나노 적외선 분광학과 2차원 물질의 연구

DOI: 10.3938/PhiT.29.023

김 지 호

Nano Infrared Spectroscopy and Imaging Techniques for Two-dimensional Materials Research

Jiho KIM

Infrared spectroscopy is a very useful method for the study of materials. Recently, nanometer-scale spectrometric technology has been developed beyond the diffraction limit of infrared light and has been used in various fields. In particular, it is useful for research on two-dimensional materials and has been applied to studies of the concentration of local charges or polaritons. In this article, the basic concepts of nano infrared spectrometric techniques and the results of several recent studies are introduced.

들어가는 말

단일 탄소 원자층인 그래핀이 흑연에서 성공적으로 분리되고,^[1] 그에 대한 업적으로 2010년 노벨 물리학상을 수상한 이래로 그래핀 및 2차원 물질에 대한 연구가 지속적으로 활발하게 이루어지고 있다. 초기에는 그래핀의 우수한 전기적 특성을 전자소자에 사용하기 위하여 그래핀의 밴드갭을 열고자 하였던 연구들이 활발하게 수행되었고, 이후 밴드갭을 갖고 있는 다양한 전이금속칼코겐화합물(transition metal dichalcogenides, TMDs),^[2] 흑린(black phosphorus),^[3] 그리고 표면에서만 독특한 전자구조를 띠는 위상절연체에 대한 연구들이 뒤따랐다.^[4] 또한 이중의 2차원 물질을 적층한 헤테로구조(hetero structure)로 연구 주제가 확장되었으며, 최근에는 약 1도로 뒤틀려 적층된 2층 그래핀(twisted bilayer graphene)에서 초전도현상이 관측되어^[5] 뒤틀린 각도의 다중층 그래핀의 다양한 연구가

수행되며 기초 연구계의 2차원 물질에 대한 관심이 지속되고 있다.

적외선 분광학 역시 2차원 물질 연구에 적용되어 2차원 물질의 밴드갭, 도핑 농도 등의 연구에 활용되었으나 다른 연구 기법과 비교하면 그 쓰임새가 제한적인 편이었다. 적외선은 파장의 길이가 마이크로미터(micrometer, μm) 단위이기 때문에 정밀한 현미경에 접목시키더라도 미세한 박리 시편 측정에 충분한 공간 분해능을 달성하기가 쉽지 않기 때문이다. 특히, 전자의 요동을 관찰할 수 있는 원적외선의 경우 한 파장의 길이가 수백 마이크로미터이므로 시편의 국소적인 정보를 획득하기에 부적합하였고, 기존 발표된 적외선 분광학 연구들도 대면적 시편의 평균적인 광학특성을 측정하는 내용이 주를 이루었다.^[6,7]

그러나 적외선 분광학은 가시광선보다 낮은 에너지 영역(약 0.001 ~ 2 eV)에서 일어나는 다양한 현상을 관찰할 수 있는 유용한 분석법이기 때문에, 빛의 회절 한계를 뛰어 넘어 더 높은 공간 분해능을 갖는 적외선 분광법에 대한 연구가 수십 년간 꾸준히 수행되었다. 이러한 노력 끝에 몇 가지 나노미터(nanometer, nm) 수준의 공간 분해능을 달성한 분광 기법이 보고되었다. 이들은 대부분 탐침형 원자 현미경(Atomic force microscope, AFM)과 결합된 형태로, 표면이 평평하고 두께가 얇은 2차원 물질의 연구에 매우 적합하다는 장점을 지니고 있다.

이 글에서는 최근 점점 활용 분야를 넓혀가고 있는 산란형 나노 적외선 분광 기법에 대해 소개하고, 이 분광법을 이용하

REFERENCES

- [1] 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).
- [2] S. Manzeli, D. Ovchinnikov, D. Pasquier, O. V. Yazyev and A. Kis, *Nature Reviews Materials* **2**, 1 (2017).
- [3] L. Li, Y. Yu, G. J. Ye, Q. Ge, X. Ou, H. Wu, D. Feng, X. H. Chen and Y. Zhang, *Nature Nanotechnology* **9**, 372 (2014).
- [4] M. Z. Hasan and C. L. Kane, *Reviews of Modern Physics* **82**, 3045 (2010).
- [5] Y. Cao, V. Fatemi, S. Fang, K. Watanabe, T. Taniguchi, E. Kaxiras and P. Jarillo-Herrero, *Nature* **556**, 43 (2018).
- [6] K. Yu, J. Kim, J. Y. Kim, W. Lee, J. Y. Hwang, E. H. Hwang and E. J. Choi, *Physical Review B* **97**, 235404 (2016).
- [7] J. Kim, J. Jeon, B. Lee, K. Yu, M. A. Kuroda and E. J. Choi, *Physical Review Applied* **13**, 014066 (2020).

