양자소자/양자물성 측정과학기술

DOI: 10.3938/PhiT.28.044

정수용·서준호·김용성

Quantum Material Metrology based on Nanoscale Quantum Devices

Suyong JUNG, Junho SUH and Yong-Sung KIM

With bountiful novel low-dimensional quantum materials having been realized, the establishment of proper measurement protocols to investigate their exciting electronic, optical, and mechanical properties has become imperative. At the Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS), whose primary mission is to provide the foundation of science and technology through the establishment of national measurement standards and the development of imminent measurement technologies, several research activities have been carried out to develop high-precision quantum measurement platforms. In particular, we have utilized electron tunneling spectroscopy and quantum transport measurements with low-dimensional quantum devices, aiming to explore quantum-material properties with high fidelity and to expedite next-generation quantum-technology applications. Moreover, based on the framework of quantum computational theory, we have actively pursued identifying new quantum materials and quantifying their emerging material properties and quantum-device functionalities.

저자약력

정수용 박사는 서울대학교 물리학과에서 학사, 미국 U. Texas at Austin에서 물리학 박사학위를 취득하였고, 미국 표준기술연구원(NIST)에서 박사 후 연구원으로 근무했다. 현재 한국표준과학연구원 양자기술연구소 양자소자팀 팀장으로 양자소자를 이용한 측정과학기술 연구를 수행하고 있다. (syjung@kriss.re.kr)

서준호 박사는 서울대학교 물리학과에서 학사, 미국 Caltech에서 물리학 박사학위를 취득하였으며, 동 대학에서 박사 후 연구원으로 근무했다. 현재 한국표준과학연구원 양자기술연구소 양자소자팀 팀원으로 양자소자를 이용한 측정과학기술 연구를 수행하고 있다. (junho.suh@kriss.re.kr)

김용성 박사는 KAIST 물리학과에서 학사, 석사 및 박사학위를 취득하였으며, 삼성전자 반도체연구소에서 책임연구원으로 근무했다. 현재 한국표준과학연구원 양자기술연구소 양자이론팀 팀장으로 제일원리 계산 기반 양자물성 예측연구를 수행하고 있다. (yongsung.kim@kriss.re.kr)

들어가는 글

미래사회 선도를 위한 국가 측정과학기술 개발에 선도적 역할 수행을 기관 주요 임무로 하고 있는 한국표준과학연구원은 기초 물리연구, 특히 SI 단위계로 대표되는 기본 물리량 정의 및 측정 대표 연구기관으로 그 역할을 충실히 해오고 있다. 최근, 단전자, 단일 광자, 포논으로 대표되는 단일 양자 생성 및 정밀 측정을 이용한 새로운 측정표준(조셉슨 전압, 양자홀 저항, 광격자, 양자 칸델라기술 등) 기술개발과, 양자 중첩, 양자 결맞음 현상의 양자역학적 효과를 이용한 양자정보통신, 큐비트 기반 양자 컴퓨터 개발, 양자 검출기, 하이브리드 양자 소자 개발에 대한 연구를 집중적으로 진행해 오고 있다. 더불어, 그래핀을 비롯한 2차원계 박막 물질 및 양자 위상물질과 같은 신소재 양자물질의 전기적/광학적/역학적 물성 측정을 위한 실험적 연구가 진행되고 있으며, 신 양자물질에서 발견되는 새로운 과학적 현상 발견에 대한 기대와, 양자물질을 이용한 양자소자, 양자 검출기 개발과 같이 다방면으로 파생되는 양자기술 발전을 도모하고 있다. 또한 측정 결과에 대한 이론적 해석 제시와 같은 이론-실험 연구팀 간의 밀도 있는 공동연구가 활발히 진행되고 있다.

