

Photoinduced Ultrafast Spin Dynamics: Review on Experimental Techniques

Dong-Hyun Kim*

Department of Physics, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korean

(Received 6 January 2026, Received in final form 18 January 2026, Accepted 20 January 2026)

Photoinduced ultrafast spin dynamics is an active research field that explores nonequilibrium magnetic phenomena occurring on femtosecond to picosecond timescales, driven by recent advances in experimental techniques. Optical excitation by femtosecond laser pulses perturbs electronic, lattice, and spin states, enabling direct access to ultrafast spin responses that have been inaccessible by conventional static or quasi-equilibrium measurements. In this review, I summarize major state-of-the-art time-resolved experimental techniques employed in the study of ultrafast spin dynamics. Time-resolved magneto-optical Kerr effects, time-resolved X-ray magnetic circular dichroism, terahertz emission spectroscopy are introduced, and their respective advantages and limitations are compared.

Keywords : ultrafast spin dynamics, time-resolved magneto-optic effect, THz emission, ultrafast demagnetization, ultrafast remagnetization

광역기 초고속 스핀동역학: 실험기법 리뷰

김동현*

충북대학교 물리학과, 충북 청주시 서원구 충대로1, 28644

(2026년 1월 6일 받음, 2026년 1월 18일 최종수정본 받음, 2026년 1월 20일 게재확정)

광역기에 의해 유도되는 초고속 스핀 동역학(photoinduced ultrafast spin dynamics)은 펨토초-피코초 시간 영역에서 발생하는 비평형 자기 현상을 탐구하는 분야로 최근 실험기법의 발전과 함께 활발히 연구되고 있는 분야이다. 펨토초 레이저에 의한 광여기는 전자, 격자, 스핀 상태를 여기시켜 기존의 정적 또는 준평형 측정으로는 접근하기 어려운 초고속 스핀 응답을 직접 관측할 수 있게 한다. 본 리뷰논문에서는 초고속 스핀 동역학 연구에 사용되는 주요한 최신 시간분해 실험 기법들을 정리해 보았다. 시간분해 자기광학 효과, 시간분해 X선 자기 원형 이색성, 테라헤르츠 방출 분광법을 중심으로 측정기법을 소개하고 각 기법의 장점과 한계를 비교하였다.

주제어 : 초고속 스핀동역학, 시간분해 자기광 효과, THz 방출, 초고속 탈자화, 초고속 재자화

I. 서 론

광에 의해 여기되는 초고속 스핀 동역학(photoinduced ultrafast spin dynamics)은 펨토초 및 피코초 시간영역에서 발생하는 비평형 스핀 현상을 탐구하는 핵심 연구 분야로 자리 잡고 있다[1]. Beaupaire 등에 의해 펨토초 레이저 펄스를 이용한 광여기(photoinduced)로 변화한 광자기 Kerr 효과(magneto-optical Kerr effect)를 측정할 기념비적 실험 이후 [2], 다양한 자성시스템에 대해 활발한 연구가 진행되어 왔고

비평형 상태의 광-전자-격자-스핀 상호작용에 대한 실험결과는 스핀과학 및 응집물리분야 전체에 대한 이해를 확장시키는데 기여해 왔다. 피코초 이하의 광여기 스핀동역학 실험의 특징은 전자, 격자, 스핀의 자유도가 거의 동시에 교란되어 극단적 비평형 상태를 펨토초 펄스 조사 이후 생성시킬 수 있어, 기존의 정적 또는 준평형 자기 측정 기법으로는 접근하기 어려웠던 초고속 자기 현상에 대한 응답을 직접 관측할 수 있다는 점이며, 이로부터 비평형 스핀동역학 이론[3,4]의 정립과 판별에 귀중한 실험정보를 제공할 수 있다.

최초 Ni 강자성 금속에서 관측된 펨토초 스케일의 초고속 탈자화(ultrafast demagnetization) 현상에 대한 실험결과 보고 [2]를 계기로 본격적으로 발전한 이 분야는, 시간분해 자기광학 효과(time-resolved magneto-optical Kerr/Faraday effect) [3-6], 시간분해 X선 자기 원형 이색성(X-ray magnetic circular dichroism)[7-10], 테라헤르츠(THz) 분광법[11-15] 등 다양한 실험 기법이 도입되면서, 광여기에 따른 스핀 동역학의 시간적 진화가 정밀하게 규명되기 시작하였다. 이러한 실험적 진보는 스핀 각운동량의 전달 경로와 에너지 이완 메커니즘에 대한 근본적인 질문에 대한 해답에 가까워질 수 있는 길을 제시하고 있다.

광여기에 의해 유도되는 초고속 스핀 동역학은 물질의 종류와 자기 구조에 따라 매우 상이한 형태로 나타난다. 강자성체에서는 스핀-궤도 결합을 매개로 한 각운동량 소산 과정과 스핀의존 산란이 탈자화 및 재자화 과정을 지배하는 것으로 알려져 있다. 반면 반강자성체(antiferromagnet)와 페리자성체(ferrimagnet)에서는 광펄스에 의해 스핀세차운동 [16,17], 초고속 순자기 모멘트의 생성[18]이 관측되며, 이는 테라헤르츠 주파수 대역의 초고속 스핀 제어 가능성을 제시한다. 최근에는 2차원 반데르발스 자성체, 위상 물질, 강상관 전자계 등 다양한 새로운 물질군[19-21]에 대한 실험 결과가 보고되면서 초고속 스핀 응답측정 실험에 대한 관심이 급증하고 있다.

