방사광 적외선 분광학

DOI: 10.3938/PhiT.21.041

이종석·강태동·채복남·김재영

Synchrotron Infrared Spectroscopy

Jongseok LEE, Tae Dong KANG, Boknam CHAE and Jaeyoung KIM

Today, most synchrotron facilities offer beamlines dedicated to infrared (IR) spectroscopy and IR microspectroscopy. The main advantage of synchrotron-based infrared spectroscopy is the brightness of the synchrotron radiation source which can provide a brightness two or three orders of magnitude higher than a thermal (black-body radiation) infrared source. Thus, synchrotron-based infrared spectroscopy allows a high spatial resolution (infrared microspectroscopy) and a high spectral resolution, especially for low-throughput technologies and far-infrared spectroscopy. In this article, a brief introduction to synchrotron-based infrared spectroscopy and its application will be given.

들어가는 글

적외선 분광학(Infrared spectroscopy)은 시료의 형태에 따라 다양한 방법으로 시료를 제작하고 측정할 수 있을 뿐 아니라 물질의 물리화학적 변화를 비파괴적으로 민감하게 검출할 수 있어, 매우 유용한 분석 방법 중의 하나로 널리 활용하

저자약력

이종석 교수는 2004년 서울대 물리학과에서 이학박사 학위를 취득한 후, 독일 베를린 가속기연구소, 일본 동경대 응용물리학과를 거쳐 2011년부터 광주과학기술원 광공학응용물리학과 교수로 재직 중이다.

강태동 박사는 2006년 경희대 물리학과에서 분광 타원편광 분석법으로 이학박사 학위를 취득한 후, 미국 브룩헤이븐 국립연구소의 방사광 가속기에 원적외선 분광 타원편광계를 제작하는 프로그램에 참여하였다. 현재 서울대학교 기초과학연구원 연구교수로 재직 중이다.

채복남 박사는 2003년 포항공대 화학과에서 이학박사 학위를 취득한 후, 삼성코닝정밀소재, LG화학기술연구원을 거쳐 2010년부터 포항가속기연구소에 재직 중이다. (cbn@postech.ac.kr)

김재영 박사는 2000년 서울대학교 물리학과에서 이학박사 학위를 취득하였으며, 현재 포항가속기연구소에 재직 중이다.

Fig. 1. Calculated signal expected for a sample of throughput $5 \times 10^{-2} \text{ mm}^2 \text{ sr}$ for a thermal source at 1200 K, and the NSLS(National Synchrotron Light Source, USA) U4IR beamline with 1 ampere of stored beam. Also shown is detector noise, so that the advantage of the synchrotron in terms of enhancing the signal to noise is evident.^[1]

고 있다. 또한, 적외선 현미경 분광학은 국소 부위 또는 넓은 부위에 존재하는 물질의 구조 분석이 가능하고, 유기/유기, 유기/무기, 결정질/비결정질 재료의 분산성 분석이 가능하여 다양한 분야에서 microanalysis tool로 활용하고 있다.

방사광 적외선 분광학은 기존 적외선 분광기의 광원을 상용화된 흑체 복사 광원이 아닌 방사광을 광원으로 활용한 것으로, Fig. 1에 나타난 바와 같이 상용화된 흑체 복사 광원 대비 100~1,000배 밝은 빛을 제공할 수 있어, 기존 적외선 분광학의 검출 한계 및 공간 분해능을 현저히 향상시켜 더 강력한 분석 방법으로 각광받고 있다.^[1,2] 특히, 원적외선(Far-IR, 400~50 cm^{-1}) 영역에서의 휘도가 현저히 증가하여 그 응용

REFERENCES

- [1] C. J. Hirschmugl and G. P. Williams, Synchrotron Radiation News **8**, 10 (1995).
- [2] M. C. Martin, U. Schade, P. Lerch and P. Duams, Trends in Analytical Chemistry **29**, 453 (2010).