이번 특별호에서는 기존 고전 측정법 한계 극복을 목표로 반도체 공정기술을 활용하여 양자 소자를 제작하고 양자 상태 구현에 필요한 극저온 환경 제어기술을 이용하여 한국표준과학연구원 양자기술연구소에서 수행하고 있는 차세대 양자물질 단/복합 양자물성 정밀측정기술 개발 연구를 소개하고자 한다. 특히, 이차원 반데르발스 결합력에 의한 적층방향 평면터널접합 소자를 이용하여 높은 에너지 분해능을 유지하며 신호-대-잡음 비율을 획기적으로 향상, 전자 터널링 분광법의 장점을 극대화할 수 있는 양자 소자기반 측정 플랫폼 구축에 대한 내용을 제시할 것이다. 확립된 측정법을 활용하여 그래핀, 전이금속칼코게나이드(transition metal dichalcogenide, TMD)로 대표되는 이차원 양자물질의 전자구조 변형, 단원자 결합구조에 의한 에너지 구조 상태 변화, 전자-포논 상호작용에 의한 저차원 포논 모드 정밀관측 연구를 자세히 설명할 것이며, 이중 양자계 간 연결고리, 즉 양자 라우터 구현의 기본 플랫폼으로 집중받는 나노 역학계를 활용한 위상 물질(topological material) 및 마요라

나 페르미온(Majorana Fermion)의 특이 양자 물성 정밀측정연구에 대한 자세한 내용과 저차원 양자물질을 활용한 양자 소자 응용 예를 제시할 것이다.

수직방향 반데발스 결합 평면접합 터널링 소자를 이용한 양자물성 정밀측정

전자터널링 분광법(electron tunneling spectroscopy)은 양자역학적 성질인 전자터널링 현상을 이용하여 에너지 변화에 따른 전자상태밀도 변화량을 정밀하게 측정할 수 있는 계측 방법이다.^[1] 측정하고자 하는 물질과 탐침 전극 사이에 진공 혹은 부도체 물질로 구성된 터널 장벽을 구성하고, 양자 터널링 현상에 의해 발생하는 전자 터널링 신호를 전류-전압($I-V$) 및 터널링 컨덕턴스($dI/dV-V$) 변화량으로 측정하는 방법이다. 터널링 분광법을 이용하면 에너지 밴드갭 위치와 크기 측정과 같은 응집물질계 전자 구조를 에너지 준위 변화에 따라 정확히 분석할 수 있다. 주사 탐침 현미경(STM)을 이용한 주사 터널링 분광법(STS)과 초전도 에너지갭 측정에 적용된 초전도-부도체-초전도(SIS) 접합이 전자 터널링 분광법의 대표적 응용 사례이다.^[2] 하지만 물리적, 화학적 환경변화에 의한 터널링 간극 물질의 불안정성, 외부 진동과 같은 물리적 요인에 따른 터널링 신호 변화에 많은 영향을 받는 전자 터널링 분광법 특성에 따라 초고진공 환경 및 불활성 금속 표면 분석과 같이 실험 조건과 측정 매개체에 많은 제약이 있다.

그래핀, 전이금속칼코게나이드(TMD)로 대표되는 이차원계 박막 물질은 물리적 성질이 구현되는 매개체가 외부에 직접 노출되어, 전자 터널링 분광법을 이용한 전자구조 변화 측정이 용이하다는 장점이 있다. 더불어 도체, 반도체, 초전도, 강자성, 바일 위상성과 같은 다양한 물리적 특성이 이차원 양자 물질에서 발견되고 있으며, 전기장, 자기장, 온도, 압력, 전하밀도 변화와 같은 외부 물리적 변화에 따른 양자물성 변화 연구가 광범위하게 진행되고 있다. 최근에는 다양한 양자 물성을 갖는 이차원 박막 물질들을 흡사 레고 블럭을 쌓는 것처럼 수평, 수직 방향으로 결합하여, 자연계에서는 존재하지 않는 인공 구조체를 구성하여 새로운 물리적, 화학적 현상 발견에 대한 이론적, 실험적 연구가 폭발적으로 증가하고 있으며, 공학적 응용 연구도 광범위하게 진행되고 있다.^[3] 한국표준과학연구원에서는 이차원 박막 물질 및 저차원계 양자물질의 융/복합 양자물성 정밀 측정을 위한 새로운 측정 플랫폼 개발 연구가 진행되고 있으며, 본 연구진은 에너지 분해능을 획기적으로 개선하고 저차원 양자물질 전자구조 측정에 최적화된 전자 터널링 분광법 개발 연구를 수행하고 있다. 화학적, 물리적으로 안정적인 육방형 질화붕소(hexagonal boron nitride, h -BN) 박막을 절연 부도체로

Fig. 1. (a), (b) Tunneling spectra from single-layer (a) and bilayer (b) graphene- h -BN planar tunnel junction at $T = 4$ K. The V_b -dependence of the Dirac point (E_D) and the energy gap in the bilayer graphene (E_g) can be identified. (inset) Schematic and optical image of van der Waals planar tunnel junction devices. (c) Two-dimensional display of the tunnel spectra (dI/dV_b) measured at $B = 1$ T. Landau levels formed in the single-layer graphene are clearly shown.

