pISSN 1229-3008 eISSN 2287-6251
Progress in Superconductivity and Cryogenics
Vol.25, No.1, (2023), pp.1~5 https://doi.org/10.9714/psac.2023.25.1.001

Integer and fractional quantum Hall effect in graphene heterostructure

Youngwook Kim*

Department of Physics and Chemistry, DGIST , Daegu, Korea

(Received 1 March 2023; revised or reviewed 14 March 2023; accepted 15 March 2023)

Abstract

The study of two-dimensional electron systems with extraordinarily low levels of disorder was, for a long time, the exclusive privilege of the epitaxial thin film research community. However, the successful isolation of graphene by mechanical exfoliation has truly disrupted this field. Furthermore, the assembly of heterostructures consisting of several layers of different 2D materials in arbitrary order by exploiting van der Waals forces has been a game-changer in the field of low-dimensional physics. This technique can be generalized to the large class of strictly 2D materials and offers unprecedented parameters to play with in order to tune electronic and other properties. It has led to a paradigm shift in the field of 2D condensed matter physics with bright prospects. In this review article, we discuss three device fabrication techniques towards high mobility devices: suspended structures, dry transfer, and pick-up transfer methods. We also address state-of-the-art device structures, which are fabricated by the van der Waals pick-up transfer method. Finally, we briefly introduce correlated ground states in the fractional quantum Hall regime.

Keywords: *graphene, quantum Hall effect, fractional quantum Hall effect, high magnetic field*

1. 서 론

1980년 2월 5일 새벽 2시 Klaus von Klitzing 교수는 프랑스 그레노블에 위치한 고자기장 연구소에서 Si 소자에서 홀 저항이 h/e^2의 정수배로 나눈 값으로 양자화 되는 정수 양자 홀 효과를 발견하였다 [1]. 이어, 1982년 Daniel Tsui, Horst Stomer 교수가 GaAs/AlGaAs의 이종접합 구조에서 홀 저항이 h/e^2의 분수배로 양자화 되는 것을 발견하였다 [2]. 이 두 가지의 발견은 2차원 전자 시스템의 고자장 물성의 시작을 알린 실험이 되었다. 특히 분수 양자 홀 효과는 Robert Laughlin 교수의 Laughlin 파동함수로 설명이 되었고, 전자가 분수화 될 수 있음을 알려주었으며, Fractional Statistics의 진보로도 이루어 졌다. GaAs/AlGaAs 소자 품질의 눈부신 발전으로 양자 홀 edge를 이용한 전자계의 interferometer, Non-Abelian Statistic의 가능성을 보이는 짝수 분모 분수 양자 홀 효과, 양자 홀 영역에서 나타나는 Stripe, Bubble type의 Charge density wave, 그리고 이중 2차원 전자계에서 발견된 Bose-Einstein 응축 상태는 2차원 전자계 연구의 새로운 장을 열었다.

최근에는 자기장 없이 발현되는 양자 홀 효과 (비정상 양자 홀 효과) [3], 양자 스핀 홀 효과 [4] 등 다양한 양자 홀 상태들이 발견되어 연구 중이지만, 아직 소자 품질이 이전의 2차원 전자계 물질만큼 뛰어나지 못하여 다양한 시도는 되지 않고 있다. 이처럼 이차원 전자계 연구는 오랜 기간동안 전하 이동도가 뛰어나게 높은 GaAs/AlGaAs 위주로 다양하게 진행되어왔다. 하지만, 2004년 Graphene의 발견으로 극저온/고자기장 연구는 새로운 시대를 맞이하게 되는데 [5], 그 이유는 첫째, 다양한 연구자 들이 손쉽게 2차원 물질을 연구실에서 다룰 수 있게 되었고, 둘째, 양자 홀 상태의 크기가 기존에 연구되던 GaAs/AlGaAs 상태보다 크기 때문에 극저온 보다는 상대적으로 고자기장 실험에 집중이 되고 있기 때문 이다. 또한 최근에는 2개의 그래핀을 비틀려 접합을 하면 새로운 양자 물성을 볼 수 있음이 발견되어, 최근 20년간 2차원 전자계의 고자기장 물성연구는 그야말로 그래핀의 전성시대임이 틀림이 없다.

