

그래핀의 매력: 새로운 물리현상의 보고

DOI: 10.3938/PhiT.19.060

서순애

What Makes Graphene Special?: Treasure Box of New Physics

Sunae SEO

Graphene is a two dimensional atomic carbon monolayer of honeycomb structure. Graphene can form better known graphite by weak interaction among graphene layers or become carbon nanotubes or fullerenes through edge bonding. The Nobel Prize was granted to two scientists who succeeded in isolating and identifying genuine graphene from naturally abundant graphite using almost Neanderthalic methods. It appeared surprising at first look, but graphene has shown itself to be worthy of the rewards by it's explosive progress in technology and following applications. We will introduce what is behind the glory of graphene from the view point of physics.

들어가면서

그래핀(graphene)은 탄소 원자들이 2차원 상에서 벌집모양의 배열을 가진 원자 한 층을 명명한다. 그래핀을 여러 장 쌓으면 층과 층 사이 약한 결합을 이루면서 흑연이 형성되고, 그래핀을 말면 그래핀 끝(Edge) 부분이 결합을 하여 튜브 모양이 되거나 공 모양이 되는데 이러한 탄소 나노튜브나 풀러렌(fullerene) 등은 저 차원 물성을 이해하기 위해 오랫동안 연구되어왔다. 그래핀의 노벨상의 의미는 흑연으로부터 한 층의 그래핀을 처음으로 분리시킴으로써 소자를 구현하고 물성을 평가 가능하게 하였다는데 큰 의미가 있다.

사실 그래핀의 2010년 노벨 물리학상 수상은 대부분의 그래핀 연구자들에게 놀라움이었다. 그래핀이 노벨상을 받을 만

한가에 대해서는 논할 여지가 없다. 그래핀의 우수한 특성은 다양한 방면에 응용가능하며 매우 가능성이 높을 것으로 보인다. Andre Geim 교수의 말을 인용하면 “Graphene is stronger and stiffer than diamond, yet can be stretched by a quarter of its length, like rubber. Its surface area is the largest known for its weight.” 그래핀은 바로 금광(goldmine)이다. 그래핀을 이용하면 실리콘 소자에서 늘 논의되는 무어의 법칙(Moore's Law)을 넘어설 가능성을 찾을 수 있다. 그래핀은 일반 금속들이 패턴 공정의 어려움으로 인해 사용하지 못하는 메모리 소자와 같은 많은 전자소자에 사용될 수 있다. 그래핀의 얇고 넓은 단면적과 좋은 전도 특성은 Super-capacitor와 같은 영역에서도 에너지를 저장하고 잘 전달하는 목적으로 사용될 수 있다. 그래핀의 좋은 힘 특성, 빛에 대한 고 민감도 등은 현재 세계적인 이슈가 되고 있는 태양전지나 LED와 같은 소자들의 효율을 향상시키고 터치 스크린(flexible touch screens), 광 검출기(photodetectors)와 같은 소자 적용도 가능해 보인다. 단지 놀라움은 2010년이라는 시기에 대한 것이다.

그러나 그래핀의 발전이 매우 빠른 것만은 인정하지 않을 수 없다. 학문적으로는 2004년 사이언스 발표 이후 투고되는 논문들이 기하급수적으로 늘어나고 있으며 기술적으로는 대량 생산이 가능한 화학 증착 기상법(CVD) 등을 이용한 그래핀의 성장과 소자 제작이 매우 성공적으로 이루어지고 있다. 또한 일부 그래핀 관련하여 창업을 하는 벤처 기업들이 세계적으로 만들어지고 있으며 일부 대기업에서도 응용 가능성을 검토하고 있다. 어찌 보면 노벨상은 이런 추세를 인정하고 다양한 분야의 노력들이 빠른 시일 안에 현실적으로 가능한 그래핀 상용화를 이루어낼 것이라는 믿음을 바탕으로 주어졌다고 봐야 될 것 같다. 여기서는 그래핀의 어떤 점이 이런 놀라운 성과를 이루어 내게 했을지에 대해 그래핀 자체를 물리적인 관점에서 들여다 보고자 한다.