분야가 크게 확대될 수 있다. 또한, 상용화된 적외선 광원의 휘도에 의해 제약되었던 microscopy에서의 공간 분해능이 수 μm 로 현저히 향상되어 기존 적외선 분광학에서 측정이 어려웠던 single cell 또는 small single crystal 등의 시료를 신속하게 측정할 수 있어, 미세 구조로 이루어진 다양한 물질의 구조 특성 및 물리 화학적 특성을 분석할 수 있는 미세 검출기로도 활용이 가능하다.^[2] 뿐만 아니라 방사광 적외선 빔라인은 단색화 장치 없이 마이켈슨 간섭계(Michelson Interferometer)를 기반으로 하여 모든 파장의 신호를 신속하고 용이하게 측정할 수 있는 상용화된 푸리에 변환 적외선 분광기(Fourier-Transform Infrared Spectrometer: FTIR)의 광원을 방사광 적외선 광원으로 활용하므로, 모든 파장의 신호를 한번에 얻을 수 있고, 전술한 바와 같이 다양한 형태의 시료에 대해 다양한 외부 섭동을 인가하여 측정이 가능하도록 그 실험장치들이 적용 또는 개발되고 있어 방사광 적외선 분광학은 그 활용도가 매우 크다.

현재 방사광 적외선 빔라인은 아래 표와 같이 전 세계적으로 30여 개가 운영 중이며 이용자들의 요구에 의해 그 개수가 증가하고 있다.^[2] 포항가속기연구소 또한 이용자들의 요구를 반영하여 방사광 적외선 빔라인 건설을 계획 중이다. 이 글에서는 방사광 적외선 광원을 이용한 방사광 적외선 분광학의 응용에 대해 소개하고자 한다.

	가속기	가동 빔라인	비고
미국	ALS	27기	17기 건설 예정
	CAMD	17기	-
	Jlab	17기	-
	NSLS	67기	-
캐나다	CLS	27기	-
유럽	ALBA (스페인)	-	17기 건설 예정
	ANKA (독일)	27기	-
	BESSYII (독일)	17기	-
	DAFNE (이태리)	17기	-
	Diamond (영국)	17기	-
	ELETTRA (이태리)	17기	-
	ESRF (프랑스)	17기	-
	MAX-lab (스웨덴)	17기	-
	Metrology LS (독일)	27기	-
	SLS (스위스)	17기	-
	SOLEIL (프랑스)	27기	-
호주	Australian synchrotron	17기	17기 건설 예정
아시아	INDUS-1 (인도)	-	17기 건설 예정
	NSRL (중국)	17기	-
	NSRRC (대만)	17기	-
	SESAME (요르단)	-	17기 건설 예정
	Siam Photon Source (태국)	17기	-

Fig. 2. (a) Schematic diagram of infrared microspectroscope which combines the interferometer and confocal microscope. (b) Dependence of light (mid-infrared) intensity on the aperture size. The globar source as a blackbody radiation is compared with infrared synchrotron radiation (BESSY, IRIS) (c) Spatial distribution of focused infrared synchrotron radiation (ALS).

적외선 현미경 분광학(Infrared Microspectroscopy)

전술한 바와 같이, 방사광 적외선 광원은 상용화된 흑체 복사 광원에 비해 고휘도의 빛을 제공할 수 있고, 특히 원적외선 영역에서의 휘도가 흑체 복사 광원 대비 현저히 증가하여 초기에는 원적외선 영역에서의 연구가 활발히 이루어졌다. 그러나 방사광 적외선 광원이 지니는 고휘도 특성은 현미경 장치를 이용하여 이를 작은 사이즈로 집속시킬 때 장점으로 더욱 부각될 수 있어, 적외선 영역 전반에 걸친 현미경 분광학 영역에서 광범위하게 활용되고 있다.

Fig. 3. (a) A photograph of a graphene device together with a schematic diagram of the focused synchrotron beam (red dot). (b) The real part of optical conductivity spectra ($\sigma_1(\omega)$) of graphene with varying gate voltages applied. The inset shows the band structure of graphene near the Dirac point and the interband transition at the Fermi level.^[3]