본 논문에서는 20년간 그래핀의 고자기장 실험을 가능하게 한 고품질의 그래핀의 제작 방법 및 그래핀 기반의 고자기장 물성, 특히 정수 및 분수 양자 홀 효과의 연구 그리고 전망에 관하여 기술하고자 한다.

* Corresponding author: y.kim@dgist.ac.kr

2. 고품질 그래핀의 제작

앞서 언급한 것처럼 높은 전하 이동도를 가진 2차원 전자 시스템에 대한 연구는 대부분 epitaxial 박막 성장을 통한 소자를 이용하여 진행되어 왔다. Tape 방법을 사용한 그래핀의 성공적인 분리 이후 2차원 전자 시스템의 패러다임은 그래핀 커뮤니티로 전환된다. 상온에서 100,000 cm^2/Vs 를 초과하는 전하 이동성, 또한 디락 시스템의 장점, 그리고 상온 양자 홀 효과, 짝수 분모 양자 홀 효과 등 전례 없는 물리학을 가진 그래핀의 잠재력을 최대한 발휘하기 위하여 20여년에 걸쳐 소자 제작 기술이 개발되었다. 여기서 역사적인 순서대로 소자 제작법을 간단히 소개하려 한다.

2.1. Suspended Device:

초기 그래핀 실험은 SiO_2 기판위에 그래핀을 쌓고, 전극을 달아 연구를 하였다. 그래핀의 큰 양자 홀 갭 덕분에 간단하게 제작된 그래핀에서도 연구실내의 시설 (약 1.5 K 그리고 14T 급 자기장)에서 정수 양자 홀 효과가 보고되었다 [6]. 추후에 미국 탈라하시에 위치한 고자기장 시설과 네덜란드 네이메헨에 위치한 고자기장 시설에서 30 T 이상의 고자기장을 이용하여 그래핀 및 Bernal 구조의

이중층 (bilayer) 그래핀의 스핀과 밸리 대칭성이 깨진 상태를 관측 할 수 있었다 [7]. 하지만, 강한 전자 상호작용의 결과물인 분수 양자 홀 효과는 관측이 되지 않았다. 이 이유는 그래핀의 불순물 농도가 분수 양자 홀 상태의 크기보다 크기 때문이었으며, 결국 전자 상호작용이 극대화된 상태의 고자기장 물성의 관측은 이 불순물 농도를 어떻게 줄이느냐가 큰 화두였다.

그래핀의 소자에서 불순물 농도를 주는 주된 원인은 바로 울퉁불퉁한 SiO_2 기판과 소자 제작시 사용되는 polymer의 residue이다. 이를 돌파하기 위한 소자는 suspended device이다. Suspended device는 기판을 제거하여 그래핀을 공중에 띄우는 방법으로 불순물 농도의 큰 원인인 기판을 제거하는 방법이다. 하지만, 공중에 띄우기 위하여 SiO_2를 식각 시 사용되는 chemical과 마찬가지로 소자 공정에서 오는 polymer의 residue는 여전히 그래핀에 붙어있는 단점이 있다. 이를 제거하기 위하여 강한 전류로 남아있는 residue를 제거하는 방법이 필수적이었으며, 그 결과 불순물 농도가 기존의 SiO_2의 기판의 그래핀 보다 수백 배 줄게 되어, 마침내 그래핀에서 $\nu = 1/3$ 의 분수 양자 홀 상태가 관측되었다 [8]. 하지만 전류를 통한 annealing 방법은 그 성공률이 한자리대로 매우 낮고, multi-terminal 소자를 만들기가 힘든 단점이 존재하였다.