저자약력

김지호 박사는 서울시립대학교에서 물리학 학사학위를 취득한 후, 동 대학에서 CVD 그래핀 증착 및 적외선 분광학을 전공하여 박사학위를 취득하였다. 2019년부터 포항공대연구소의 12D 적외선 분광 빔라인에서 박사후 연구원으로 연구하고 있으며, 나노 적외선 분광학을 이용한 2차원 물질의 연구를 수행하고 있다. 2019년 가을 물리학회에서 장려상을 수상하였다. (jihokim@postech.ac.kr)

여 2차원 물질의 특성을 살펴본 몇 가지 연구 성과들을 간략히 설명하고자 한다.

나노 분광법의 종류

나노 수준의 분광법은 대부분 AFM과 결합하여 근거리장 (near-field) 전자기파를 이용하는 형태를 띠고 있지만, 세부적인 차이에 따라 몇 가지 방식으로 구분된다.

단, 여러 기법들의 기계적인 구조가 대체로 비슷하고 비교적 최근에 개발되어 개발 주체마다 서로 다른 명칭을 사용하였기에, 먼저 사용된 용어가 나머지를 대표하는 용어로 받아들여지기도 하는 등 명칭의 대상이 불분명하거나 혼용되는 경우가 종종 있는 편이다. 이 글에서 쓰는 명칭은 필자가 주관적으로 판단하기에 최근 많이 사용되는 용어를 선택한 것으로, 다른 연구자들이 사용하는 단어와는 그 의미가 다소 다를 수 있음을 미리 밝혀둔다.

근거리장 주사 광학 현미경(near-field scanning optical microscope, NSOM), 혹은 주사 근거리장 광학 현미경(scanning near-field optical microscope, SNOM)이라고 불리는 방식은, 탐침(tip)의 끝에 사용할 빛의 파장보다 작은 구멍을 내고 이를 조리개로 사용하여 분광 정보를 획득하는 방식이다(그림 1(a)). 나노 분광 기법 중 가장 오래 연구되어 비교적 널리 알려져 있는 기법이다. 후술할 방식과 비교하여 조리개 방식(aperture type, a-SNOM)이라고 불리기도 한다. 일반적으로, Waveguide cut-off effect의 한계로 인해 파장의 1/10 정도까지 적용 가능한 방법이므로 나노미터 수준의 공간 분해능을 갖추기 위해 파장이 짧은 가시광선 광원이 주로 사용된다.

조리개가 없는 방식(apertureless type)은 피뢰침의 원리를 이용하여, 구멍이 없는 금속 코팅된 탐침에 빛을 쏘이고 분광 신호를 획득하는 방법이다. 조리개 방식과 비교하여 신호 수집과 처리에 어려움이 있어 이를 극복하는데 많은 노력이 필요하였으나, 최근 그 성과가 나타나고 있다. 다수의 나노 적외선 분광 기법이 이 방식을 채택하고 있다.

조리개 없는 방식은 신호를 해석하고 획득하는 과정을 기준으로 다시 종류를 나눌 수 있다. 탐침 끝에 모인 빛에 의한 시편과 탐침 사이의 힘 변화(photo-induced type)나 열적 팽창(thermal type) 등이 탐침에 주는 영향을 조사하여 분광 정보를 얻는 방식이 있고(그림 1(b)), 시편 물질과 상호작용한 뒤 산란되어 나오는 빛을 포집하여 분광 정보를 획득하는 방식(scattering type)이 있다(그림 1(c)). 이처럼 다양한 나노 분광 기법들은 그들 중 무엇이 다른 것들의 우위에 있다기보다는 서로 다른 장단점에 따라 적용 분야가 나뉘는 보완적 관계라고 할 수 있다.

Fig. 1. Schematic diagram for the classification of nanometer-scale spectroscopy. (a) Aperture type, (b) photo-induced & thermal type, and (c) scattering type.