적외선 현미경 분광 실험 장비는 Fig. 2(a)에 나타난 바와 같이 간섭계를 포함한 분광기와 현미경이 결합된 형태로 이루어지는데, 광대역 광원으로 방사광 적외선과 흑체 복사 광원이 주로 이용된다. 소형인 흑체 복사 광원은 주변에서 흔히 구할 수 있어 일반 실험실에서 용이하게 연구 수행이 가능하다는 장점이 있으나, 광원의 공간적인 크기가 수 mm 이상으로 커 집속 시 한계가 있으며, 조리개를 이용해 집속된 빛의 크기를 줄이게 되면 그 세기가 급격히 감소하여(Fig. 2(b)) 작은 시료 측정이나 회절 한계(diffraction limit) 공간 분해능의 확보에 어려움이 있다. 이에 반해 거대 가속기 시설에서 생성되는 방사광 적외선 광원은 점광원으로 근사될 수 있고, 작은 퍼짐각으로 인해 일반 흑체 복사 광원에 비해 100 ~ 1,000배 정도 밝은 빛을 제공할 수 있다. Con-focal 현미경을 사용할 경우 파장의 절반 정도에 해당하는 회절 한계의 공간 분해능을 가질 수 있으며, 이는 중적외선 영역에서는 대략 1 ~ 10 μm 정도에 이른다(Fig. 2(c)). 또한, 흑체 복사 광원에 비해 현저히 향상된 신호 대 잡음 비를 얻을 수 있어, 이를 활용한 분광학 연구가 다양한 분야에서 활발히 진행되고 있다.

Fig. 4. Biofilm dynamics. SR-FTIR time course analyses and chemical images of biofilms (a) in a microchannel and (b) in a microwell (as shown by four molecular markers at $\sim 1080\text{ cm}^{-1}$ (polysaccharides), $\sim 1130\text{ cm}^{-1}$ (glycocalyx), $\sim 1240\text{ cm}^{-1}$ (DNA/RNA polysaccharides), and $\sim 1310\text{ cm}^{-1}$ (protein amide III)). Unlike the microchannel data, where signal intensity of key biomolecules appeared to approach an asymptotic state, the microwell SR-FTIR data were cyclic (cell growth and release). The chemical image plots obtained after the second cycle show locally higher signal intensities of protein amide III ($\sim 1310\text{ cm}^{-1}$) and DNA/RNA polysaccharides ($\sim 1240\text{ cm}^{-1}$) near the microwell center, whereas the polysaccharide matrix accumulated near the microwell edge. There is little spectroscopic evidence of glycocalyx ($\sim 1130\text{ cm}^{-1}$) to facilitate strong adherence to the microwell substrate. Scale bars = 10 μm .^[4]

전술한 바와 같이, 방사광 적외선을 이용한 적외선 현미경 분광학의 가장 큰 장점은 수 마이크로미터 크기의 작은 샘플에 대한 광학적 연구를 수행할 수 있다는 데 있다. 최근 학계에서 지대한 관심을 끌고 있는 그래핀(graphene)의 경우 큰 사이즈의 단결정 샘플을 제작하는 일은 여전히 쉽지 않으며 일반적으로 마이크로미터 크기의 샘플들이 연구에 이용되고 있다. Li를 비롯한 Basov 교수 그룹에서는 20 ~ 40 μm 정도 크기의 그래핀(graphene)에 적외선 방사광을 회절 한계 수준으로 집속해 살펴봄으로써 게이트 전압에 따라 페르미 준위를 조절할 수 있음을 보여주었다(Fig. 3).^[3] 이러한 소형 샘플에 대한 실험은 응집 물질계에서 새롭게 등장하는 신물질 및 마이크로 디바이스 형태의 응용소자 연구에 효과적으로 이용될 수 있다.

또한, 수 마이크로미터 크기의 박테리아, 직경이 대략 1 마

REFERENCES

- [3] J. Q. Li *et al.*, Nature Phys. **4**, 532 (2008).

Fig. 5. Diamond anvil cell for high pressure spectroscopy. Sample is located in the pressure medium surrounded by diamond anvils and metal gasket. Optical measurement can be made in reflection and/or transmission modes through the diamond anvil.^[4]

이크로미터 정도 되는 거미줄 등의 바이오 물질체에 대한 연구, 미세 구조를 갖는 고분자 또는 고분자 복합 소재의 사슬 구조, 상 변화, 구조 전이, 배향 특성, 분자 간 또는 분자 내 상호 작용 등을 신뢰성 있고 신속하게 분석할 수 있어 물리, 화학, 생물 등 과학계 전반에 걸쳐 폭넓게 이용되고 있다. 특히, 방사광 적외선 분광학은 유기, 고분자, 생체 시료 등을 시료의 파괴나 가열이 거의 없이 관찰할 수 있어 타 분광 분석과 비교 시 큰 장점을 가진다. Figure 4는 적외선 방사광 광원을 이용하여 바이오필름 내에서 일어나는 화학적인 변화를 in-situ, in-vivo로 살펴본 것으로, 다양한 생체 시료에 대해 실시간 분석이 가능하다.