본문

현재까지 우리가 살고 있는 3차원 세상에서 여전히 중요한 역할을 하는 물질들은 단순하고 예측 가능해 보이는 2차원에

저자약력

서순애 박사는 서울대학교 이학박사(2002)로서 2002년부터 현재 삼성종합기술원 연구원으로 재직하고 있으며, 미국 스탠포드대학교 Visiting Scholar(2004-2005)를 거치기도 하였다. 현재는 Graphene Transistor 관련 연구를 하고 있다. (sunaeseo@samsung.com)

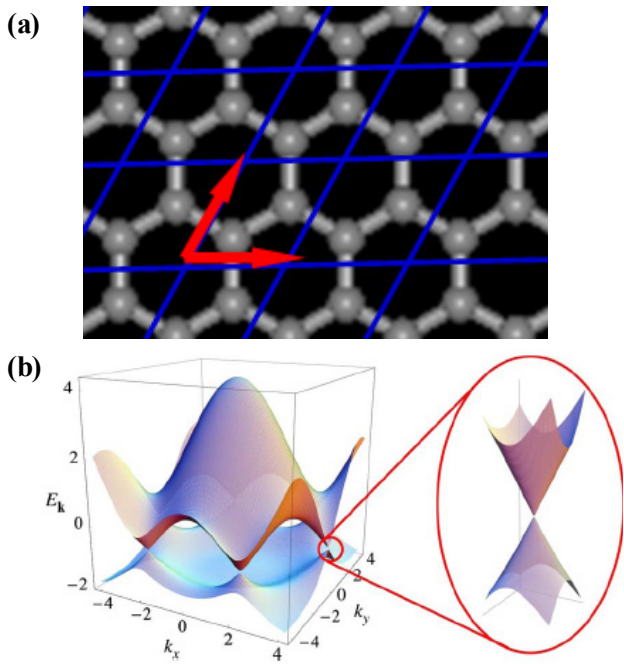


Fig. 1. (a) The honeycomb lattice of graphene. The blue and red lines shows translational symmetry and unit lattice vector respectively. (b) The electronic band structure of graphene in momentum space.

주로 존재한다. 2차원 물질은 0차원이나 1차원 대비 의도적으로 만들어 온 것들이다. 예를 들면 실리콘 트랜지스터나 HEMT(high electron mobility transistor)와 같은 고속 동작 소자들에 사용되는 실체들이 그러하다. 실리콘 트랜지스터는 외부전압을 인가하여 전자를 수 나노미터 영역의 2차원 반전층에 가두어 전자의 밀도와 속도를 정교하게 조정한다. HEMT는 화합물 반도체인 GaAs나 AlGaAs와 같이 밴드갭이 서로 다른 반도체를 접합시켜서 얇은 2차원 자유전자가 존재하는 영역을 만든다. 물리학자들은 이런 의도적인 구조가 아니라면 2차원 구조는 열역학적인 이유 때문에 자연에서 자발적으로 얻어내지는 못할 것이라고 생각했었다. 결국 스키타이프가 그렇지 않음을 세상에 알려 주었고 그래핀이라는 자연적으로 존재하는 스타를 발굴하게 한 것이다.

사실 스키타이프에 의해 그 탄생을 본 것은 그래핀만은 아니었다.^[1] 그래핀이 다른 물질들 사이에서 유난히 사람들의 이목을 집중할 수밖에 없는 이유는 그래핀의 독특한 전자구조 때문이다. 그래핀은 탄소원자가 벌집구조로 결합되어 있는 구조이다(그림 1). 격자의 단위 낱칸(unit cell) 내에는 동일한 두 개의 탄소 원자가 존재한다. 탄소의 4개의 최외각 전자는 다이아몬드의 경우 1개의 탄소 2S 궤도함수와 3개의 2P 궤도함수가 혼성 Sp3 결합을 이룬다. 그러나 그래핀의 경우는 탄소간의 결합이 1개의 2S 궤도함수와 2개의 2P 궤도함수가