활용, 적층방향 반데발스 결합 평면 터널접합 구조를 제작하여, 이차원 박막물질의 복합적 전자구조 물성을 다음과 같이 정밀 측정할 수 있었다.^[4] 그림 1(a) 삽도는 기본적인 평면접합 양자 터널링 소자의 모식도와 광학 이미지를 보여준다. Si/SiO₂/ h -BN 기판 위에 단일막, 이중막 그래핀을 박막 분리법(mechanical exfoliation)을 활용하여 전사하고, h -BN 터널링 부도체, 그래파이트 터널링 전극을 순차적으로 옮겨 수직방향 평면접합

REFERENCES

- [1] E. L. Wolf, *Principles of Electron Tunneling Spectroscopy* (Oxford University Press, New York, 1989).
- [2] I. Giaever, Phys. Rev. Lett. **5**, 464 (1960).
- [3] A. K. Geim and I. V. Grigorieva, Nature **499**, 419 (2013).
- [4] S. Jung *et al.*, Nano Lett. **17**, 206 (2017).

Fig. 2. (a) Schematic of single-layer graphene-*h*-BN superlattices at a twist angle θ with atomic structure configuration of BA, AB and AA with carbon, nitrogen, and boron atoms, displaying the broken valley symmetry of graphene superlattices. (b) Optical viewgraph and schematics of graphene-*h*-BN heterostructures for a planar tunnel device and an edge-contacted multi-probe device. Both devices share a graphene and a bottom *h*-BN insulator. (c-f) Two dimensional display of dI/dV_b tunneling spectra with a varying external magnetic field, revealing series of LLs originated from either the first Dirac point (d) or the second Dirac points in the hole- (e) and electron- (f) doped regions.

양자 터널링 소자를 완성하게 된다. 이차원 박막 터널링 소자 기본 모형으로 단일막과 이중막 그래핀을 활용한 터널링 소자를 구성하여 외부 자기장 및 전기장 변화에 의한 터널링 분광 신호를 정밀 측정하였다. 그림 1(a)는 외부 게이트 전극 변화(전하밀도 변화)에 따른 단일막 그래핀 전자구조 변화를 터널링 컨덕턴스(dI/dV) 변화량으로 측정한 실험 결과이다. 그림 1(b)는 이중막 그래핀의 층간 대칭 파괴에 따른 에너지갭 변화를 외부 전기장 변화 함수로 측정한 값을 표시하고 있다. 또한, 그래핀 양자홀 현상과 직접적으로 관련되어 있는 단일막 그래핀 란다우 레벨을 외부 자기장, 전기장 변화에 따라 그림 1(c)와 같이 측정할 수 있었고, 40여 개 이상의 란다우 레벨을 동시 측정할 수 있었다. 이와 같이 이차원 단결정 박막 물질을 반데르발스 결합력만을 이용하여 제작된 평면접합 터널링 소자는 물리적/화학적으로 안정적인 터널 접합면과 전자 터널링 활성 면적이 STM을 활용한 기존 터널링 분광법보다 넓어 신호-대-잡음 효과가 획기적으로 개선되어 높은 에너지 분해능으로 저차원 양자물질 전자구조 정밀측정이 가능하게 된 것이다.

차세대 전자소재 물질로 주목받는 그래핀은 전자 이동도가 우수하여 고속 전자소자 응용 가능성은 높으나, 논리 소자 구성에 필수 요건인 반도체 특성, 즉 에너지 갭이 없다는 큰 단점이 존재한다. 이러한 단일막 그래핀 한계를 극복하고자 층간 대칭