방사광 적외선을 활용한 적외선 현미경 분광학은 고압 실험에서도 널리 활용되고 있다. 일반적으로 다이아몬드 앤빌 셀(diamond anvil cell)을 이용하여 시료에 압력을 가하게 되는데, 앤빌 팁을 통해 50 GPa 정도의 유체 정지 압력(hydrostatic pressure)을 샘플에 부가할 수 있다. 통상 앤빌 팁의 직경은 대략 50 ~ 100 μm 로서, 이러한 앤빌 셀 내부에 위치한 샘플에 대한 광학 실험을 수행하기 위해서는 방사광 적외선을 이용한 현미경 분광학이 매우 유용하다. 현재 이러한 방법을 이용하여 무거운 페르미온계 물질들을 비롯한 강상관계 물질계에서의 압력에 따른 금속비금속 상전이 현상 등의 연구가 일본(UVSOR)과 독일(ANKA) 가속기 위주로 진행되고 있다.^[4-6]

방사광 적외선 현미경 분광학은 이 외에도 이미징 실험을 통해 광학적 물성의 공간적인 불균일성을 확인하는 데에도 활용이 될 수 있다. Point detector를 이용할 경우 집속된 빔에 대해 샘플의 위치를 상대적으로 바꿔 스캐닝을 함으로써 원하는 영역에 대한 이미지를 얻을 수 있게 된다. 그러나 적외선 영역에서의 원격장 이미징 실험은 수 마이크로미터의 공간분해능밖에 제공하지 못하기 때문에 나노스케일 수준에서 불균일성을 나타내는 응집물질계에서는 그 활용도를 찾기가 어려워, 상대적으로 불균일성이 좀 더 큰 스케일에서 나타나는 바이오 물질체에 대한 실험이 주로 이루어지고 있다. 이 경우에는 in-vivo 실험이 주요할 수 있으며, 따라서 주사 시

Fig. 6. (a) Schematic of the 12-beam synchrotron Fourier-transform infrared imaging beamline at the Synchrotron Radiation Center. (b) and (c) Infrared images showing the amide I distribution at 1654 cm^{-1} in cancerous prostate tissue with chronic inflammation, measured with the new multibeam synchrotron system with an FPA (b) and a conventional benchtop instrument (PerkinElmer Spotlight) equipped with a linear array detector (c). The result in (b) shows an enhanced spatial resolution by two orders of magnitude higher than in (c). The yellow scale bar corresponds to 50 μm .^[7]

간을 줄이는 게 관건이 된다. (한 점에서 30초의 시간을 들여 스펙트럼을 얻는다고 할 때, 100×100 포인트들에 대한 스캔을 하게 되면 5,000분의 시간이 필요하게 된다.) 이를 위해 CCD 카메라와 같은 배열 검출기(FPA: focal plane array)를 이용함으로써 스캔 및 데이터 수집 시간을 단축할 수 있게 된다(현재 포항가속기에는 64×64 검출기 배열을 갖는 중적외선용 FPA가 구비되어 있다). 최근 가속기에서 생성된 방사광을 공간적으로 분리하고 멀티 빔 형태로 인출하여 각각을 샘플 및 FPA의 다른 부분으로 전송 및 검출함으로써 Fig. 6에서 보는 것처럼 공간 분해능을 훨씬 향상시킨 결과가 보고되기도 했다.^[7]

REFERENCES

- [4] D. A. Moss, B. Gasharova and Y.-L. Mathis, *Synchrotron Radiation News* **21**, 51 (2008).
- [5] C. A. Kuntscher *et al.*, *Phys. Rev. B* **74**, 054105 (2006).
- [6] H. Okamura *et al.*, *Journal of Physics: Conference Series* **215**, 012051 (2010).
- [7] M. J. Nasse *et al.*, *Nature Methods* **8**, 413 (2011).

Fig. 7. Schematic description of ellipsometric measurement. The ellipsometric angles (Ψ and Δ) represent the change of polarization state and are obtained by reflectance ratio between p(TM)- and s(TE)-polarizations, where $r_p = |r_p|e^{i\delta_p}$ and $r_s = |r_s|e^{i\delta_s}$.