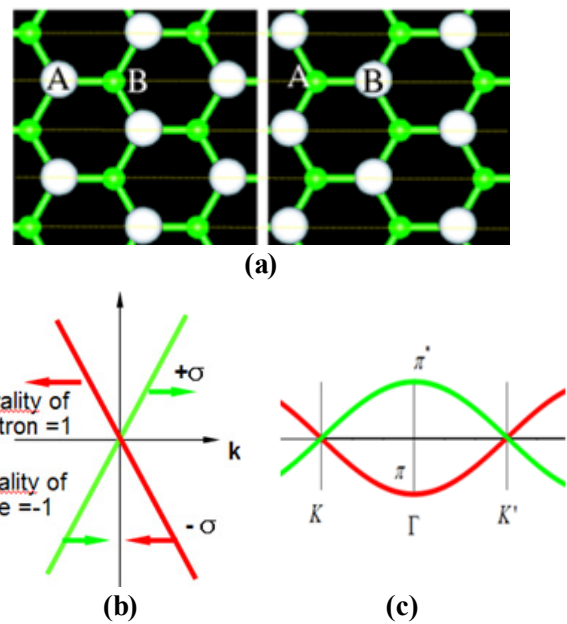


Fig. 2. (a) The wave functions of A and B atoms (b) Graphene band structure near K point. Green and red lines indicate pseudo-spin and the direction of green and red arrows means the chirality of electron and hole. (c) Bonding (π) and anti-bonding (π^*) of Pz orbital. K and K' are in-equivalent Dirac point and Fermi level resides in this points.

Sp2의 혼성 궤도함수를 형성하고 σ 결합을 이루고, 남은 2Pz 궤도함수는 다른 탄소들과 π 결합을 한다. σ 결합의 결합 밴드는 매우 안정하여 모두 차고 반결합 밴드는 매우 불안정하여 모두 빈다. 반면, π 결합의 결합밴드와 반결합 밴드는 디랙점(Dirac point)이라 불리는 두 점에서 서로 교차하며, 여기에 페르미 준위(Fermi level)가 걸린다.

그래핀의 벌집구조 내 전자의 광충뒤키(hopping)는 그림 2에서 보여주듯이 단위 낱칸 내에 두 개의 동일한 원자 위치(A, B)가 존재한다는 점에서 매우 중요하다. 그래핀의 운동량 공간 상에서의 밴드구조는 이러한 두 원자 위치에서의 파동함수를 바탕으로 기술된다. 디랙점 근처에서 그래핀의 밴드구조는 그림 2(a)에서 보는 것처럼 기저(basis)가 다른 두 위치의 A, B 파동함수 기저에 의해 $E_{\pm}(k) = \hbar v_F |\vec{k}|$ 선형 분산을 나타낸다. 이때의 고유함수는 $|\hat{k}, \pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} e^{-i\varphi/2} \\ \pm e^{i\varphi/2} \end{pmatrix}$ 이고 이 때 v_F 는 Fermi velocity이고 $\cos \varphi = \hat{k} \cdot \hat{x}$ 는 정의된다. 이는 두 개의 스핀 1/2 입자가 존재하는 계에 대해 어떤 주어진 축에 대해 표현할 때 (자기장 인가 등을 통해서) 각각의 스핀

REFERENCES

[1] K. S. Novoselov, D. Jiang, F. Schedin, T. J. Booth, V. V. Khotkevich, S. V. Morozov and A. K. Geim, PNAS **102**, 10451 (2005).