2.2. hBN 기판과 Dry Transfer

Suspended 기판의 단점을 제거하기 위하여 콜롬비아대 연구진들은 공중에 띄운 상태가 아닌 원자 단위로 평평한 기판인 hBN 기판을 찾아냈고, polymer 없이 그래핀을 hBN 위로 전사하는 방법이 개발되었다 [9]. 하지만, 여전히 그래핀의 위쪽표면은 공기 중에 노출되어 있는 상태이며, 소자 공정 시 오는 polymer는 피할 수 없는 상태였다. 이를 제거하기 위에 Ar/H_2 분위기에서 열처리(thermal annealing) 공정이 추가되었다. 본 방법은 상대적으로 성공률이 높아 다양한 연구가 진행되었고, 탈라하시의 30T 급 그리고 45T 고자기장 실험에서 마침내 그래핀의 다양한 분수 양자 홀 상태가 관측되었고 이를 통하여 그래핀의 분수 양자 홀 상태가 SU(4)대칭성을 유지하는 것이 밝혀졌다. 추가적으로 고자기장하에서 소자의 회전(rotation)을 통한 cyclotron gap과 Zeeman gap 조절로 발현하는 양자 홀 상태들의 기원이 spin 혹은 valley 상태인지를 효과적으로 구별하였다. 이에 더하여 hBN과 그래핀의 격자 불일치(lattice mismatch)는 약 1.3%로 두 물질을 잘 정렬하게 되었을 때, 초격자(superlattice)를 만들 수 있게 되었고, 그 결과 이론적으로만 존재하던 Hofstatder의 나비가 고자기장 측정에서 관측되었다 [10].

2.3. 반데르발스 힘 접합방법

위에서 언급한 Dry Transfer 방법은 사실 반쪽짜리 Dry 방법으로 그래핀이 소자 공정 시 오는 polymer residue에 결국 노출되게 된다. 이를 제거하기 위하여 반데르발스 힘 접합 방법이 개발 되었다 [11]. 기본적으로 기판 위에 있는 hBN을 polymer의 도움을 받아 뜯어내고 hBN과 다른 2차원 물질 간의 반데르발스 힘을 이용하여 접합을 이루어 내는 방법이다. 위에 언급한 다른 기타 소자제작 법에 비해 비교적 단순하고, 성공률이 높아 최근 10년간 폭발적으로 2차원 물질을 연구가 된 큰 이유 중에 하나이다. 본 방법을 이용하여 제작된 그래핀의 상온 전하 이동도는 포논 모델의 이론 값인 300,000cm^2/Vs 에 다가갔으며, 저온에서의 전자 이동도도 1,000,000cm^2/Vs 에 이를 정도로 불순물 농도가 매우 낮아졌다.

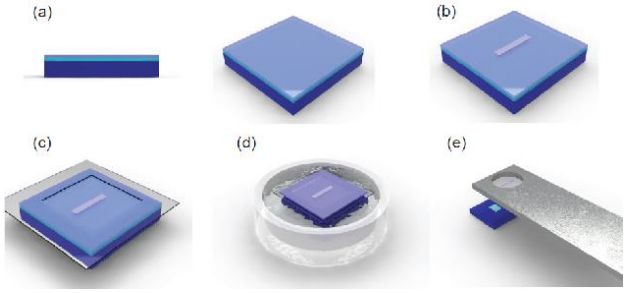

Fig. 1. Schematic of dry transfer method. (a) PMMA/Water soluble Layer coated on top of SiO_2 substrate (b) Graphene on top of the substrate (c) Attached frame at the substrate. (d) Floating substrate on water for dissolving water soluble layer (e) Transferring the graphene assisted by transfer stage.