적외선 타원 편광 분석(Infrared Ellipsometry)

방사광 적외선을 이용한 물성 연구로 요긴하게 쓰일 또 다른 광학적인 측정법으로, 분광 타원 편광 분석법(spectroscopic ellipsometry)이 있다. 분광 타원 편광 분석법은 시료에 편광된 빛(polarized light)을 비추어서 반사되거나 투과된 빛의 편광상태(polarization state)의 변화를 측정함으로써, 시료 또는 그 시료를 구성하는 물질의 광학 및 구조적인 특성에 대한 정보를 얻어낼 수 있는 방법이다. 근적외선, 가시광선과 자외선 영역의 타원 편광계(ellipsometer)는 학교, 연구소 및 산업체 등에 많이 보급되어 주로 반도체 등 고체의 박막, 표면 및 계면의 특성을 연구하는데 주로 이용되어 왔다.

보통 반사율이나 투과율 측정은 참조 시료와 비교하여 반사나 투과된 빛의 상대적인 세기 값만을 측정하므로 측정 시료의 광학 상수를 얻으려면 복잡한 과정이 요구된다. 예를 들어, 반사율을 이용해서 단결정(single crystal) 시료의 광학상수를 구하기 위해서는 크라머르스-크로니그 관계식(Kramers-Kronig relation)을 적용하여 위상(phase) 값을 따로 계산해 내어야 하는데, 일반적으로 원적외선(far-infrared)에서 자외선(ultraviolet)에 이르기까지의 광범위한 파장 전 영역에 대한 측정값이 필요하다. 그러나 ellipsometry는 일반적으로 Fig. 7에서 표현되는 것과 같이 반사나 투과 후의 서로 수직인 두 편광 사이의 상대적인 세기($\tan \Psi$)와 위상차(Δ)의 두 가지 정보를 한 번에 측정하므로 Kramers-Kronig 관계식 변환이 따로 필요 없고, 특정 파장 영역의 측정 데이터만으로도 그 파장 영역의 광학상수를 얻을 수 있다.

Fig. 8. (a) Far-infrared spectroscopic ellipsometer installed at NSLS which is equipped with θ - 2θ goniometer, polarizers(P_1 , P_2), two retarders(C_1 , C_2), analyzer(A) and a cryostat for temperature change (b) temperature-dependent optical conductivities measured on $\text{LaVO}_3/\text{SrVO}_3$ superlattices using this ellipsometer system.^[8]

산업적으로는 주로 기판과 박막의 특성 측정을 위하여 제한적으로 이용되었지만, 최근에 반도체 회로에 요구되는 집적성이 점점 높아짐에 따라, 회로의 임계 치수(critical dimension)의 사이즈가 수십 나노미터 이하로 작아지면서, SEM(scanning electron microscopy)에 의존하던 패턴의 이미징은 전자의 충전(charging) 등의 효과 때문에 정확도가 낮아지게 됨에 따라, 이러한 문제를 야기하지 않는 반사율 측정이나

REFERENCES

- [8] D. W. Jeong *et al.*, Phys. Rev. B **84**, 115132 (2011).

ellipsometer 등의 광학적인 측정과 분석 알고리즘 개발의 중요성이 커지고 있다.

한편, 국내에서는 앞으로 수년 내에 몇몇 대학과 연구소에서 IR ellipsometer를 갖출 것으로 알려져 있어서, 국내에서의 IR ellipsometer를 활용한 연구가 더욱 활발해질 것으로 기대된다. IR ellipsometer는 물리학 분야뿐만 아니라, 기존에 적외선 현미경 분광학(IR microspectroscopy)으로 연구가 이루어지는 화학이나 생물학 분야에서도 많은 활용이 기대된다.

IR ellipsometer는 사용하는 광학부품과 검출기(detector)의 광학적 특성에 따라 스펙트럼 범위가 결정된다. 예를 들어, ZnSe 편광자(polarizer)와 DTGS 검출기 등으로 구성되면, 그 스펙트럼 범위는 약 300 cm^{-1} 이상에서 근적외선 영역까지의 범위가 되고, 폴리에틸렌(polyethylene) 편광자와 볼로미터(bolometer) 검출기 등으로 구성하면, 700 cm^{-1} 이하에서 원적외선 거의 전체 영역의 스펙트럼을 얻을 수도 있다. 전자(前者)의 중(中)적외선 구성은 상용화가 되어 있기도 하지만, 후자(後者)의 원(遠)적외선 구성의 경우에는 아직 상용화가 이루어지지 않았다.