은 $+1/2 \uparrow$ 이거나 $-1/2 \downarrow$ 로 존재할 수 있고 따라서 4개의 기저(홀결함, 세결함) 상태를 가지게 되는 상황과 동일한 상황이 된다. 동일한 A와 B 탄소 원자가 스핀과 동일한 역할을 하게 된다는 뜻이다. 스핀-자기장 시스템을 유사스핀운동량(pseudospin-momentum)계의 연장선에서 고려하면 쉽게 이해 가능하므로 그래핀 내 전하에 대해 유사스핀을 도입한다. 그래핀의 전도띠(conduction band, $E > 0$)의 전자는 운동량과 평행인 유사스핀을 가지게 되고 원자가띠(valance band, $E < 0$) 내의 양공(hole)은 운동량과 반대 방향의 유사스핀을 가져야 한다. 이러한 A, B 자리 차에 의해 결정되는 운동량 공간에서의 부호를 유사스핀이라고 부른다. 따라서 이러한 현상을 전자의 나선성(chirality)=1, 양공의 나선성=-1로 정의한다. 다시 말해 유사스핀의 보존을 나선 전하(chiral charge) 개념으로 이해하면 된다(그림 2(b)). 정리하면 그래핀의 독특한 밴드구조는 디랙점 근처에서 선형인 밴드구조를 지닌다는 점과 A, B라는 동일한 탄소 원자에 의해 K, K'점이라는 동일하지 않은 디랙점들이 존재하며(그림 2(c)) 그래핀은 유사스핀을 보존하기 위해 나선성을 가지게 된다. 그래핀의 유사스핀은 그래핀의 전기적 특성에도 영향을 미친다. 일반적인 고체와는 달리 단일 사건 산란에서 그래핀 내 전자는 후방산란을 하게 되면 유사스핀이 바뀌어야 하기 때문에 이런 일은 금지되어 일어나지 못한다. 그래핀이 저온에서 일반 2차원 물질과는 매우 다른 반국소화(antilocalization) 현상을 보이게 되는 원인이 바로 유사스핀 때문이다.

그래핀의 밴드구조는 1946년 이미 P. R. Wallace^[2]에 의해 계산되었으나 당시에는 순수한 2차원 그래핀은 존재하지 않았고, 2차 세계대전 이후 원자로의 중요한 물질인 흑연(graphite)을 연구하기 위한 출발점으로써만 연구되었다. 반데르발스(Van der Waals) 결합으로 약하게 연결된 그래핀 층들을 이해하는 것이 흑연을 이해하는 것이었다. 그래핀의 밴드구조는 일반적인 포물선 모양의 고체의 밴드구조와는 매우 다르다. 그래핀은 페르미 준위에 전자의 상태밀도가 존재하지 않기 때문에 흑연과 같은 금속이 아니고 또한 밴드갭이 존재하지 않는다는 측면에서는 절연체도 아니다. 약간의 전하를 첨가하면 쉽게 도체로 변한다. 그런 의미에서 반금속(semi-metal)이라는 이름이 주어졌다. 또한 일반 금속과는 달리 도핑을 어떻게 시키느냐에 따라 쉽게 전하운반자의 종류를 변화시킬 수 있는 양극성 특성을 띤다.

그래핀의 가장 흥미로운 특성은 밴드구조에서 보여주듯이 전하는 슈뢰딩거 방정식이 아니라 디랙 방정식을 따라 전하의 파동함수가 기술된다는 점이다. 디랙점 근처에 존재하는 전자는 유효질량이 $(=1/(\partial^2 E/\partial^2 k))$, 에너지 운동량 공간에서 2차 미분으로 정의됨) 선형 밴드구조에서 영이 된다. 이런 의미에

서 그래핀의 전하 운반자는 무질량 디랙 페르미온(massless Dirac fermion)이라고 불린다. 무질량 디랙 페르미온은 광자와 같은 무질량 입자의 양자전기역학계(QED)를 모방한다. 단지 광속이 아니라 일반 금속 내에 존재하는 전자의 Fermi velocity와 유사한 정도의($\approx 1/300$) 낮은 속도로 움직인다는 차이만 있을 뿐이다. 이러한 점에서 그래핀 내 전자는 일반 고체 내 전자와는 매우 다른 특성을 띠게 된다. 그래핀은 일반 금속과 달리 쉽게 전자와 양공 사이에서 변화하면서 전도 특성을 변화시킬 수 있다. 일반 고체에서는 전자와 양공은 서로 다른 슈뢰딩거 방정식으로 기술되고 그들의 유효질량도 다르다. 그러나 그래핀 내의 전하는 QED 내의 전하켄레(charge conjugation) 대칭과 유사하다. 그래핀의 전자와 양공을 기술하는 파동함수는 두 개의 부분격자 A, B의 상대적인 위상에 의해 결정되며 이는 QED에서 스피너 파동함수와 매우 유사하다. 이러한 현상은 3차원 QED에서의 나선성(chirality)과 완전히 동일하다.