2.4. 최신 소자의 방법들

최신의 소자 제작은 단순히 그래핀을 hBN으로 감싸는 것에 더하여, 그 위에 Graphite를 추가적으로 감싸는 구조를 이용한다. 이는 SiO_2와 하부 hBN사이 혹은 상부 hBN 위에 있는 remote impurity 들의 영향을 제거하기 위해 Graphite로 추가적으로 screening을 함으로써 그래핀의 소자 퀄리티가 높일 수 있기 때문이다. 또한 사용된 Graphite는 top/bottom 게이트로써 활용이 가능하다. 이는 기존에 사용하는 금속 게이트보다 소자 품질향상 측면에서 역시 이점이 있다. 일반적인 금속 게이트는 결정성이 없는 금속으로 작지만 게이트 전압을 걸 때 potential fluctuation이 있는 반면, Graphite는 단결정으로 그 fluctuation이 매우 적다. 이는 고자기장에서 측정된 그래핀의 Landau level spectroscopy (Capacitance measurement)를 보면 보다 명확하게 구별된다 [12].

그래핀 혹은 2차원 물질의 고자기장 물성이라면 당연히 서론에 언급한 양자 홀과 분수 양자 홀 상태 이다. 알려진 것처럼 양자 홀 상태와 분수 양자 홀 상태에서 벌크는 전류가 흐르지 않고, 가장자리로 Ballistic 한 1D 가장자리 채널(edge channel)이 형성되어 이를 측정하게 되는 것인데, 그래핀의 크기는 매우 작고 그 소자 제작 시 그래핀을 O_2 Plasma로 잘라내기 때문에 그 가장자리가 이론적으로 말하는 zig-zag 혹은 armchair type이 아닌 매우 무질서하며 불순물이 붙어있는 상태이다. 이 때문에 자기장이 없거나 저자기장에서 물성을 측정할 때 다양한 양자 홀, 분수 양자 홀 상태의 측정이 예측되었던 소자에서

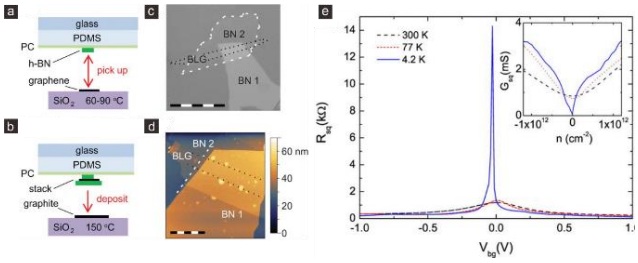

Fig. 2. Van der Waals pick-up transfer method. [P.J Zomer et al., Appl. Phys. Lett. 105, 013101 (2014)]. (a), (b) Schematic method of van der Waals pick-up transfer. (c) Device image of final heterostructure. (d) Atomic Force Microscopy image. (e)Longitudinal resistance as a function of back gate voltage.

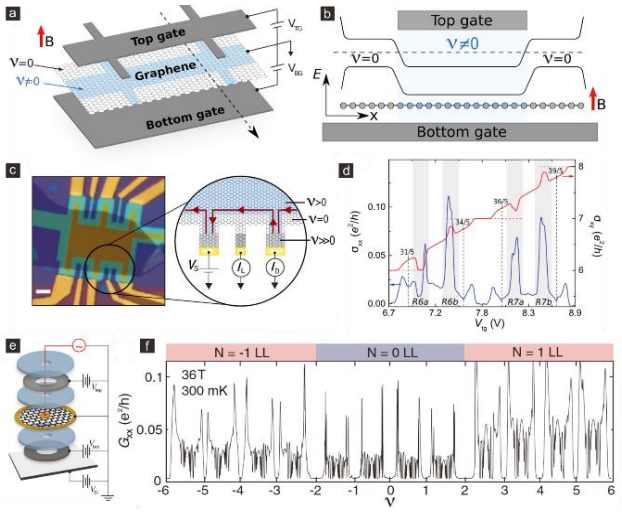

Fig. 3. State-of-the-art devices. [R. Ribeiro-Palau et al., Nano. Lett. 19, 2583-2587 (2019), S. Chen et al., Phys. Rev. Lett. 122, 026802 (2019), Y. Zeng et al., Phys. Rev. Lett. 122, 137701 (2019)] (a)-(b) Confine electrostatic edge. (c) Device image. (d) Re-entrance integer quantum Hall state at third Landau level at graphene. (e)-(f) Device image of Corbino disk device and their transport results.