Figure 8(a)에서 보여지는 ellipsometer 셋업은 최근에 미국 브룩헤이븐 국립연구소(Brookhaven National Laboratory, BNL)의 방사광 가속기 NSLS에서 기존의 다른 원적외선 ellipsometer와는 차별적으로 θ - 2θ goniometer를 사용하여 빔의 시료에 대한 입사각(angle of incidence)을 자유롭게 변화시킬 수 있게 했고, 시료로부터의 모든 편광상태를 표현할 수 있는 완전물리행렬(full Mueller matrix) 측정이 가능하도록 두 개의 회전 가능한 위상 지연자(rotatable phase retarder)를 사용하여 제작되었다.^[9]

방사광 적외선 광원은 전술한 바와 같이 흑체 복사 광원에 비해 $100 \sim 1,000$ 배 밝은 적외선 영역의 빛을 제공할 수 있어 훨씬 큰 신호대잡음비(signal-to-noise ratio)를 얻을 수 있으므로, 작은 시료의 측정이나 짧은 측정 시간에도 우수한 데이터를 얻을 수 있다. 특히, 측정 시간이 짧아지면 저온 실험에서는 최근 세계적으로 공급 파동 현상을 빚고 있는 액체 헬륨의 소비를 줄일 수도 있다. 또한, 상용화된 중적외선 영역의 IR ellipsometer의 경우에는 흑체 복사의 실험실 광원을 이용하므로 빔 세기가 낮아 그 응용은 박막 등 면적이 큰 샘플에 대한 연구에 거의 한정되어 있다. 그런데, 이 스펙트럼 영역에서 방사광 가속기를 이용한 IR ellipsometer를 구성하여 작은 빔 사이즈와 높은 해상도를 얻을 수 있으므로 작은 시료에 대한 측정에 용이하며, 샘플의 광학적 특성을 mm 사이즈 이하의 크기로 매핑(mapping)을 할 수도 있다.

예를 들어, 쿠프레이트(cuprate) 고온 초전도체(high T_c

Fig. 9. (a) Schematic drawing of the IR synchrotron mapping ellipsometer (BESSY II) with a spot profile measured at normal incidence. (b) Construction drawing for the ellipsometer part in (a)

superconductor, HTSC)나 새로운 전자기적인 특성을 가지는 많은 다른 금속 산화물에 대하여 실험실 광원(laboratory source)을 이용한 ellipsometry 연구는 상대적으로 단결정보다 질적으로 떨어지는 박막이나 다결정(polycrystalline) 시료에만 이용할 수 있는 데 반해, 방사광을 사용하면, 비록 크기가 작아도 질적으로 훨씬 우수한 단결정(single crystal)에 대한 연구를 수행할 수 있다.^[10]

뿐만 아니라, ellipsometry를 박막의 구조, 방향성, 그리고 균질성을 결정하는데 응용할 수 있다. 방사광을 사용하면 독일의 BESSY II에 설치되어 있는 IR ellipsometer(Fig. 9)처럼 focusing으로 빔 사이즈를 1 mm^2 이하로 줄일 수 있으

REFERENCES

- [9] T. D. Kang *et al.*, Thin Solid Films **519**, 2698 (2011).
- [10] C. Bernhard *et al.*, Thin Solid Films **455-456**, 143 (2004).

Fig. 10. Maps of ellipsometric angles ($\tan \Psi$ and Δ) for single steps in the production of the biosensor (a)(c) CHL peptide (b)(d) anti-GST antibody. (e) Map of $\tan \Psi$ showing flakes of graphene(A) and graphite(B), and the digital photographs in the inset figure. (f) Optical conductivity of the flakes of the graphene and graphite showing the optical conductivity of the graphene is not unity, which may be attributed to the chemical doping caused by the exposure to atmosphere.

므로 시료를 mapping하거나 표면에서의 광학적인 특성의 분포에 대한 이미지를 얻을 수 있다.^[11,12] G. Sun 등은 금과 실리콘 표면 위의 서로 다른 단백질(protein) 박막으로 이루어진 바이오센서(biosensor) 표면에 대한 연구에서 방사광 micro-focus IR mapping ellipsometer를 이용한 측정으로 단백질 박막의 두께와 분자 구조의 균질성을 측정하였다.^[11] 이 연구에서 보여지듯이, 방사광을 이용한 mapping ellipsometry로는 넓은 영역을 측정하는 보통의 실험실에서 table-top IR ellipsometer 측정으로는 직접 관찰할 수 없는 생체 분자(biomolecular) 박막의 두께와 분자 구조의 균질성을 탐색할 수 있다(그림 10).