이 글에서 소개할 나노 분광 기법은 산란 방식으로, 2차원 이미지 획득을 목적으로 하는 경우 산란형 주사 근거리장 광학 현미경(scattering type scanning near-field optical microscope, s-SNOM), 주사 근거리장 적외선 현미경(scanning near-field infrared microscope, SNIM), 나노 적외선 이미징(nano infrared imaging) 등으로 불리고, 스펙트럼을 획득하는 경우에는 나노 푸리에 변환 적외선 분광학(nano Fourier transform infrared spectroscopy, nano-FTIR), 나노 적외선 분광학(nano infrared spectroscopy) 등으로 불리고 있다. 이 글에서는 설명의 편의를 위하여, 산란 방식의 나노 분광 기법을 간략히 나노 IR이라 부르고, 구체적으로 이미징이나 분광법을 가리킬 때는 각각 s-SNOM과 nano-FTIR로 호칭하도록 하겠다.

나노 IR의 원리

뾰족한 금속의 끝에 빛을 쏘이면 금속 표면에 여기된 플라즈몬 폴라리톤이 빛과 결합하여 그 정점에 전하 축적을 유발함으로써, 매우 높은 국소장이 발생하고 빛이 집속되는 '피뢰침 효과'가 나타난다. 이 국소장의 공간적인 크기는 금속 끝의 뾰족한 정도와 비례하는데, AFM 탐침과 같이 매우 뾰족한 물체가 금속으로 코팅되어 있다면 그림 2(a)와 같이 10 nm 수준으로 작아지게 된다.^[8] 이 국소장에 모인 근거리장을 이용하여 시료를 조사하는 것이 나노 IR의 핵심 원리이다.

이 원리를 효과적으로 사용하기 위하여, 산란형 나노 IR은 그림 2(b)과 같이 AFM과 광학계를 접목시켜 설계되었다.^[9] 탐침 앞에 위치한 포물면 거울은 적외선을 탐침 끝으로 집속시켜 근거리장을 발생시키는 역할과 근거리장에서 산란되어 나오는 신호를 포집하는 역할을 모두 수행한다. 이때 근거리장의

REFERENCES

- [8] A. J. Huber, F. Keilmann, J. Wittborn, J. Aizpurua and R. Hillenbrand, Nano Letters **8**, 3766 (2008).
- [9] F. Huth, M. Schnell, J. Wittborn, N. Ocelic and R. Hillenbrand, Nature Materials **10**, 352 (2011).

Fig. 2. (a) Calculated field enhancement of metal-coated AFM tip. (b) Conceptual illustration of s-SNOM setup with infrared light source. Reused from Ref. [8] with permission from American Chemical Society (ACS). (c) Finite dipole model.

신호보다 주변 부위에서 산란되는 원거리장(far-field) 배경(background) 신호가 더욱 강하게 포집되므로, 배경 신호를 효과적으로 제거하는 것이 매우 중요하다.

순수한 근거리장 신호를 얻기 위해 두 가지 기법이 함께 사용된다. 먼저 higher harmonics demodulation으로, AFM의 tapping 모드를 응용하는 방법이다. Tapping amplitude를 빛의 파장보다 짧게 설정하면, 탐침과 시편 사이의 거리에 따른 신호의 크기가 근거리장은 비선형적인 변화를 보이고 원거리장 배경 신호는 선형적인 변화를 보이게 된다. 이 관계를 이용하면 tapping의 n 차 harmonics가 증가함에 따라 받아들이는 배경 신호를 줄일 수 있다.^[10] 추가적으로, Pseudo-heterodyne interferometric detection이 사용된다. 이 방법은 그림 2(b)에 나타난 것과 같이 마이켈슨 간섭계를 응용한 방법으로 빔가르개(bean splitter)와 움직이는 거울을 사용하여 빛에 변조를 가한다. 거울은 거리에 대해 사인함수로 진동하고, 그 주기는 AFM의 tapping 주기보다 짧게 설정되어 tapping과 겹치지 않는 추가적인 harmonics를 만들어낸다. 이를 이용하여 배경 신호가 완전히 제거된 근거리장 신호를 획득하게 된다.^[11] 이때 광원으로 선형 편광된 빛을 사용하기 때문에, amplitude와 phase 정보를 모두 획득할 수 있다.