성 파괴로 에너지 갭이 생성되는 이중막 그래핀에 대한 연구가 진행되고 있으며, 밸리 대칭성이 파괴된 단일막 그래핀에서도 에너지 갭이 구현된다는 이론적, 실험적 논의들이 있어왔다.^[5] 단일막 그래핀 밸리 대칭성 파괴를 구현할 수 있는 대표적 실험 모형으로 그래핀-*h*-BN 복합구조가 제시되었는데, 이는 *h*-BN 결정 구조가 육방형으로 그래핀과 동일하지만 밸리 대칭성이 파괴된 구조이기 때문이다. 그림 2(a) 모식도와 같이 그래핀과 *h*-BN 박막을 같은 결정방향을 유지한 채 적층 방향으로 쌓으면, 그래핀 디랙점 근방에서 수 meV 크기의 에너지 갭이 생성될 수 있다는 이론적 연구가 있으며,^[6] 전자수송 실험결과를 통해 간접적으로 검증되었다.^[7-9] 또한 그래핀-*h*-BN 복합 구조에서는 그래핀과 *h*-BN 원자 구조의 미세한 크기 차이로 수십 나노미터 크기의 단위격자를 갖는 그래핀 초격자 구조가 형성

REFERENCES

- [5] S. Das Sarma, S. Adam, E. H. Hwang and E. Rossi, *Rev. Mod. Phys.* **83**, 407 (2011).
- [6] J. Jung, A. Dasilva, S. Adam and A. H. MacDonald, *Nat. Commun.* **6**, 7308 (2015).
- [7] C. R. Dean *et al.*, *Nature* **497**, 598 (2013).
- [8] L. A. Ponomarenko *et al.*, *Nature* **497**, 594 (2013).
- [9] B. Hunt *et al.*, *Science* **340**, 1427 (2013).

되어 흡스타터 나비효과(Hofstadter butterfly effect)와 같은 흥미로운 물리 현상이 구현된다는 것도 밝혀졌다.^[7-9] 그래핀-*h*-BN 초격자 구조는 밸리 대칭성이 자연적으로 파괴된 시스템으로 전자-홀 대칭성이 없는 전자 구조가 생성되며, 이차 디랙점 근방에서 존재할 것으로 예측되는 에너지 갭은 전자-홀 입자 상태에 따라 다를 것으로 예측되었다.^[6] 일반적으로 홀입자 영역(filled state) 이차 디랙점 근방에서 에너지 갭이 존재하는 것으로 알려져 있으나, 에너지 갭 크기 및 위치를 비롯한 기본적인 에너지 갭 생성에 대한 직접적인 실험적 연구가 많이 부족했다.

본 연구진은 *h*-BN 터널링 부도체를 활용한 평면접합 양자 터널링 소자를 이용해, 단일막 그래핀 밸리 대칭성 파괴에 의한 1차 디랙점 근방에서의 에너지 갭 생성 및 그래핀 초격자 구조에 의한 2차 디랙점 근방에서의 전자 구조 변화를 정밀 측정하였다.^[10] 앞서 소개한 평면접합 터널링 소자와 기본 구조는 동일하지만 그래핀 박막과 하부 *h*-BN 절연체의 결정이탈 방향각도(mis-orientation angle)를 1도 미만으로 정밀 조절하여 상대적으로 큰 단위격자(~ 14 nm)를 보유한 그래핀 초격자를 실험적으로 구현하였다. 그림 2(b) 모식도와 같이 동일한 그래핀 박막과 하부 *h*-BN 절연체로 구성된 평면접합 터널링 소자와 가장자리 접촉(edge-contact) 전자 수송 소자를 동시에 제작하여 2차 디랙점 및 그래핀 초격자 구조에 대한 기본적 물성을 측정하였으며, 평면접합 터널링 소자를 이용하여 외부 자기장 변화에 의한 란다우 레벨 양자 터널링 분광법으로 에너지 갭 크기를 정확히 측정하였다. 그림 2(c)는 1차 디랙점과 2차 디랙점을 포함하는 넓은 에너지 영역에서 그래핀 초격자 구조 에너지 구조를 외부 자기장 변화에 따라 측정한 결과이다. 그림 2(d)는 1차 디랙점 중심으로 측정된 결과를 보여주며 에너지 갭이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 에너지 갭이 없는 단일막 그래핀은 디랙점에서 란다우 레벨이 발현되지만 에너지 갭이 존재하는 단일막 그래핀에서는 에너지 갭을 중심으로 그림 2(d)와 같이 한 쌍의 란다우 레벨이 형성된다.^[11] 에너지 갭 크기는 외부 자기장 변화에 따라 변하지 않는다는 것도 그림 2(d) 측정을 통해 확인할 수 있다. 그림 2(e)와 2(f)는 각각 홀-전자 영역(filled-empty state regions) 2차 디랙점 근방에서 측정된 결과인데, 1차 디랙점 측정 결과와 동일하게 홀영역 2차 디랙점에서는 에너지 갭이 생성되지만 전자영역 2차 디랙점 근방에서는 에너지 갭이 존재하지 않는 것을 확인할 수 있다. 이번 연구는 단일막, 이중막 그래핀의 초격자 구조 생성에 의한 그래핀 박막 전자구조 변형을 직접적으로 측정한 연구로, 향후 진행될 이론 및 실험 연구에 가이드라인을 제공하고 있다. 또한 그래핀 전자구조 변형, 즉 그래핀 에너지 갭 크기가 전자-전자 상호작용에 따라 많은 영향을 받는다는 것을 확인할 수 있었다.