최근에 IR ellipsometry로 연구된 공기에 노출된 그래핀(graphene)에 대한 연구는 또 다른 매우 흥미로운 예가 될 수 있다. 2차원(two-dimension) 물질인 그래핀의 독특한 적외선 영역의 특성은 기술적으로나 과학적으로 큰 흥미를 끈다. 화학적으로 대면적으로 증착된 그래핀에는 많은 결함(defect)이 존재하는데, 고품질의 그래핀 조각은 기껏해야 수백 마이크로미터의 크기로 제한된다. 적외선 영역에서 빔사이즈가 큰 보통의 table-top IR ellipsometer 장비로는 이렇게 작은 그래핀 조각의 ellipsometric angles을 측정하는 것은 큰 편광소멸(depolarization) 때문에 용이하지 않은데, 이 연구에서는 방사광을 이용한 micro-focus IR mapping ellipsometer를 이용하여, 밀리미터 이하 크기의 그래핀 조각들에 대하여 Kramers-Kronig 변환 없이 복소 유전함수(complex

dielectric function) 및 광학적 전도도 등의 광학적 특성을 측정하였다.^[13]

이와 같이 micro-focus IR mapping ellipsometer나 원적외선 ellipsometer는 아직 상용화가 이루어지지 않았고, 현재 세계적으로 유럽과 미국에 손에 꼽힐 정도의 수만이 존재하며, 최근에 물리학, 화학, 생물학 등의 분야에서 많은 우수한 연구 결과를 배출해 내고 있다. 국내의 포항 방사능 가속기에도 IR beamline 건설과 함께 방사광의 장점을 최대한 활용할 수 있는 이러한 IR ellipsometer 제작을 계획하고 있다.

Far-IR and THz Application

방사광과 현미경 분광학의 결합은 중적외선 영역에서만뿐만 아니라 원적외선 영역에서도 기술적으로 가능하다. 이에 앞서 언급한 압력 인가와 같은 마이크로 실험들이 원적외선 영역에서도 동일하게 수행될 수 있어, 원적외선 분광학을 통해 살펴볼 수 있는 자유전자나 격자 동력학과 관련된 현상들을 보다 직접적으로 확인할 수 있다.

이러한 현미경 분광학은 기본적으로 원격장 분광학으로서 최대 공간분해능은 파장에 대해 선형적으로 비례하는 회절 한계에 의해 제약을 받는다. 중적외선의 경우에는 이러한 분해능이 1~10 μm 수준에 이를 수 있지만, 100 μm 내외의 파장대를 갖는 원적외선의 경우에는 공간분해능이 현저히 떨어지게 된다. 따라서 원적외선 영역에서는 해당 크기의 작은 시료의 측정 이외에 광학적 성질의 공간 분포를 확인하는 형태의 이미징 실험은 물리적으로 큰 의미를 지니지 못한다. 반면, 근접장 현미경을 사용할 경우 공간분해능의 광학적인 회절 한계는 존재하지 않아 원적외선/테라헤르츠 이미징 연구 영역에서의 주요 기술 개발 대상으로 인식되고 있다. 이 경우 공간 분해능은 빛의 집속을 위해 사용되는 aperture cone이나 빛과 샘플의 상호작용을 국소적으로 증가시키기 위한 금속 팁의 크기에 따라 결정되며, 나노미터 수준까지 향상된 분해능을 가질 수 있게 된다. 거울 반사(specular reflection) 빔을 사용하는 원격장 현미경과는 달리 큰 퍼짐각을 갖는 근접장 빛을 사용하는 근접장 현미경의 구현은 그만큼 기술적 어려움이 따르며, 보다 강한 세기의 광원을 이용하는 것과 샘플에 조사된 빛의 수집을 최대한 효과적으로 해내는 것이 관건이 되어, 가시광선, 근적외선, 중적외선 영역에서는 레이저

REFERENCES

- [11] G. Sun *et al.*, Phys. Status Solidi B **247**, 1925 (2010).
- [12] D. Aulich *et al.*, Phys. Status Solidi C **7**, 197 (2010).
- [13] J. W. Weber *et al.*, Appl. Phys. Lett. **99**, 061909 (2011).