그래핀과 QED의 유사성은 다른 놀라운 현상들의 관측도 가능하게 하였다. 그 중의 하나가 클라인(Klein) 터널링이다. 일반적으로 전하가 포텐셜 장벽을 만날 때 장벽의 높이가 입자의 에너지보다 크면 전자는 장벽 안에 갇히게 된다. 양자역학적인 터널링은 고전적으로 넘어가지 못하는 영역을 통과할 수 있는 확률을 제공할 수 있다. 그러나 포텐셜 장벽의 크기와 넓이에 따라 투과율은 지수함수적으로 감소한다. 클라인 패러독스(Klein paradox)는 전자가 포텐셜 장벽을 만났을 때 포텐셜 장벽의 크기가 전자의 정지에너지(mc^2)의 두 배를 넘어서면 전자가 장벽을 통과하게 되며 결국은 장벽 크기에 상관 없이 완벽한 투과를 보이게 된다. 이러한 클라인 터널링과 관련된 패러독스는 상대론적인 입자가 매우 크고 넓은 장벽을 투과할 수 있다는 것으로 주로 블랙홀에서 입자-반입자 쌍을 형성하면서 이루어진다. 클라인 터널링이 일어나려면 전자의 컴프턴 파장(2.43×10^{-12} m) 영역에서 10^{16} V/cm 상당의 큰 전기장이 필요하다. 그래핀의 무질량 디랙 페르미온은 클라인의 사고실험(gedanken experiment)을 실제로 가능하게 하였다. 질량이 없기 때문에 반입자인 양전자를 만들기 위한 최소한의 전기장도 필요가 없다. 실제로 그래핀 샘플에서 전기장이 0.1 MV/cm 이상이면 이러한 클라인 터널링이 관측 가능해진다. 이 전기장은 일반적으로 상대론적 입자에서 클라인 터널링을 관측하기 위한 것보다 10^{11} 정도가 낮은 수준이다.^[3] 그래핀에서 이러한 포텐셜 장벽들이 존재하는 P-N 접합이 형성되면 이

REFERENCES

[2] P. R. Wallace, Phys. Rev. **71**, 622 (1947).
 [3] M. I. Katsnelson, K. S. Novoselov and A. K. Geim, Nature Physics **2**, 620 (2006).

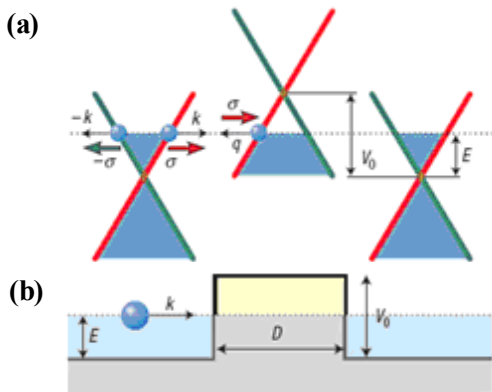


Fig. 3. (a) The graphene band structure of PNP junction. (b) Potential barrier structure.

것은 결핍층(depletion layer)에 의해 만들어지는 반도체의 P-N 접합과는 매우 다르게 된다. 물리적으로 보면 장벽에 수직으로 입사하는 전자는 유사스핀 보존 때문에 반사되지 못한다는 것과 유사한 맥락에서 해석 가능하다. 그림 3에서 보는 것과 같이 N 영역에 k 의 운동량을 가지고 입사하는 전자는 반사되지 못하고 P 영역에 비어있는 원자가 띠 내 동일 유사스핀을 가지고 반대방향으로 움직이는 양공을 생성하게 된다. 이렇게 생성된 양공이 바로 QED에서는 양성자의 역할을 하는 것이다.