실제 소자의 가장자리의 깨끗하지 못하여 예상된 양자 상태를 측정을 못하는 일이 대두되었다. 이를 효과적으로 피할 수 있는 방법은 전통적으로 Corbino Disk를 이용하여 벌크 물성만 측정을 하는 방법이 있다. 최근 Flipping transfer 방법을 이용하여 Graphite가 위아래로 감싸져 있는 구조물에서도 Corbino 구조가 가능한 방법이 개발되었으며, 그 결과 매우 높은 order의 분수 양자 홀 상태까지 측정되었다 [13]. 다른 방법으로는 electrostatic하게 가장자리를 define하는 방법이다. 이는 게이트 2개를 사용하여 한쪽 게이트로는 그래핀의 depletion 시켜놓고, 보다 작게 만들어진 Hall Bar type으로 제작된 다른 게이트로 electrostatic 하게 정의된 소자의 모양을 만들고 깨끗한 가장자리 채널을 형성시키는 방법이다 [14]. 본 방법을 이용하여, 그래핀 양자 홀 상태영역에서 최초로 전하밀도파동(charge density wave)이 존재함을 측정하였다. 최근 연구의 다양한 결과는 다음 절에서 좀 더 자세히 기술하고자 한다.

3. 연구동향

앞서 다룬 것처럼, 그래핀 혹은 Bernal 구조의 이중층 그래핀을 연구할 때 hBN 과 Graphite를 활용하여 이종층상 구조를 만들어 실험을 하게 된다. 본 방법이 발견된 이후로 가장 활발하게 연구된 것은 역시나 그래핀 기반 이종층상 구조의 고자기장 물성이다.

먼저, 그래핀보다 Bernal 구조의 이중층 그래핀에 대하여 다루고자 한다. Bernal 구조는 기존에 2차원 전자계에서 다루던 Quadratic한 밴드를 가지고 있는 점에서 상대적으로 유사하여, 고자기장 물성에서 비슷한 결과를 나타낼 것으로 기대되었다. 흥미로운 점은, 가장 낮은 란다우 준위에는 총 8개의 중첩(degeneracy)가 존재하는데, 이는 스핀, 밸리, 그리고 오비탈 양자 수이다. 여기서, 분수 양자 홀 연구에서 오비탈 양자 수는 매우 중요하다.

분수 양자 홀은 강한 상호작용 때문에, 전자 하나에 짝수개의 자기 다발이 붙게 되는데 이를 flux attachment 라고 부르며, 생성된 준입자는 합성 페르미온 (Composite Fermion)이라고 부른다. 여기서 flux attachment는 합성 페르미온 간의 쿨롱 반발력을 screening을 하게 된다. 오비탈 양자 수에 따라 net interaction은 변화하게 되고, N = 1 오비탈에서는 flux attachment의 screening이 더 많아 지게 되어, Residual interaction이 형성되게 된다. 이 때문에 합성 페르미온 간의 짝짓기 상태가 (p−wave pairing) 허용되게 된다. 때문에 오비탈 양자수의 변화에 따라 분수 양자 홀 영역의 바닥 상태 (ground state)는 변화한다. Bernal 구조의 이중층 그래핀의 고자기장 실험에서 기존에 알려진 것과 같이 오비탈 양자수에 따른 분수 양자 홀 상태의 변화가 관측이 되었으며, 특히 재미있는 점은 Bernal 이중층 그래핀의 오비탈 양자 수가 외부 전기장의 세기에 따라 제어가 될 수 있다 [12, 15]. 사실 합성 페르미온 간의 짝짓기 상태는, 짝수 분모 분수 양자 홀 상태로 표현되는 아주 흥미로운 상태로 마요라나 준입자가 본 상태의 기본입자로 위상 양자 컴퓨터의 기본이 되는 상태이다. 이는 GaAs/AlGaAs에서 처음 발견된 이후, ZnO/MgZnO에서 발견이 되었고, 이중층 그래핀에서 다시 재발견이 된 매우 희귀한 상태이다. 나아가 이중층 그래핀에서 발견된 짝수 분모 분수 양자 홀 상태는 그 상태가 다른 시스템에 비해 매우 안정적이고 전기장 제어가 가능하여, 차세대 위상 양자컴퓨터의 발전이 매우 기대되는 상황이다.