Fig. 11. ESR result for LaMnO_3 . As the magnetic field increases, the magnetic mode splits and its splitting becomes larger.^[17]

를 광원으로 한 실험들이 주로 진행되어져 왔다. 원적외선, 테라헤르츠 영역에서는 최근 들어 고출력 광원들이 다양한 형태로 개발이 되고 있는데, 그 가운데 결맞은 방사광 테라헤르츠 역시 이러한 근접장 현미경 장비와 결합될 수 있는 광원으로 큰 관심을 끌고 있으며 실제로 몇몇 가속기 시설들에서 이미 관련 장비 개발이 이루어지고 있는 실정이다.^[14,15]

원적외선 및 테라헤르츠 영역은 현미경 및 이미징과 관련된 응용 이외에도 일반 분광학 실험을 통해 전하, 스핀, 격자 등의 기본 자유도들과 관련된 동역학을 직접적으로 확인하는데 중요하게 이용될 수 있다. 이를테면, 일반적으로 전자의 자기적인 상태를 규명하는 데 널리 이용되는 전자 스핀 공명 (ESR: electron spin resonance) 실험은 GHz 영역에서 주로 이루어지는데, 이를 THz 영역에서 살펴볼 수 있게 되면 단일 자성 분자(single magnetic molecule)인 Mn_{12} 와 같은 자기 상관 관계가 큰 물질에서 좀 더 높은 에너지의 자기효과를 확인할 수 있게 된다.^[16] Figure 11은 망간산화물 (LaMnO_3)의 방사광을 이용한 분광 실험을 통해 자기장, 에너지(frequency) 공간에서의 ESR 효과의 변화를 정확히 살펴볼 수 있는 사례를 보여주고 있다.^[17]

원적외선 특히 테라헤르츠 영역에서의 연구는 가속기 시설

을 이용하지 않고도 펄스 레이저를 기반으로 한 방법을 통해 일반 실험실에서도 진행할 수 있지만, 가속기를 통해 생성한 적외선 방사광은 테라헤르츠에서 중적외선 근적외선에 이르는 광대역 광원으로 동일한 분광 장비를 이용해 넓은 영역의 스펙트럼을 얻을 수 있는 장점이 있어 다른 분광학 방법에 대한 주요한 상호보완적인 역할을 하는 독특한 자리매김을 하고 있다.

맺는 글

전술한 바와 같이 원자석으로부터 발생한 고휘도의 방사광 적외선 광원은 microscopy, ellipsometry, grazing incidence 등의 low throughput technology뿐만 아니라 원적외선 영역에서의 연구에 큰 장점을 가지고 있어 유기물에서 무기물, 첨단 신소재에 이르기까지 다양한 분야에서 활용이 가능하다. 또한, 시료의 파괴나 가열이 거의 없어, 바이오 소재의 생화학 과정을 in-vivo, in-situ로 관찰할 수 있다는 장점이 있어 그 응용 가능성이 더 크다고 할 수 있다.

현재 포항가속기연구소에서는 빔라인 건설 사전 단계로 진공 방식의 적외선 분광기와 이미징 검출기를 구비한 적외선 현미경 분광 시스템을 마련하고 흑체 복사 광원을 이용해 이용자 서비스를 진행하고 있다. 액체, 고체, 필름, 박막 등 다양한 형태의 시료를 투과 또는 반사의 방법으로 측정할 수 있는 실험 장치를 갖추고 있으며, 기존의 고온 실험 장치에 더해 저온 실험 장치를 구성 중에 있다. 따라서 향후 포항가속기연구소에 방사광 적외선 빔라인이 건설되면, 기존 상용화된 적외선 광원으로 접근이 어려웠던 다양한 연구 분야에서 활발한 연구가 이루어질 것으로 기대된다.

REFERENCES

- [14] U. Schade *et al.*, Appl. Phys. Lett. **84**, 1422 (2004).
- [15] H-Y N. Holman, Z. Hao, M. C. Martin, H. A. Bechtel, Synchrotron Radiation News, **23**, 12 (2010).
- [16] A. Schnegg *et al.*, Phys. Chem. Chem. Phys. **11**, 6820 (2009).
- [17] L. Mihaly *et al.*, Phys. Rev. B, **69**, 024414 (2004).