그래핀의 놀라운 특성은 여기서 그치지 않는다. 가임과 노보셀레프의 발견 뒤에 그래핀을 더욱 매혹적으로 만든 것은 새로운 전기적 특성의 발견이 있었다. 미국 콜롬비아 대학의 김필립 교수 연구팀은 반정수 양자 홀 효과(halfinteger quantum-Hall effect)를 관측함으로써 그래핀 내에 존재하는 전하들이 기존 2차원 전자와 다르게 움직인다는 것을 보여주었다.^[4] 자기장이 가해진 상태에서 평면상에서의 고체 전도도는 아래와 같은 행렬 형식으로 표현될 수 있고 $\begin{pmatrix} J_x \\ J_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix}$ 이때 비대각항이 홀 전도도에 해당된다. 일반적으로 평면에 수직인 방향에 자기장을 가해주면 자기장 하에서 움직이는 전자들은 로렌츠 힘을 받게 되고 결과적으로 평면 내에 전기장 방향에 수직인 방향의 전기장(홀 전압)이 발생하게 되는데 이를 홀 효과(Hall effect)라고 한다. 2차원에 존재하는 전자들은 평면에 수직인 방향으로 충분한 자기장을 가하면 전자는 2차원 평면상에 사이클로트론 궤도에 제한되어 양자화된다. 이러한 궤도상의 양자화는 에너지 준위의 양자화를 의미하고 이런 양자화된 에너지 준위를 란다우 준위라고 한다. 이렇게 양자화된 전자들이 홀 현상과 관련하여 관측되는 경우를 양자 홀 효과(quantum hall effect)라고 한다. 일반적으로 2차원 포물선 분산을 보이는 고체 내의 란다우 준위는 $E_n = \hbar\omega_c(n+1/2)$ 이고 그래핀의 무질량 디랙 페르미온의 란다우 준위는 $E_n = \sqrt{2|e|B\hbar v_F^2 n}$ 과 같이 표현된다. ω_c, n, B 는 각각 사이클로트

론 주파수, 란다우 준위 수(정수), 자기장에 해당된다. 정수양자 홀 효과는 전도도 측정을 통해 확인되는데 하나의 란다우 준위를 통과한 직후 다음 란다우 준위를 만날 때까지는 홀전도도(σ_{xy})는 상수로 나타나게 된다. 동시에 전자들의 전도도는 이차원 평면상에서는 접근 가능한 DOS가 없기 때문에 에너지 갭이 생기게 되어 전하들은 이차원 평면 내에서 흐를 수 없게 되어($\sigma_{xx} = j_x/E_x \approx 0$) 이러한 이유로 $\rho_{xx} = \sigma_{xx}/(\sigma_{xx}^2 + \sigma_{xy}^2) \approx 0$ 로 저항(longitudinal resistance) 또한 0이 된다. 그러나 평면의 경계면에서는 전도 채널이 형성될 수 있는데, 이는 이차원 평면과 맞닿은 주변(예를 들어, 진공)이 마치 포텐셜 우물처럼 작용하여 란다우 준위들이 휘게 되고, 이로 인해 평면 내에서는 페르미 준위 아래에 존재하던 란다우 준위들이 평면의 경계에서 페르미 준위 위로 올라가게 되기 때문이다. 즉, 평면의 경계를 따라 전도가 가능한 상태들이 만들어진다. 이차원 상태를 끝머리 상태(edge state)라고 하며 이러한 끝머리 상태는 운동량이 다른 전자들이 위치적으로 분리되어 산란하지 못하기 때문에 전류는 에너지 손실이 없다. 이러한 전도에 의해서는 채널 내에 전압강하가 관측되지 않기 때문에 저항은 0이 된다.

그래핀의 양자 홀 효과가 관심을 끌게 된 이유는 무엇보다 다른 고체와는 달리 상온에서도 쉽게 양자 홀 효과가 관측될 수 있다는 점이다. 그 이유는 상온에서의 열에너지보다 란다우 준위 사이의 간격($\sqrt{2|e|B\hbar v_F^2}(\sqrt{n+1}-\sqrt{n})$)이 크기 때문이다. 가령 자기장 $B=1$ T가 가해지는 경우 그래핀의 겹침 $g=4$ (스핀과 유사스핀, Zeeman 갈라지기 에너지는 0.12 meV로 매우 작아서 스핀 역시 겹쳐있음) 임으로 $D_{LL} = geB/h \approx 10^{10} / \text{cm}^2$ 정도가 된다 (D_{LL} 는 란다우 준위의 상태밀도, g 는 축퇴). 상온에서 그래핀의 최대 유도 가능한 전자의 양이 $10^{13} / \text{cm}^2$ 이라면 약 100개의 란다우 준위가 채워지게 된다. 이때 에너지 준위가 높아질수록 준위 사이의 간격은 좁아지는데 가장 낮은 에너지를 갖는 란다우 준위 사이의 에너지 간격은 $E_1 - E_0 = \sqrt{2|e|B\hbar v_F^2} = 36$ meV로 상온에서의 열에너지 25 meV보다 크기 때문에 자기장이 1 T만 걸려도 가장 낮은 에너지 사이의 갭에서 발생하는 양자 홀 효과가 관측되게 된다. 게이트 전압을 통해 전자밀도를 변화시키거나 고정된 전자밀도에서 자기장을 변화시키면 페르미 준위가 란다우 준위 사이를 변화하게 되어 양자 홀 현상이 나타나게 된다. 양자 홀 효과는 따라서 자기장이 클수록 잘 관측되지만 자기장이 커지면 또한 란다우 준위의 겹침이 증가하기 때문에 낮은 준위만이 점점 관