평면접합 양자 터널링 소자를 이용한 전자구조 정밀측정은

다른 저차원 양자 물질에도 쉽게 적용할 수 있다. 이황화 몰리브덴(MoS₂), 이황화 텅스텐(WS₂)으로 대표되는 반도체성 이차원 전이금속칼코게나이드(TMD) 물질의 전기/광학 물성에 대한 기초 및 응용 연구가 전 세계적으로 폭넓게 진행되고 있으나, 반도체 에너지 갭, 엑시톤 결합에너지 크기와 같은 기본 물리량에 대한 기초 연구는 많이 미흡한 상태이다.^[12] 또한, 반도체 TMD 물성 결정에 큰 영향을 끼치는 원자 결함상태(atomic defect states) 존재 및 결함 상태에 의한 결함 에너지 준위 분포에 대한 실험 연구가 매우 제한적이었다. 원자 결함상태에 대한 이해는 원자결함 제어 즉 반도체 도핑상태 조절을 이용한 반도체 물성 제어에 필수적이지만, 투과전자 현미경(TEM) 및 STM을 이용한 시각적 구조변화 관측이 주요한 측정 수단이었으며, 결함 구조에 의한 전자구조 변화 즉 반도체 에너지 갭 내부에 형성되는 결함 중간 갭 에너지 준위(mid-gap state)와 페르미 준위 변화에 대한 실험적 연구에 대한 보고가 없었다. 이는 전자 밀도상태가 없는 에너지 갭 내부에 형성되는 것으로 알려져 있는 중간 갭 에너지 준위를 측정하기 위해서 신호-대-잡음 비율이 높은 측정법이 필요하기 때문이다.

본 연구진은 *h*-BN, 그래핀, TMD, 그래파이트 박막을 적층 방향으로 쌓아 평면접합 양자 터널링 소자를 제작하여 이차원 TMD 박막의 양자 전기 물성을 정확히 측정할 수 있었다.^[13] 그림 3(a) 삽도는 본 실험에서 사용된 양자 터널링 소자의 광학 이미지와 모식도를 보여준다. 기존 *h*-BN 박막을 이용한 평면접합 터널링 소자와 기본적 구성은 동일하나 단일막 TMD 박막을 *h*-BN 터널링 부도체와 단일막 그래핀 사이에 위치한 것이 특징적 소자구성이다. TMD 박막 아래에 위치한 단일막 그래핀은 측정을 위한 금속 전극과 안정적이며 낮은 접합 저항을 확보할 수 있으며, TMD 에너지 갭 내부에 존재하는 칼코겐 원자(S, Se) 결함구조에 의한 중간 갭 에너지 준위 상태와 반도체성 TMD 에너지 갭 크기를 정확하게 측정할 수 있는 분석층으로 활용되었다. 광학적으로 투명하지만 외부 환경 변화에 저항력이 있는 *h*-BN 터널링 박막을 사용한 소자 구성에 따라 그림 3(a)와 같이 광 휘도(photo-luminescence, PL) 및 반사율 변화 측정이 가능하였다. 광학 분광법을 활용해 단일막 TMD 물질의 광학 에너지 갭 크기(A 엑시톤 크기) 및 A-B 엑시톤 간극, 스핀-궤도(spin-orbit) 결합 효과에 의해 분리되는 원자가 전자 띠(valence band) 차이값을 정확히 측정하였고, 전자 터널링 분광법과 광학 분광법을 동일한 소자에 적용하여 TMD 물질의 전자

REFERENCES

- [10] H. Kim *et al.*, Nano Lett. **18**, 7732 (2018).
- [11] G. M. Rutter *et al.*, Nat. Phys. **7**, 649 (2011).
- [12] S. Manzeli *et al.*, Nat. Rev. Mater. **2**, 17033 (2017).
- [13] T. Y. Jeong *et al.*, Nat. Commun. **10**, 3825 (2019).