획득한 근거리장 신호는 빛-탐침-시편 세 가지 물질 사이의 상호작용을 내포하고 있어 이 작용들을 분석하기 위해 이론적

Fig. 3. (a) Conventional AFM topography of step-structure sample. Corresponding s-SNOM (b) amplitude and (c) phase images. 1140 cm^{-1} laser was used. Data from 12D IRS Beamline, Pohang Accelerator Laboratory.

인 모델을 적용한다. 다양한 모델이 있으나, 이 글에서는 finite dipole model을 소개한다. Finite dipole model의 기본적인 개념은 그림 2(c)와 같다. 입사하는 빛이 탐침에 Q_0 와 $-Q_0$ 전하를 가지는 쌍극자를 만들어낸다. 이들 중, 아래쪽의 Q_0 만이 시편과의 상호작용에 관여하게 되므로, 탐침이 접근할 때 시편에 Q'_0 이미지 전하가 생성된다($Q'_0 = -bQ_0$, b : surface response function). 이 이미지 전하는 다시 탐침에 영향을 주어 점전하 Q_i 를 유도하고, Q_i 는 또다시 시편에 이미지 점전하 Q'_i 를 만들어낸다($Q'_i = -bQ_i$). 이때 Q_0 전하는 입사하는 빛과 타원의 모양에 의존하지만, Q_i 전하는 시편의 유전 특성을 따른다. 따라서 Q_i/Q_0 를 구하면 상대적인 시편의 특성을 살펴볼 수 있어, 이를 통해 탐침 아래 나노미터 수준의 범위에서 일어나는 현상을 분석할 수 있다.^[12]

이러한 특성으로 인해, 나노 IR을 이용하면 광학적 성질로 시편을 분석할 수 있다. 그림 3은 규소(silicon)와 이산화규소(silicon dioxide)로 이루어진 기준 시료를 측정된 결과이다. 기준 시료는 1.4 nm 단차가 나는 두 가지 높이의 규소층과 20 nm의 높이를 지니는 이산화규소층이 정사각형 격자구조로 이루어져 있다. 전통적인 Topography 측정은 높이만을 측정하므로 그림 3(a)와 같이 세 층으로 나타나지만, 그림 3(b), (c)에 나타난 s-SNOM 결과는 amplitude와 phase 정보 모두에서 물질의 특성만을 구분하여 규소와 이산화규소의 두 층으로만 나타남을 볼 수 있다.

나노 IR의 두 가지 세부 기법, 이미징 기법(s-SNOM)과 분광 기법(nano-FTIR)은 그 구조가 거의 비슷하다. s-SNOM은 광원으로 단파장 레이저를 사용하여 넓은 영역의 주사 이미지를

REFERENCES

- [10] B. Knoll and F. Keilmann, Optics Communications **182**, 321 (2000).
- [11] N. Ocelic, A. Huber and R. Hillenbrand, Applied Physics Letters **89**, 101124 (2006).
- [12] A. Cvitkovic, N. Ocelic and R. Hellenbrand, Optics Express **15**, 8550 (2007).

Fig. 4. (a-b) Topographic and corresponding (c-d) s-SNOM amplitude images of CVD grown Bi_2Se_3 seeds. Reused from Ref. [13] with permission from John Wiley and Sons.

얻고, nano-FTIR은 광역대의 광원을 사용하여 한 지점의 스펙트럼을 얻게 된다. 이외에도 세부적인 장비 셋업이나 신호 처리에 차이가 있으나, 이 글에서는 생략한다. 두 가지 방법은 상호 보완적으로, 예를 들어 s-SNOM으로 넓은 영역의 상대적인 분광 이미지를 얻은 뒤 흥미로운 부분의 상세 스펙트럼을 nano-FTIR로 획득하여 심도 있는 분광 분석을 수행할 수 있다.

연구 동향

산란형 나노 IR은 빛을 직접 탐지하여 분석하기 때문에 분광 신뢰도가 높다. 그러나 시편의 표면 형태나 거칠기에 따라 산란되는 정도가 크게 변하기 때문에 표면이 평평하지 않은 경우 해석에 어려움이 따른다. 2차원 물질은 표면이 깨끗하고 평평하면서 조건에 따라 내부의 전하 농도나 전자 구조 등에 차이가 나타나기 때문에, 산란형 나노 IR을 사용하기에 적합하다. 이에 최근 산란형 나노 IR을 이용한 2차원 물질의 연구 결과가 활발히 진행되고 있어, 몇 가지 연구 결과를 소개한다.

먼저, 물질의 전기 전도도 혹은 드루드 반응(Drude response)과 관련된 연구들을 살펴보고자 한다.

