스핀각도분해 광전자분광

DOI: 10.3938/PhiT.24.036

김 근 수

Spin and Angle-resolved Photoemission Spectroscopy

Keun Su KIM

The band structure of electrons is key to understanding various properties of solids. Angle-resolved photoemission spectroscopy (ARPES) is a powerful technique, which can not only directly measure the electronic band structure but also provide useful information on the quantum phase and many-body interactions. With additional spin detectors, ARPES is capable of additionally probing spin information in the electronic band structure, which is called spin-resolved ARPES. This article introduces the basic concept of spin-resolved APRES and briefly discusses the on-going project of spin-resolved ARPES at the Pohang Light Source and its potential application to the study of spin-split materials, such as topological insulators.

각도분해 광전자분광이란?

고체의 전자 밴드구조는 전자 물성을 이해하는 기본적인 뼈대에 해당하므로, 그것을 실험적으로 측정하는 것은 매우 중요하다. 고체의 전자구조의 개형을 직접적이고 효율적으로 관찰할 수 있는 기법 가운데 가장 널리 활용되고 있는 것이 바로 각도분해 광전자분광이다. 각도분해 광전자분광은 주로 자외선, 연엑스선 대역의 강력한 광원을 고체 표면에 조사할 때 여기된 광전자의 에너지와 각도를 주로 반구형 분석기를 통해 측

저자약력

김근수 교수는 연세대학교 물리학과에서 학사(2005년), 박사(2010년) 학위를 취득한 후, 미국 로렌스버클리 국립연구소에서 박사 후 연구원 과정을 거쳐, 2013년 11월부터 포스텍 물리학과에 재직 중이다. (keunsukim@postech.edu)

Fig. 1. Basic principle of ARPES (left) and ARPES spectra of doped graphene (right).

정한다(그림 1). 여기에서 각도는 간단한 수식을 통해 모델링으로 환산할 수 있으므로 에너지와 모멘텀의 분산 관계, 즉 전자 밴드구조를 직접적으로 측정하게 된다. 뿐만 아니라 전자-포논 상호작용과 같은 고체 내에 존재하는 다양한 다체상호작용 현상 및 광전자 간섭 현상 등 다양한 정보를 얻을 수 있다. 광전자분광 기법 자체는 그 역사가 오래되었으나, 특히 2000 년대에 들어 전자분석기의 효율성 향상에 힘입어, 고온초전도체, 저차원 물질계 등 다양한 고체의 전자적, 광학적 성질을 이해하는데 지대한 공헌을 하였다.

스핀각도분해 광전자분광 개요

스핀에 의존하는 전하이동에 관한 끊임없는 연구의 결과로 전자의 전하와 스핀의 자유도를 동시에 고려한 전자소자를 개발하려는 스핀트로닉스가 21세기 들어 급속히 학계의 이목을 이끌고 있다. 기존의 전자소자와 비교하여 스핀을 고려한 전자소자는 스핀의 고유 특성인 비휘발성(non-volatility)뿐만 아니라 초고속 및 저전력 등의 특성을 가지고 있기 때문에 향후 나노기술의 발전과 함께 차세대 나노 일렉트로닉스의 성장을 주도할 것으로 전망되고 있다.

최근 차세대 스핀트로닉스 소자에 적용할 수 있는 획기적인 물질로 주목받고 있는 위상절연체(topological insulator)의 전자

스핀 상태를 최근 새롭게 개발된 고성능 스핀 분해 및 각도 분해 광전자 분광장치(spin-resolved and angle-resolved photoemission spectroscopy)를 이용하여 직접 관찰함으로써 소자 응용에 중요한 전자스핀의 동작 기구를 규명하고 있다. 전자스핀의 상태가 전자의 운동 상태와 어떤 상관관계를 가지는가를 알게 됨으로써 위상절연체의 전자스핀을 3차원적으로 자유자재로 제어할 수 있는 가능성을 시사한다. 더불어 새로운 물질의 설계나 전자스핀 상태의 제어를 위해 이용될 수 있으며 새로운 위상절연체 물질의 개발과 차세대 스핀트로닉스 디바이스 및 초고속 양자컴퓨터의 실현 가능성을 크게 높일 수 있을 것으로 기대된다.