Fig. 3. (a) Collection of PL spectra from the SC-mTMD planar devices at $T = 300$ K (dotted lines) and $T = 80$ K (solid lines), used to identify the optical energy gaps of the semiconducting films. (inset) Schematic and optical viewgraph of the mTMD-based vdW planar heterostructure for electron tunneling and optical spectroscopy measurements. (b) DFT-calculated locations and density of states of charge neutral a_1 and e defect states from single chalcogen-atom vacancies in the four SC-mTMD films with a consideration of the spin-orbit-coupling effect. Experimentally identified a_1 and e defect states are, respectively, overlaid with brown and orange shadows.

구조, 즉 에너지 갭 크기, 원자 결함에 의한 중간 갭 에너지 준위 위치를 확인하였다. 또한 제일원리 계산법으로 예측한 원자 결함 에너지 준위와 직접 비교(그림 3(b)), 원자 결함상태의 기원과 결함 상태가 반도체성 TMD 물질의 전자 구조에 미치는 영향을 확인할 수 있었다. 반도체성 TMD 물질의 에너지 갭은 전자-전자 상호 작용 효과에 따라 크기가 결정되는 것을 실험적으로 검증하였고, TMD 물질의 원자 결함은 황화성 TMD(MoS₂,

Fig. 4. (a-c) Inelastic tunnel spectra from the graphene-*h*BN planar tunnel device. Differential conductance ($G = dI/dV_b$) is measured with an AC-excitation voltage, $V_{rms} = 1$ mV at $f = 433.3$ Hz. Tunnel spectra in Fig. 4(a) and 4(b) are measured simultaneously. Conductance derivative (dG/dV_b) curve is numerically obtained from the spectra in Fig. 4(b). (inset) Schematic of the tunnel devices utilizing thin *h*-BN as a tunnel insulator.

WS₂) 박막이 셀레늄 기반 TMD(MoSe₂, WSe₂) 박막보다 비교적 손쉽게 형성되는 것으로 확인되었다.

평면접합 양자 터널링 소자에서 구현할 수 있는 높은 신호-대-잡음 비율을 이용하면 비탄성 전자 터널링 분광법(IETS)을 활용한 이차원 박막 물질의 역학적 격자 진동현상, 즉 포논 모드와 전자-포논 산란현상 정밀 측정도 가능하다.^[14] 비탄성 전자 터널링 분광법은 전통적으로 응집물질 표면에 흡착된 분자의 역학적 진동 및 준입자 여기 상태를 측정하기 위해 활용되어 왔던 측정법이다. 이차 터널링 효과(second-order tunneling effect)에 의한 터널링 컨덕턴스 변화량을 미세하게 관측할 수 있는 것이 중요한 실험적 조건인데, 터널링 간극 불안정성에 의한 잡음효과 감소가 중요해서 신호-대-잡음 비율을 획기

REFERENCES

- [14] S. Jung *et al.* Sci. Rep. 5, 16642 (2015).

적으로 개선할 수 있는 평면접합 양자 터널링 소자는 비탄성 터널링 분광법을 적용할 수 있는 최적의 모형 시스템임이 확인되었다. 그림 4는 그래핀- h -BN 평면접합 양자 터널링 소자에서 관측한 비탄성 터널링 분광 측정결과이다. 그림 4(b)에서 관측된 미세한 터널링 컨덕턴스 변화량은 그림 4(c)와 같이 이차 전류미분($dG/dV = d^2I/dV^2$)의 정점(peak)과 저점(valley) 신호로 확인할 수 있다. 개별 분광 신호 위치는 그래핀, h -BN과 그래핀- h -BN 접합면에서 여기되는 물리적 진동, 즉 포논 모드와 대응된다. 비탄성 터널링 분광법을 활용해 관측된 포논 신호는 라만 및 적외선 분광법을 활용해 관측할 수 있는 포논 모드와 광학 선택규칙(optical selection rule)에 의해 관측이 제한적인 포논들도 검출이 가능하다는 장점이 있다. 또한, 비탄성 터널링 분광 신호는 양자 터널링에 의해 전송되는 전자가 전자-포논 상호작용에 따라 변하는 신호를 관측하는 계측법으로, 실제 동작하는 전자소자에서 발생하는 전자-포논 산란효과 및 기본 물리현상 연구에 적합한 측정법이다.