그림 4는 화학 기상 증착법(chemical vapor deposition, CVD)으로 제작한 Bi_2Se_3 시편의 AFM topography와 s-SNOM 측정 결과이다.^[13] AFM topography를 살펴보았을 때는 시료가 매우 균일하게 성장된 것으로 보이지만, s-SNOM 측정 결과 내부가 균일하지 않고 시편의 모양에 따라 독특한 무늬가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 적외선으로 시편의 드루드 반응 공

Fig. 5. (a) Schematic representation of AB-BA domain wall of bilayer graphene. Adapted from Ref. [14]. (b) s-SNOM amplitude image of bilayer graphene. White arrows indicate AB-BA domain walls. 970 cm^{-1} laser was used. Data from 12D IRS Beamline, Pohang Accelerator Laboratory.

간 분포를 시각화한 것으로, 시편 성장과정에서 불순물에 의해 발생한 국소적인 전하 농도(carrier concentration)의 차이를 보여주고 있다. 드루드 모델(Drude model)은 물질 내부의 전자를 자유전자로 가정하고 간단한 원자핵에 산란되며 이동한다고 단순화하는 모델이다. 주로 적외선 분광학을 이용해 살펴볼 수 있는데, 전하가 많을수록, 또는 전자가 산란되는 정도가 작을수록 드루드 반응이 높아진다. 이러한 정보는 전기 전도도와도 밀접한 관련이 있어 드루드 전도도(Drude conductivity)라고 불리기도 한다.

그림 5는 2층 그래핀(bilayer graphene) 내부에 존재하는 AB-BA 도메인(domain) 사이의 도메인 장벽(domain wall)의 이론적인 모델과^[14] s-SNOM으로 측정으로 나타난 AB-BA 도메인 장벽이다. 2층 그래핀에서, 경우에 따라 AB 적층된 도메인과 BA 적층된 도메인 사이에 선형의 어긋난 구조가 나타나게 되는데 이곳에서는 구조적 특이성으로 인해 topological valley transport가 나타나는 것으로 예상되었다. 그러나 이를 찾아 해당 구조만으로 소자로 제작하는 것은 매우 어려운 일이다. 이 구조의 폭이 매우 얇고 주변 부위와 두께 차이가 없어 광학 현미경이나 SEM, AFM topography에서는 이를 구분할 수 없기 때문이다. 다행히, s-SNOM을 이용하면 구분이 가능한 것으로 나타났다.^[15] 전술한 바와 같이, 적외선 분광학을 통해 살펴볼 수 있는 드루드 반응은 전기 전도도와 밀접한 연

REFERENCES

- [13] X. Lu, O. Khatib, X. Du, J. Duan, W. Wei, X. Liu, H. A. Bechtel, F. D'Apuzzo, M. Yan, A. Buyanin, Q. Fu, J. Chen, M. Salmeron, J. Zeng, M. B. Raschke, P. Jiang and X. Bao, *Advanced Electronic Materials* **4**, 1700377 (2018).
- [14] A. Vaezi, Y. Liang, D. H. Ngai, L. Yang and E.-A. Kim, *Physical Review X* **3**, 021018 (2013).
- [15] L. Ju, Z. Shi, N. Nair, Y. Lv, C. Jin, J. Velasco Jr., C. Ojeda-Aristizabal, H. A. Bechtel, M. C. Martin, A. Zettl, J. Analytis and F. Wang, *Nature* **520**, 650 (2015).

Fig. 6. (a) Schematic illustration of AB-BA domains of small angle twisted bilayer graphene (tBLG). (b) s-SNOM image (left) and dark-field TEM image (right) of tBLG. Reused from Ref. [16] with permission from The American Association for the Advancement of Science (AAAS). (c) Schematic diagram of ABAB-ABCA domains of twisted double bilayer graphene (tDBG). (d) s-SNOM image of tDBG. Adapted from Ref. [17].

관이 있다. 앞서 소개한 Bi_2Se_3 시료의 경우 전하 농도에 따른 드루드 반응의 차이를 시각화하였다면, AB-BA 도메인 장벽에서는 valley transport가 높은 전기 전도도를 이끌어내고 그 차이가 드루드 반응으로 나타난 것으로 여겨진다.