그러한 전망에도 불구하고 기술적인 관점에서 기존 스핀각도 분해 광전자분광 장치는 스핀검출 효율이 매우 낮고 그 에너지 분해능이 불과 0.1 eV 수준에 머무르고 있었다. 전자스핀의 동작을 고정밀도로 측정하는 것은 관련된 물리 현상을 보다 자세히 이해할 수 있게 되어 스핀 자유도를 도입한 기능성 재료나 전자소자의 개발을 위해 매우 중요한 과제이기 때문에, 이러한 문제를 극복한 고분해능 장치 개발이 강하게 요구되고 있다.

스핀각도분해 광전자분광의 원리

통상적인 각도분해 광전자분광이 전자의 에너지, 운동량의 상관관계를 측정하는 기술이라면 전자의 스핀 정보까지 모두 측정하는 것을 스핀각도분해 광전자 분광법이라 부른다. 추가적인 스핀 정보는 주로 통상적인 전자분석기를 통해 광전자의 에너지와 모멘텀 분석이 이루어진 후, 그림 2와 같이 디텍터 뒷부분에 추가적인 스핀 검출기를 통해 이루어진다. 스핀 검출의 원리는 전자에 직접 자기장을 인가하는 슈테른-게를라흐(Stern-Gerlach) 방법을 생각할 수도 있지만, 자유전자 상태에는 상대론적 효과에 의해 스핀 방향을 구별해내는 것이 거의 불가능하다. 따라서 전자의 스핀-궤도 상호작용이나 교환 상호작용이 널리 이용되고 있다.

초기에 개발된 스핀각도분해 광전자분광 장치들이 주로 채택했던 스핀검출기는 주로 모트 산란을 이용하는 스핀검출기이다. 그 원리는, 전자 에너지 분석기를 통과한 전자를 수 keV 수준까지 가속시켜 주로 비결정성 금과 같이 무거운 원소로 이루어진 고체에 수직으로 입사시키면, 스핀-궤도 상호작용에 의해 전자의 스핀 방향과 입사 방향이 이루는 평면의 좌우로 전자의 반사율이 달라지는 것을 이용한다.

모트 검출기에서 전자의 스핀 편극(P)은 금 또는 토륨 등의 무거운 원자의 핵에서 편극된 전자들의 비대칭 산란(A)을 측정하면 알게 된다. 편극 P 와 측정된 비대칭 A 의 관계식은 간단히 $P=A/S$ 로 나타낼 수 있으며, 여기서 S 는 셔먼(Sherman) 함수라고 하며 이 값으로부터 특정 스핀 검출기의 스핀 분해능

Fig. 2. Schematic diagram of spin-resolved ARPES.

Fig. 3. Basic principle of Mott-type spin detectors.

을 가능할 수 있다. 모트 검출기의 셔먼 함수값은 보통 0.1~0.2이다. 모트 검출기에 사용되는 금 물질은 상대적으로 안정적이고 입사 전자의 에너지가 상당히 높으므로 (20~100 keV) 장시간 상당히 안정적으로 사용할 수 있다. 하지만 스핀 검출기의 감도지수(figure of merit)는 보통 10^{-4} 에서 10^{-3} 정도로 매우 작기 때문에 좋은 S/A 비를 얻기 위해서는 에너지 분해능을 희생할 수밖에 없기 때문에, 보다 높은 감도지수를 갖는 스핀검출기를 개발하기 위해 많은 노력이 있었다. 예를 들면, 전자의 스핀 편극된 방향에 수직으로 좌우대칭의 전자 검출기를 넣는 것 외에도 이와 수직으로 전자 검출기를 넣어서 하나의 이차원 스핀 검출기를 만들고, 또 이와 수직인 방향으로 똑같은 스핀 검출기를 붙이면 3차원 방향 모두에 대한 스핀 정보를 알 수 있게 된다. 이러한 스핀 검출기는 전자의 운동량에 따라 어떠한 스핀 편극을 갖는지를 측정할 수 있게 된다.

모트 검출기가 스핀-궤도 상호작용으로 인한 “왼쪽-오른쪽” 스핀 비대칭 산란을 이용하는 것과는 반대로, 주로 저에너지(~10 eV) 전자들을 강자성체 타겟에 산란시켜 스핀 비대칭에 의한 “위-아래” 교환을 이용하는 방법을 저에너지 교환 산란(low-energy exchange scattering, LEX 혹은 very low energy electron diffraction, VLEED)이라고 한다. 이 검출기는 모트 검출기와 비교하여 월등히 높은 셔먼함수를 가지며, 감도지수는 2×10^{-2} 에 이른다. 또한 타겟 표면의 상태에 아주 민감한 특성을 가진다.