REFERENCES

[4] Yuanbo Zhang, Yan-Wen Tan, Horst L. Stormer and Phillip Kim, Nature 438, 201 (2005).

여하게 된다. 그래핀에서 양자 홀 현상이 관측이 용이한 또 다른 이유는 고온에서 그래핀의 이동도가 크기 때문이기도 하다. 란다우 준위의 넓어지는 효과가 이동도가 클수록 작아지기 때문에 이 또한 그래핀에서 양자 홀 효과 관측을 용이하게 한다.

그래핀의 양자 홀 효과는 일반적인 2차원과는 다른 양자 홀 현상을 보인다는 측면에서 흥미롭다. 일반 2차원 구조에서는 $\sigma_{xy} = gne^2/h = (0, \pm 1, \pm 2, \dots)2e^2/h$ 정수 배로 나타나지만 그래핀에서는 $\sigma_{xy} = g(n + 1/2)e^2/h = (\pm 1/2, \pm 3/2, \dots)4e^2/h$ 반정수효과로 나타나기 때문에 반정수 양자 홀 효과라고 부른다. 이러한 반정수 양자 홀 효과의 원인은 그래핀에서는 $E=0$ 에 란다우 준위가 존재하고 이 준위는 전자와 양공이 겹쳐서 존재하기 때문이다. 페르미 준위가 전자나 양공 쪽으로 옮겨가면 여전히 간격은 $4e^2/h$ 정수배로 나타나지만 전도도가 영 근처에서 전자나 양공의 겹친 상태 때문에 $\pm 1/2$ 로 나타나게 되는 것이다. 그리고 $g(n + 1/2)$ 은 채움인자에 해당된다.

그래핀의 독특한 밴드구조에서 나타나는 새로운 실험 현상 뿐만 아니라 그래핀은 $15000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 이상의 상온의 거대 이동도 때문에 전자 소자에 필요한 신 물질을 탐구하던 연구자들에게 큰 주목을 받았다. 고이동도를 가지는 것으로 알려진 GaAs와 같은 2DEG(two dimensional electron gas) 역시 전자의 이동도가 매우 높고 낮은 유효질량으로 인해 HEMT와 같은 고속 아날로그 소자나 실리콘을 대체할 만한 소자로 연구되어 왔다. 그러나 2DEG은 저온에서 변조(modulation) 도핑을 통해 그래핀보다도 더 높은 이동도를 가지지만 저온에서의 급격한 상승에도 불구하고 상온에서는 크게 개선되지 못하였다. GaAs의 경우 최대 전자 이동도는 $8500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ (실리콘 $\sim 1400 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) 정도가 관측되었으나 양공 이동도는 $400 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ (실리콘 $\sim 450 \text{ cm}^2/\text{Vs}$)으로 매우 낮다. 일반적으로 상온에서의 산란은 주로 격자진동에 의한 포논에 의해 이루어진다. 온도가 감소하면 이러한 포논이 freezing되면서 산란의 원인이 되지 못하고 주로 불순물이나 결함이 산란의 원인이 되어 이동도에 영향을 준다. 그러나 그래핀의 경우는 이동도가 온도 의존성을 크게 띠지 않는다. 그림 3은 그래핀의 포논 에너지 밴드를 보여주고 있다. 그래핀의 Γ 포인트 광포논(optical phonon) 에너지는 175 meV (2000 K)로 상온($25 \text{ meV} = 300 \text{ K}$)에서 포논은 충분한 열에너지를 갖지 못하여 활성화되지 못하고 따라서 전자들의 이동을 방해하는 인자가 되지 못한다.^[5] 이는 그래핀의 이동도는 주로 불순물이나 결함에 의해 결정된다는 뜻이다. 최근 그래핀의 이동도를 불순물 밀도나 온도가 증가하면서 소리 포논(acoustic phonon)에 의한 산란과 상온에서는 기관의 극성포논에 의한 산란 등을 중심으로 주로 기술한다. 이는 그래핀의 이동도는 그래핀의 고유한 특성이 아니라 결함이나 기관 등의 주변 환경에 의해 크게 영향을 받으며