반면, 그래핀의 분수 양자 홀 상태 연구는 첫 발견 이후 새로운 상태 혹은 알려진 짝수 분수 분모 양자 홀 상태의 발견이 매우 더디었다. 그래핀의 경우는 Dirac band를 가지고 있어, 란다우 준위의 모양이 일반적인 반도체 물질과는 다르며, 가장 낮은 란다우 준위는 spinor 파동함수로, 그 외의 준위는 scalar 함수로 표현된다. 각 란다우 준위의 상호작용 세기를 이론적으로 계산하였을 때, 보통의 짝수 분모 분수 양자 홀 상태를 가지는 N = 1 오비탈 양자수를 가진 란다우 준위의 모양이 일반적인 GaAs/AlGaAs의 가장 낮은 란다우 준위와 같아 마요라나 준입자를 가지는 상태의 발견이 기대가 되지 않았으며, 또한 초기 연구들 역시 이론대로 진행되었다. 하지만, 소자 품질을 극대화 시킨 최신 소자에서 기존에는 분수 양자

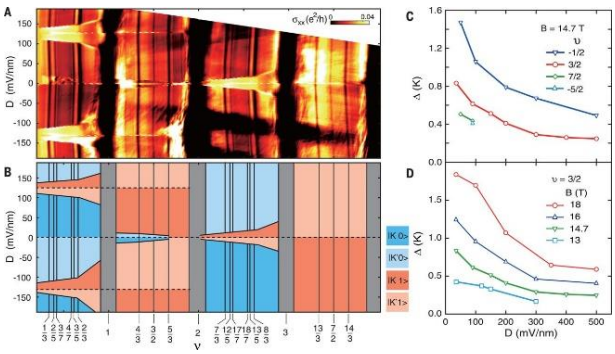

Fig. 4. Even denominator fractional quantum Hall effect in Bernal bilayer graphene [J.I.A. Li et al., Science 358, 648-652 (2017)] (a) Color plot of longitudinal conductivity as a function of displacement electric fields and filling factor. (b) Schematic of panel (a). (c) Energy gap of even denominator fractional quantum Hall states as a function of displacement electric fields. (d) The same with (c) but for B-field dependence of ν = 3/2.

홀이 존재 하지 않을 것으로 예견되던 N = 2 이상의 란다우 준위에서 분수 양자 홀 상태들이 발견이 되었고, N = 3 상태에서 parton 221 파동함수로 기술되는 짝수 분모 분수 양자 홀 상태가 약 19T에서 발견되었다 [16]. 추가적인 이론을 따라갈 때 f-wave pairing 상태로 기술 할 수 있고, 마찬가지로 마요라나 준입자로 기술이 가능하다는 이론들이 대두되는 중이다. 동일 실험에서 bubble type charge density wave 상태로 표현되는 Re-entrance 정수 양자 홀 상태 역시 발견되어 기존의 2차원 전자계와 비슷하면서 다른 새로운 발견이 되고 있는 중이다.

또한, 두 개의 그래핀 사이에 아주 얇은 hBN을 넣어서 double layer system으로 만든 소자에서는 Bose-Einstein condensation (BEC) 상태로 믿어지는 ν_{tot} = 1 양자 홀 상태가 발견되었으며, 최근 고자기장 실험에서 자기장세기를 극도로 높인 상태에서 ν_{tot} = 1의 BEC-BCS crossover가 되는 현상역시 관측되었다 [17-19]. 이는 기존의 GaAs/AlGaAs의 소자에서 불가능한 층간 상호작용 세기와 두 층의 그래핀을 상대적으로 쉽게 각각 제어가 가능한 장점 때문에 발견 되었다. 최근에는 층간 상호작용을 극대화한 구조를 각도가 큰 twisted bilayer graphene 구조 구현하였다 [20, 21]. 이는 모멘텀 공간의 K-point에서 두 개의 Dirac cone의 mismatch 때문에 극도로 가까운 거리를 가짐에도 불구하고 층간 결맞음이 깨진 새로운 type의 double layer를 이용한 구조이다. 이를 통하여 기존에 알려진 크기보다 약 수십에서 수백 배 큰 상태로 매우 안정적인 BEC를 구현 하였다. 보다 좋은 품질을 가진 소자의 고자기장 실험에서 기존에 알려지지 않은 새로운 양자 홀 상태의 발견이 기대된다.