나노역학계 양자소자를 이용한 양자물성 정밀 측정

고체 소자의 역학적 진동을 신호처리 및 검출 등에 활용하는 마이크로-나노역학소자(micro-nano mechanical device) 연구는 양자 기술의 발전과 더불어 진동 모드의 양자 한계에서 작동하는 소자 연구로 발전, 양자전기역학시스템(quantum electromechanical system)^[15] 및 광역학 시스템(optomechanical system)^[16]으로 일컬어지는 양자소자 연구로 자리매김하고 있다. 본 연구진은 역학적 양자소자를 활용한 연구 방향에서 광역학계 시스템에서의 양자 조임상태(quantum squeezed state) 생성,^[17,18] 아주 강한 광역학적 상호작용 연구,^[19] 손실(dissipation) 기반 비고전적 역학소자 상태 생성 이론 연구^[20] 등을 수행해 왔다. 특히 역학적 양자 소자가 보유한 저손실 진동 모드와 전자계 및 광자계와의 상호작용은 신 물질 전자계 연구에 활용될 수 있다. 구체적인 일례로 위상 절연체 나노선으로 제작된 나노역학계는 위상물질 표면 전자계의 상태에 관한 정보를 기계적 진동의 변화로 보여준다(그림 5).^[21] 아로노프-봄(Aharonov-Bohm, AB) 전도도 진동 등 위상 절연체 나노선의 갭 없는(gapless) 표면 전자 상태 양자간섭 현상은 전자 수송에서의 1차원 모드 개수 변화와 관련이 있어, 나노선 전자 상태 밀도(density of states)의 AB 진동 현상이 발현될 것으로 예측된다. 본 연구진은 Bi_2Se_3 나노선으로 전기역학 공진기를 구성하여(그림 5(a)) 나노선 양자축전용량(quantum capacitance) 변화가 역학적 공진기에 미치는 영향을 정밀 측정하였다. 이때 양자축전용량은 상태 밀도, 즉 전자 수송에 기여하는 모드 개수에 비례하며 역학적 공진 주파수는 결과적으로 AB 진동 현상을 나타

Fig. 5. (a) Scanning electron microscope (SEM) image of the Bi_2Se_3 nanowire mechanical resonator. Electrical conductance is measured by comparing drain current and source-drain voltage. DC and radio-frequency (RF) voltages are applied to the gate electrode, with RF voltage at the drain electrode amplified and recorded (V_{OUT}) to actuate and detect mechanical resonance. A magnetic field (B) is applied parallel to the nanowire axis to investigate AB oscillation due to TI surface states. (b) Model calculations of mechanical resonant frequency shift plotted as a function of chemical potential μ and magnetic flux Φ showing a change in oscillation pattern.

내게 된다. 전기 전도도와 나노선 공진 주파수 동시 측정 실험에서 AB 진동 현상을 관찰하였고 불순물에 의한 산란 효과를 고려한 갭 없는 디랙 페르미온 모형으로 이해할 수 있었다. 본 결과는 나노역학계가 보유한 극미량의 유효축전용량(equivalent capacitance) 특성을 양자물질 연구에 독창적으로 적용한 것으로서, 제시된 나노역학 공진 측정 기법은 여러 저차원 양자물질에도 확대 적용이 가능할 것으로 예상된다.

양자소자를 활용한 차세대 전자/광학 소자 응용

저차원 양자물질 전자구조 정밀측정에 대한 기초연구와 더불어 본 연구진은 양자소자를 활용한 차세대 전자-광학 소자 및 양자센서 개발 연구를 진행하고 있다. 이차원 반도체 박막물질을 이용해 적층방향 이차원 복합 구조를 구성하고 수직방향 전자수송 현상에 대한 기본 연구를 수행하였다. 양자 터널링 현상에 의한 전자 수송 효과를 극대화할 수 있는 금속-반도체-금속 접합의 수직형 다이오드를 제작하고 전자수송 현상을 정밀 분석하였다.^[22] 일반적으로 이차원 박막물질을 이용한 다이