최근 많은 관심을 받고 있는 뒤틀린 각도의 다중층 그래핀 역시 나노 IR이 활용될 가능성이 높다. 그림 6은 소각으로 뒤틀린 2층 그래핀(twisted bilayer graphene, tBLG)과,^[16] 뒤틀린 이중-2층 그래핀(twisted double bilayer graphene, tDBG)에서 s-SNOM을 측정된 결과이다.^[17] tBLG의 뒤틀린 각도가 작은 경우 moire superlattice를 형성한다는 것이 잘 알려져 있다. Superlattice가 형성되며 그림 6(a)와 같이 윗층과 아래층 그래핀 사이에 자연스럽게 AB-BA 적층 구조가 번갈아 나타나게 되는데, 도메인마다 드루드 반응의 차이가 나타나게 되므로 s-SNOM으로 이를 측정하면 그림 6(b)와 같이 superlattice를 시각적으로 확인하여 뒤틀린 각도를 역산할 수 있다. tDBG 시편의 경우도 이와 비슷한 현상이 나타나(그림 6(c)), ABAB 도메인과 ABCA 도메인의 공간적인 분포 정보를 획득할 수 있다(그림 6(d)).

다음으로, s-SNOM을 이용한 폴라리톤(polaritons)에 관한 연구들을 소개하고자 한다. 폴라리톤은 전자기파와 물질이 강하게 결합하여 발생하는 준입자로, 결합한 현상 또는 물질, 그리고 빛의 성질을 모두 갖는 공명 현상이다. 2차원 물질에서는 플라스몬(plasmon), 포논(phonon), 엑시톤(exciton), 쿠퍼 쌍

Fig. 7. (a) s-SNOM image of graphene flake on silicon dioxide substrate. (b) Enlarged s-SNOM image for blue rectangle. 930 cm^{-1} laser was used. Green and white arrows indicate the plasmon-polaritons of monolayer and bilayer graphene, respectively. Dashed and dash-dot lines represent the boundary of each layer. Data from 12D IRS Beamline, Pohang Accelerator Laboratory.

(Cooper pair), 마그논(magnon) 등 다양한 현상들이 s-SNOM의 집속된 적외선과 결합하여 폴라리톤을 형성하는 것으로 알려졌다.^[18] 이러한 2차원 물질의 폴라리톤은 주로 물질의 가장 자리에서 정상파 형태로 관측된다.

그림 7은 이산화규소 위에 놓인 1, 2층 그래핀의 플라스몬 폴라리톤을 s-SNOM으로 시각화한 결과이다. 주로 그래핀의 끝부분에서 플라스몬 폴라리톤이 형성되는 것을 볼 수 있다. 이러한 모양은 마치 연못에 돌을 던졌을 때 연못가에 형성되는 물결과 비슷하기 때문에, 시분해 테라헤르츠 분광학(Time-resolved terahertz spectroscopy)처럼 펌프 빔(pump beam)과 프로브 빔(probe beam)이 모두 존재해야 할 것으로 여겨진다. 그러나 흥미롭게도 폴라리톤 연구에서 s-SNOM은 돌을 던지는 역할(pump)과 시각화하는 역할(probe)을 동시에 수행하고, 탐침의 위치가 정상파 모양에 무관한 것으로 알려졌다. 또한 빛과 플라스몬의 성질을 모두 갖고 있기 때문에, 입사하는 적외선의 에너지를 변화시키거나, 그래핀에 게이트 전압을 인가하여 전하 농도를 변화시키면 플라스몬 폴라리톤의 성질 역시 변하여 s-SNOM으로 관측되는 파장의 길이와 진폭이 달라지는

REFERENCES

- [16] S. S. Sunku, G. X. Ni, B. Y. Jiang, H. Yoo, A. Sternbach, A. S. McLeod, T. Stauber, L. Xiong, T. Taniguchi, K. Watanabe, P. Kim, M. M. Fogler and D. N. Basov, *Science* **362**, 1153 (2018).
- [17] A. Kerelsky, C. Rubio-Verdu, L. Xian, D. M. Kennes, D. Halbertal, N. Finney, L. Song, S. Turkel, L. Wang, K. Watanabe, T. Taniguchi, J. Hone, C. Dean, D. Basov, A. Rubio and A. N. Pasupathy, *arXiv preprint arXiv:1911.00007* (2019).
- [18] D. N. Basov, M. M. Fogler and F. J. G. de Abajo, *Science* **354**, 6309 (2016).
- [19] Z. Fei, A. S. Rodin, G. O. Andreiev, W. Bao, A. S. McLeod, M. Wagner, L. M. Zhang, Z. Zhao, M. Thiemens, G. Dominguez, M. M. Fogler, A. H. C. Neto, C. N. Lau, F. Keilmann and D. N. Basov, *Nature* **487**, 82 (2012).