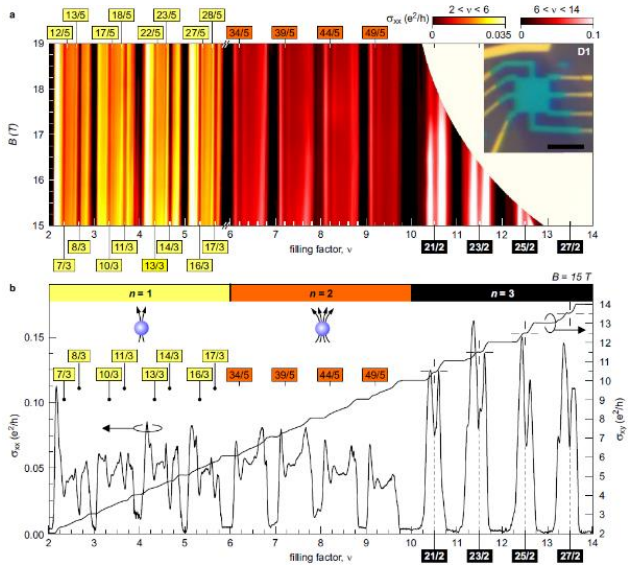

Fig. 5. Even denominator fractional quantum Hall states in graphene. [Youngwook Kim et al., Nat. Phys. 15, 154-158 (2019)] (a) Color rendition of s_{xx} in (B, n)-plane. (b) Single line trace for s_{xx} and s_{xy} at B = 15 T.

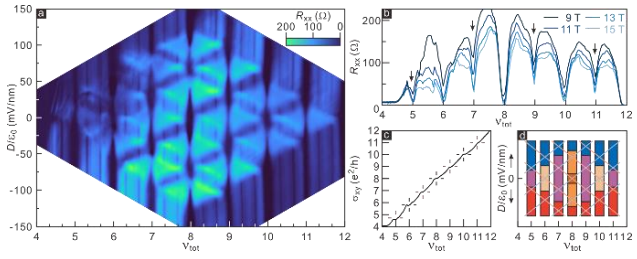

Fig. 6. Bose-Einstein condensation at large angle twisted bilayer graphene. (a) Color map of R_{xx}. (b) R_{xx} as a function of n_{tot}. (c) R_{xy} as a function of total filling factor at B = 15T. (d) Theoretically calculated quantum phases.

4. 2차원 전자계의 고자기장 물성 전망

앞서 언급한 것처럼, 소자의 품질향상에 따라 그래핀 기반의 소자에서 기존에 관측되지 못한 새로운 정수 및 분수 양자 홀 상태의 발견이 이어지고 있다. 또한, GaAs/AlGaAs의 분수 양자 홀 상태의 간섭계 (interferometer) 실험으로 Abelian Anyon이 증명된 바 있다 [22]. 현재 Harvard, UC-Santababara 그룹을 중심으로 그래핀 기반의 시스템에서 간섭계 실험이 이루어지는 중이다. 그래핀의 분수 양자 홀 상태는 상대적으로 타 시스템에 비하여 매우 안정적이고, 공정시스템이 잘 이루어져 있으므로 빠른 시기 안에 Abelian Anyon 및 non-Abealin Aynon의 증명이 그래핀 시스템에서 이루어지길 기대한다.