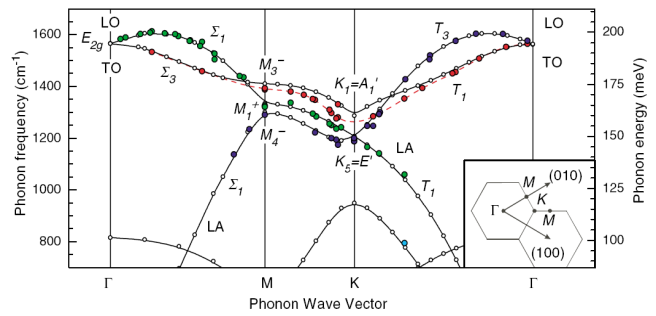


Fig. 4. Graphene Phonon structure calculated by first principle method.

따라서 그래핀 소자 제작 공정이 그래핀의 전기적 전도 특성에 매우 중요한 역할을 할 것임을 의미한다.

마지막으로 그래핀의 나선성과 상관은 없지만 그래핀의 2차원 갭이 없는 밴드 특성에 의해 결정되는 매우 중요한 한 가지 특성이 있다. 이는 고주파에서의 전도도가 $G = e^2/4h$ 로 보편상수(universal constant)가 된다는 점이다. 따라서 이에 따른 독립된(freestanding) 그래핀의 광투과율이 주파수에 무관하며 미세구조상수 $\alpha (= e^2 h/c)$ 에 의해 전적으로 결정된다. (c 는 광속) 광 투과율 $T = (1 + 2\pi G/c)^{-2} = (1 + \pi\alpha/2)^{-2}$ 는 결국 그래핀의 층수에 따라서 일률적으로 결정된다는 뜻이다.^[6,7] 계산에 따르면 한 층당 2.3% (550 nm 파장)의 투과도 감소로 나타난다. 이러한 그래핀의 특성은 투명 전극과 같은 응용 소자에 그래핀을 활용함에 있어서 매우 중요한 특성이다.

맺음말

탄소 나노튜브의 경험은 우리에게 우수한 특성 뒤에 따르는 여러 문제점들이 얼마나 큰 장애가 될 수 있는지를 이야기해주었다. 그래핀의 상용화는 언젠가는 가능할 수 있을 것이다. 하지만 단계적인 고찰에 바탕을 두지 않는 선부른 기대는 오히려 발전을 저해할 수도 있음을 인지해야만 한다. 또한 그래핀은 기존의 소자와 응용만을 바라보던 입장을 벗어나서 바라볼 수 있는 시각을 마련해야만 한다. 단순히 반도체나 전극 대용 입장에서 그래핀을 바라보면 그래핀의 치명적인 단점들을 극복하기 어려워질 수도 있다. 기존의 사고 방식에서 벗어난 새로운 응용과 시장 창출이 병행되어야만 한다.

REFERENCES

[5] J. Maultzsch, S. Reich, C. Thomsen, H. Requardt and P. Ordejón, Phys. Rev. Lett. **92**, 075501 (2004).
 [6] R. R. Nair, P. Blake, A. N. Grigorenko, K. S. Novoselov, T. J. Booth, T. Stauber, N. M. R. Peres and A. K. Geim, Science **320**, 1308 (2008).
 [7] A. B. Kuzmenko, E. van Heumen, F. Carbone and D. van der Marel, Phys. Rev. Lett. **100**, 117401 (2008).