반구형 분석기와 모트타입 혹은 저에너지 교환산란 스핀검출

Fig. 4. Basic principle of exchange-scattering spin detectors.

기를 결합하는 방식의 경우 한 번에 하나의 모멘텀과 에너지에서 스핀 정보를 얻기 때문에 효율성이 낮다는 단점이 있다. 최근에는 그러한 단점을 일정 정도 개선하기 위해 전자의 비행시간으로부터 에너지를 측정할 수 있는 비행시간 전자 분석기가 개발되었다. 이 방법을 활용하면 이차원 표면의 두 모멘텀 방향을 동시에 측정할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 반드시 펄스화된 광원을 이용해야 하는 한계가 있다.

이와 같이 스핀각도분해 광전자분광 장치의 높은 분해능을 위해서는 스핀검출기와 전자분석기를 잘 조합하여 스핀검출 효율을 극대화하는 것이 중요하다. 예를 들면, 모트검출기와 비행시간 분석기를 결합했을 경우, 스핀 감도 지수는 모트 검출기와 반구형 분석기를 결합했을 때보다 10배 높아지게 된다. 특히, 비행시간 분석기를 저에너지 교환 산란 분석기와 결합했을 때 1000배의 높은 효율이 예상된다. 다양한 조합의 조건은 기반 환경에 따라 구성이 달라지고 있다.

스핀각도분해 광전자분광 구축 현황

세계 각국의 방사광 가속기를 중심으로 스핀각도분해 광전자분광 장치의 구축이 추진되고 있는 반면, 국내에는 이러한 흐름에 대응할 만한 마땅한 장비가 없는 상황이다. 국내에 처음으로 도입하는 스핀각도분해 광전자분광 장치를 방사광 가속기 빔라인에 설치하게 되면, 광원의 휘도가 높고 에너지를 자유롭게 변화시킬 수 있으므로, 경쟁력 확보에 유리하다. 뿐만 아니라 국내외 응집물질 연구자들 누구나 그러한 설비를 활용하여 연구할 수 있는 새로운 기회를 제공한다. 하지만 우리 포항 가속기 설비는 비행시간 분석기를 사용하는데 여러 가지 제약이 있으므로, 본 연구 그룹은 보다 통상적이고 범용성이 높은 반구형 전자 에너지 분석기와 저에너지 교환 산란 스핀 검출기를 결합하여 스핀검출 효율을 극대화한 스핀각도분해 광전자분광 설비의 구축을 목표로 한다. 기존 4A1마이크로 각도분해 광전자분광 설비에 더하여, 다양한 인공 저차원 물질에 대한 고분해능 전자밴드구조 기능을 우선적으로 확보하고, 이에 더하여 스핀분리된 밴드구조 측정이 추가적으로 가능케 된다. 현재 구축 중인 엔드스테이션의 기본적인 모식도는 그림 6과 같

Fig. 5. Efficiency diagram for different combinations of electron spectrometer and spin detectors.

Fig. 6. Drawing of spin-resolved ARPES that will be located in 4A beamline of the Pohang Light Source.

으며, 이 장비는 2015년 중순까지 구축을 완료 후 빔라인과 결합하여 2015년 말까지 스핀검출 등 성능을 점검한다.

스핀각도분해 광전자분광의 활용과 전망

최근 고체물리학 및 재료과학 분야에서 물질이 갖는 위상적 성질과 질서를 측정하고 이해하는 것은 매우 중요하다. 이러한 흐름에서 기존에 많이 연구해 오던 반전대칭 깨짐에 의한 스핀 분리 현상 및 위상절연체(topological insulator)와 같이 스핀-궤도 상호작용이 강한 물질을 보다 명확히 이해하기 위해서는 그것의 스핀분리된 전자밴드구조를 이해하는 것이 일반적으로 더욱 중요해지고 있다. 이러한 학계의 전반적인 흐름으로 미루어 볼 때 통상적인 고분해능 전자구조 측정 기법에 더하여, 스핀분해 전자구조를 직접적으로 측정하는 기술의 국내 도입은 연구역량 제고에 크게 기여할 뿐만 아니라, 기존 장비만으로는 불가능했던 새로운 연구 기회를 열어줄 수 있을 것으로 기대한다.