REFERENCES

[1] K. v. Klitzing, G. Dorda, and M. Pepper, "New Method for High-Accuracy Determination of the Fine-Structure Constant Based on Quantized Hall Resistance," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 45, pp. 494, 1980.

[2] D. C. Tsui, H. L. Stormer, and A. C. Gossard, "Two-Dimensional Magnetotransport in the Extreme Quantum Limit," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 48, pp. 1559, 1982.

[3] Cui-Zu Chang, et al., "Experimental Observation of the Quantum Anomalous Hall Effect in a Magnetic Topological Insulator," *Science*, vol. 340, pp. 167-170, 2013.

[4] C. L. Kane and E. J. Mele, "Quantum Spin Hall Effect in Graphene," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 95, pp. 226801, 2005.

[5] K. S. Novoselov, et al., "Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films," *Science*, vol. 306, pp. 666-669, 2004.

[6] Yuanbo Zhang, Yan-Wen Tan, Horst L. Stormer, and Philip Kim, "Experimental Observation of The Quantum Hall Eeffect and Berry's Phase in Graphene," *Nature*, vol. 438, pp. 201-204, 2005.

[7] Yuanbo Zhang, et al., "Landau-Level Splitting in Graphene in High Magnetic Fields," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 96, pp. 136806, 2006.

[8] K. I. Bolotin, et al., "Observation of The Fractional Quantum Hall Effect in Graphene," *Nature*, vol. 462, pp. 196-199, 2009.

[9] C. R. Dean, et al., "Boron Nitride Substrates for High-Quality Graphene Electronics," *Nat. Nano.*, vol. 5, pp. 722-726, 2010.

[10] C. R. Dean, et al., "Hofstadter's Butterfly and the Fractal Quantum Hall Effect in Moiré Superlattices," *Nature*, vol. 497, pp. 598-602, 2013.

[11] L. Wang, et al., "One-Dimensional Electrical Contact to a Two-Dimensional Material," *Science*, vol. 342, pp. 614-617, 2013.

[12] A. A. Zibrov, et al., "Tunable Interacting Composite Fermion Phases in a Half-Filled Bilayer-Graphene Landau Level," *Nature*, vol. 594, pp. 360-364, 2017.

[13] Y. Zeng, et al., "High-Quality Magnetotransport in Graphene Using the Edge-Free Corbino Geometry," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 122, pp. 137701, 2019.

[14] R. Ribeiro-Palau, et al., "High-Quality Electrostatically Defined Hall Bars in Monolayer Graphene," *Nano. Lett.*, vol. 19, pp. 2583-2587, 2019.

[15] J. I. A. Li, et al., "Even-denominator Fractional Quantum Hall States in Bilayer Graphene," *Science*, vol. 358, pp. 648-652, 2017.

[16] Youngwook Kim, et al., "Even Denominator Fractional Quantum Hall States in Higher Landau Levels of Graphene," *Nat. Phys.*, vol. 15, pp. 154-158, 2019.

[17] J. I. A. Li, et al., "Excitonic Superfluid Phase in Double Bilayer Graphene," *Nat. Phys*., vol. 13, pp. 751-755, 2017.
[18] Xiomeng Liu, et al., "Quantum Hall Drag of Exciton Condensate in Graphene," *Nat. Phys*., vol. 13, pp. 746-750, 2017.
[19] Xiomeng Liu, et al., "Crossover between Strongly Coupled and Weakly Coupled Exciton Superfluids," *Science*, vol. 375, pp. 205-209, 2022.
[20] Youngwook Kim, et al., "Odd Integer Quantum Hall States with Interlayer Coherence in Twisted Bilayer Graphene," *Nano. Lett*., vol. 21, pp. 4249-4254, 2021.
[21] Dohun Kim, et al., "Robust Interlayer-Coherent Quantum Hall States in Twisted Bilayer Graphene," *Nano. Lett*., vol. 23, pp. 163-169, 2023.
[22] J. Nakamura, et al., "Direct Observation of Anyonic Braiding Statistics," *Nat. Phys*., vol. 16, pp. 931-936, 2020.