Fig. 8. (a) Topography of hBN flake. s-SNOM images for (b) 1530 cm^{-1} , (c) 1548 cm^{-1} , and (d) 1562 cm^{-1} . Green and white arrows indicate the phonon-polaritons of 13 nm thick and 27 nm thick hBN, respectively. Data from 12D IRS Beamline, Pohang Accelerator Laboratory.

것이 관측되었다.^[19]

절연체의 경우, 그래핀과 달리 전하가 없으므로 플라즈몬 폴라리톤은 생성되지 않지만 포논과 결합한 포논 폴라리톤이 관측되었다. 그림 8은 육방정계 질화붕소(hexagonal boron nitride, hBN)에서 광학 포논(optical phonon)이 적외선과 결합하여 포논 폴라리톤을 형성한 모습이다. 입사 레이저의 에너지와 hBN의 두께에 따라 가장자리에 나타나는 포논 폴라리톤의 모습이 달라지는 것을 확인할 수 있다. 최근 보고된 한 연구에서는 nano-FTIR을 이용해 hBN의 스펙트럼을 분석하여 포논 폴라리톤이 광학 포논의 성질을 띠고 있음을 확인하였다.^[20] 한편, 면방향으로 비등방성 격자구조를 가진 물질인 $\alpha\text{-MoO}_3$ 에서는 포논 폴라리톤 역시 면방향 비등방성을 지니는 것으로 나타났다.^[21]

결론

나노 IR은 도입 초기단계에 있는 분광학계의 첨단 기술로, 빛의 회절한계에서 비롯된 적외선의 낮은 공간 분해능을 뛰어넘어 나노미터 수준의 공간 분해능을 달성한 신기술이다. 이에 기존 적외선 분광학에서 가능하던 여러 가지 연구를 나노미터 수준에서 수행할 수 있게 되었다. 기계적 구조의 특성상, 2차원 물질의 연구에 매우 적합하여 연구계의 최근 흐름에 유용한 분석 기법이라고 할 수 있다. 전하 농도와 같이 기존에 적외선 분광학에서 다루던 주제를 더욱 세밀하게 살펴볼 수 있음은 물론, 표면 폴라리톤과 같이 기존 적외선 분광학에서 다룰 수 없었던 새로운 연구 또한 활발히 수행되고 있다. 더욱이, 앞으로 THz 광원이 보급되고, s-SNOM 중심의 현재 연구 분위기가 nano-FTIR을 적극적으로 사용하는 방향으로 발전하면 국소 부위의 밴드갭이나 결합에너지, 초전도현상, 강자성 등 그 활용 분야가 더욱 넓고 다양해질 것으로 기대된다.

나노 IR은 AFM과 광학계라는 까다로운 두 기기가 결합되어 더욱 까다로운 성격을 드러내기 때문에, 장비를 원만하게 다루고 유효한 데이터 분석을 수행하기 위해서는 장비의 기본 원리에 대한 이해가 반드시 필요하다. 이 글에서 간략히 소개한 나노 IR의 기본 개념과 최근 연구 동향이 나노 IR에 관심을 갖고 있는 국내 연구자분들에게 조금이나마 도움이 되기를 희망하는 바이다.

REFERENCES

- [20] S. Dai, Z. Fei, Q. Ma, A. S. Rodin, M. Wagner, A. S. McLeod, M. K. Liu, W. Gannett, W. Regan, K. Watanabe, T. Taniguchi, M. Thiemens, G. Dominguez, A. H. C. Neto, A. Zettl, F. Keilmann, P. Jarillo-Herrero, M. M. Fogler and D. N. Basov, *Science* **343**, 1125 (2014).
- [21] W. Ma, P. Alonso-Gonzalez, S. Li, A. Y. Nikitin, J. Yuan, J. Martin-Sanchez, J. Toboada-Gutierrez, I. Amenabar, P. Li, S. Velez, C. Tollan, Z. Dai, Y. Zhang, S. Sriram, K. Kalantar-Zadeh, S-T. Lee, R. Hillenbrand and Q. Bao, *Nature* **562**, 557 (2018).