REFERENCES

- [15] K. C. Schwab and M. L. Roukes, *Physics Today* **58**, 7, 36 (2005).
- [16] M. Aspelmeyer, P. Meystre and K. C. Schwab, *Physics Today* **65**, 7, 29 (2012).
- [17] E. E. Wollman *et al.*, *Science* **349**, 952 (2015).
- [18] C. U. Lei *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **117**, 100801 (2016).
- [19] P. D. Nation, J. Suh and M. P. Blencowe, *Phys. Rev. A* **93**, 022510 (2016).
- [20] J. H. Lee, J. Suh and H. Seok, *Phys. Rev. A* **98**, 043821 (2018).
- [21] M. Kim *et al.*, *Nat. Commun.* **10**, 4522 (2019).
- [22] G. Nazir *et al.*, *Nat. Commun.* **9**, 5371 (2018).

Fig. 6. (a-b) Schematic of vertical WSe₂ diodes fabricated on a SiN membrane with a through-hole of 3 μm in diameter. True vertical p-i-n heterojunctions in homogeneous 2D vdW materials are formed through the deposition of Gd and Pt films on each facet of WSe₂ flakes. (c) High-resolution TEM images displaying the layered structure of WSe₂ crystals. (d) J vs. V_{SD} curves from the device with a 16L WSe₂ flake, revealing a high current density of $J > 2 \times 10^5$ A/cm² and a rectification ratio of $RR \approx 100$ at $T = 300$ K. (inset) $\log(I)$ vs. V_{SD} in the forward-biased direction at $T = 300$ K. (e, f) I vs. V_{SD} characteristic curves and RR vs. V_{SD} from the vertical WSe₂ heterojunctions with varying WSe₂ thickness from a monolayer to a thick (≈ 47 nm) film.

오드는 p형과 n형 반도체 물질의 결합으로 구성되는데 외부 환경 변화에 직접 노출되는 이차원 양자 물질의 특성상 이중 물질 접합은 다이오드 성능을 저해하는 치명적인 요인으로 작용할 수 있다. 금속-반도체 접합면의 불안정성으로 다이오드 성능이 크게 저하되는 문제점도 발생하게 된다.^[23] 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구진은 이셀레늄화 텅스텐(WSe₂)을 이용하여 수직방향 다이오드를 제작하였고, 금속-반도체 접합면과 이중 반도체 물질 접합면에서 발생하는 접촉저항이 크게 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이차원 박막 양자물질을 활용한 수직형 전자 소자 구성이 쉽도록 실리콘 나이트라이드 관통구멍을 활용하였으며, 일 함수(work function) 차이를 극대화하기 위해 플래티늄(Pt)과 가돌리늄(Gd) 전극을 개별 증착, 고성능 이차원 박막 기반 수직형 다이오드를 구현하였다. 그림 6(a)는 소자 모식도를 그림 6(b)는 금속-WSe₂ 박막 접합면을 정밀 분석한 TEM 이미지를 보여준다. 그림 6(c) 결과에서 확인할 수 있듯이 구현된 수직형 다이오드는 특히 단일 면적당 전하수송 능력을 의미하는 전류밀도가 다른 이차원 박막물질을 이용한 전자소자보다 월등히 향상되었다. WSe₂ 박막 두께를 단일막 수준으로 제어하며 수직방향 전자 수송 현상을 정밀

분석하였다.(그림 6(d), 6(e)) 측정 결과를 통해 수직 다이오드는 양자 터널링 현상이 주된 전하수송 기작이라는 것을 밝힐 수 있었으며, 본 연구에서 구현된 다이오드는 고주파 스위치와 같은 초고속 양자소자 응용 분야로 확대 적용이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다.

나가는 글

한국표준과학연구원 양자기술연구소에서는 다양한 양자상태 구현을 위한 양자소자를 제작하고, 양자물리 및 양자물성에 대한 연구를 진행하고 있다. 이러한 연구는 양자이론, SPM 기반 양자물성 연구, 양자정보 분야 연구와 긴밀한 협력 연구를 통해 진행되고 있으며, 이는 한국표준과학연구원의 임무 중 하나인 미래 측정과학기술개발과 미래 양자정보기술에 활용될 것이다. 이러한 기초 연구 기반은 국가과학기술의 뼈대가 될 것이며, 당면한 여러 공공의 문제 해결에 핵심적인 역할을 하게 될 것이다.

REFERENCES

- [23] A. Allain *et al.*, Nat. Mater. **14**, 1195 (2015).