. Bahramy, R. Arita and Y. Iwasa, *Science* **338**, 1193 (2012).
- [20] Z. Ye, T. Cao, K. O'Brien, H. Zhu, X. Yin, Y. Wang, S. G. Louie and X. Zhang, *Nature* **513**, 214 (2014).
- [21] K. F. Mak, K. He, C. Lee, G. H. Lee, J. Hone, T. F. Heinz and J. Shan, *Nature Materials* **12**, 207 (2013).
- [22] F. Guinea, M. I. Katsnelson and A. K. Geim, *Nature Physics* **6**, 30 (2010).
- [23] S. J. Woo and Young-Woo Son, *Phys. Rev. B* **87**, 075419 (2013).
- [24] P. Levendorf, C.-J. Kim, L. Brown, P. Y. Huang, R. W. Havener, D. A. Muller and J. Park, *Nature* **488**, 627 (2012).

대한 연구가 활발히 이루어질 수 있을 것이며, 여기서 화학적 흡착, 전자나 양공의 주입, 일차원 전자기체의 전례없이 정밀한 규칙적 배열 등의 실험적 구현을 기대해본다. 이러한 연구 개발은 현재 여러 가지 어려움을 겪고 있는 이차원 결정으로부터 만들어지는 일차원 나노선 구조 제작에 돌파구가 될 수도 있으며 이를 통하여 일차원 나노선 구조의 물리적, 화학적, 기계적 성질 연구를 할 수 있는 기회를 제공해줄 것으로 기대해본다.

본 글에서 마지막으로 생각해보는 연구주제는 이차원 결정구조들 사이의 틈에 갇혀 있거나, 혹은 그 위, 아래에 흡착하는 원자, 분자, 폴리머 등의 상전이들과 이와 관련된 이들의 집단 운동이다. 이미 이러한 연구는 탄소나노튜브가 만들어내는 준 일차원 공간에서 벌어지는 물분자들의 상전이, 금속 원자의 특이한 운동을 통하여 많은 지식이 축적되어 있는 상태이다. 이차원 결정들과 이들의 복합체는 이제 이 분야의 연구에서 빠져 있는 마지막 이차원 공간에서의 연구기회를 제공한다고 볼 수 있다. 이미 여러 층 그래핀과 산화그래핀이 만들어내는 마구잡이로 연결된 이차원 공간 안에서 벌어지는 새로운 분자들의 물리화학적 성질 변화에 많은 관심이 집중되고 있다.^[25] 물론, 이러한 연구들은 바로 인접한 응용분야로 확장 발전될 가능성이 폭발적인 면도 있다.^[26] 하지만, 원자나 분자들이 이차원 결정들의 틈에 갇혀 있는 상황은 지금까지 실험으로는 구현해내지 못한 새로운 분야임에 틀림없다. 예를 들어 이차원 결정이 만들어내는 공간에서 결정 사이의 거리에 따라 물의 상전이의 양상이 변화할 것으로 예상된다.^[27] 또한, 이차원 결정의 유연성과 이에 따른 외부 힘에 의한 형태 변형에 따른 내부에 갇혀 있는 분자들의 집합적인 성질 변화 등도 재미있는 연구주제가 될 것이다.

지금까지 간략하게 살펴본 바와 같이 이차원 결정들을 분리하거나 새로운 복합체를 만들어 내는 연구들은 매우 빠르게 변화하고 있다. 그러나, 이 짧은 글로 미래를 생각해 본다는 것은 어쩌면 불가능할 일인지도 모른다. 본 글에서는 많은 부분이 누락되었는데, 예를 들면 이차원 결정 복합체에서의 플라즈모닉스 분야,^[28] 이차원 결정에서 위상학적 전류,^[29] 밸리 의존 전류,^[30] 그리고 이차원 결정에서 자성 연구 등을 들 수 있다. 사실, 십여 년 전만 하더라도 이렇게 여러 층상형 물질들을 분리해 내서 이차원 결정들과 그것으로부터 파생된 나노구조에 대한 연구가 이렇게 폭발적으로 성장할 것이라고 예측했던 사람들은 그렇게 많지 않았을 것이다 (2004년 미국물리학회에서 그래핀 분리의 첫 단계를 보여준 발표에 참가한 청중의 숫자를 생각해 보면 지금의 성장이 얼마나 놀라운지 알 수 있다). 현재 이 분야의 연구는 본 글에서 언급한 예측 가능한 방향으로의 발전뿐만 아니라 아마도 우리가 현재 전혀 생각하지도 못한 새로운 연구주제의 등장으로 매우 새로운 국면으로 발전할 수 있는 가능성 또한 크게 열려있다.

REFERENCES

- [25] R. R. Nair, H. A. Wu, P. N. Jayaram, I. V. Grigorieva and A. K. Geim, *Science* **335**, 442 (2012).
- [26] B. Mi, *Science* **343**, 740 (2014).
- [27] D. W. Boukhvalov, M. I. Katsnelso and Y.-W. Son, *Nano Lett.* **13**, 3930 (2013).
- [28] A. N. Grigorenko, M. Polini and K. S. Novoselov, *Nature Photonics* **6**, 749 (2012).
- [29] J. C. W. Song, P. Samutpraphoot and L. S. Levitov, <http://arxiv.org/abs/1404.4019> (2014).
- [30] K. F. Mak, K. L. McGill, J. Park and P. L. McEuen, *Science* **344**, 1489 (2014).