초고속 스핀동역학 측정법의 핵심은 펌프-프로브 스트로보스코피 (pump-probe stroboscopy) 측정방식이다[22,23]. 가시광 및 근적외선 레이저 펄스를 이용한 광여기 이후 자기광학 신호[5,24,25], X선[9,26] 또는 테라헤르츠 프로브[27-29]를 통해 스핀 동역학을 실시간으로 추적함으로써, 스핀, 전자, 격자 간 상호작용의 상대적인 시간 척도를 분리하여 분석할 수 있다. 최근 자유전자레이저(free electron laser) 기반 초고속 X선 광원기반 측정기법[30]은 원소선택성(element specificity) 및 고분해능을 갖춘 스핀 동역학 관측을 가능하게 하여 기존 광학 측정의 한계를 보완하고 있다.

초고속 스핀동역학에 대한 다양한 실험적 기법의 발전과 함께 이론적으로도 다양한 모델과 계산 기법이 제안되어 왔으나[31,32], 다양한 실험적 관측결과를 통합적이고 보편적으로 설명할 수 있는 미시 이론은 아직 확립되지 않았다고 볼 수 있다. 따라서 현재까지는 실험 결과에 기반한 현상론적 이해와 물질별 비교 분석이 여전히 중요한 역할을 수행하고 있으며, 이를 바탕으로 체계적 이론과 함께 스핀 제어 메커니즘에 대한 이해의 폭이 확장될 가능성이 크다.

본 리뷰 논문에서는 광여기에 의해 유도되는 초고속 스핀 동역학에 관한 주요 실험 연구에 대해 대표적인 측정 기법을 중심으로 정리하여 소개하고 이를 통해 다른 측정기법으로 측

정된 다양한 실험 결과들 사이의 공통점과 차이점을 비교하여 초고속 스핀트로닉스 연구를 위한 실험적 방법론을 정리하여 전달하고자 한다.

II. 본 론

1. 시간분해 자기광학 효과(Time-Resolved Magneto-Optical Kerr Effects)

시간분해 자기광학 Kerr 효과(time-resolved magneto-optical Kerr effect, TR-MOKE)는 광여기에 의해 유도되는 초고속 스핀 동역학을 연구하는 데 가장 널리 사용되는 실험 기법 중 하나이다. 이 기법은 펨토초 레이저 펄스 기반 펌프-프로브 스트로보스코피 방식으로 주로 박막시료의 자화 변화에 따른 편광 회전각 또는 타원을 변화를 시간 함수로 측정하여 초고속 스핀동역학 신호를 직접적으로 추적하는 것을 가능하게 한다.

John Kerr에 의해 1877년 발견된 자기광학 Kerr 효과는 반사된 빛의 편광 상태가 시료의 자화 방향에 따라 변화하는 현상으로, 자화의 법선(out-of-plane) 또는 면내(in-plane) 성분에 의존한다[33-35]. 반면 Faraday 효과는 투과된 빛의 편광 회전을 측정하며, 주로 투명한 자성 물질이나 박막 시료에서 활용된다. 시간분해 실험의 경우, 펌프 펄스에 의해 전자계가 비평형 상태로 여기된 이후, 프로브 펄스를 통해 Kerr 또는 Faraday 신호를 시간 지연에 따라 스트로보스코피 방법으로 측정함으로써, 탈자화(demagnetization), 재자화(remagnetization), 스핀세차운동과 같은 동역학적 과정을 펨토초 시간 분해능으로 관측할 수 있게 해준다(Fig. 1).

TR-MOKE 실험은 초고속 스핀 동역학 연구의 초기 단계에서 강자성 금속의 초고속 탈자화 현상을 규명하는 데 핵심적인 역할을 하였다[2]. 펨토초 레이저 조사 직후 수백 펨토초 이내에 자화가 급격히 감소하는 현상은, 스핀 계가 격자 및 전자 계와 비평형상태에서도 강하게 결합되어 있음을 시사하며, 스핀-궤도 결합을 통한 에너지 및 각운동량 전달 초고속 스케일 메커니즘에 대한 논의를 촉발시켰다. 이후 다양한 강자성체 및 합금 시스템에서 탈자화 및 재자화 시간 스케일 및 가역적/비가역적 탈자화/재자화에 대한 문제가 제기되기도 하였고, Fig. 2처럼 비평형상태의 비열적(non-thermal) 전자들이 초고속 스핀 동역학에 미치는 영향에 대한 의문이 제기되기도 하였다[25].

TR-MOKE 기법은 매우 높은 반복측정을 필요로 하는 스트로보스코피 측정법에 기반하고 있기 때문에 결맞은(coherent) 스핀 동역학을 관측하는 데 매우 효과적이다. 외부 자기장 하에서 광여기에 의해 유도된 비평형 상태는 스핀 세차운동을 여기하며, 이는 TR-MOKE 신호상의 감쇠 진동 형

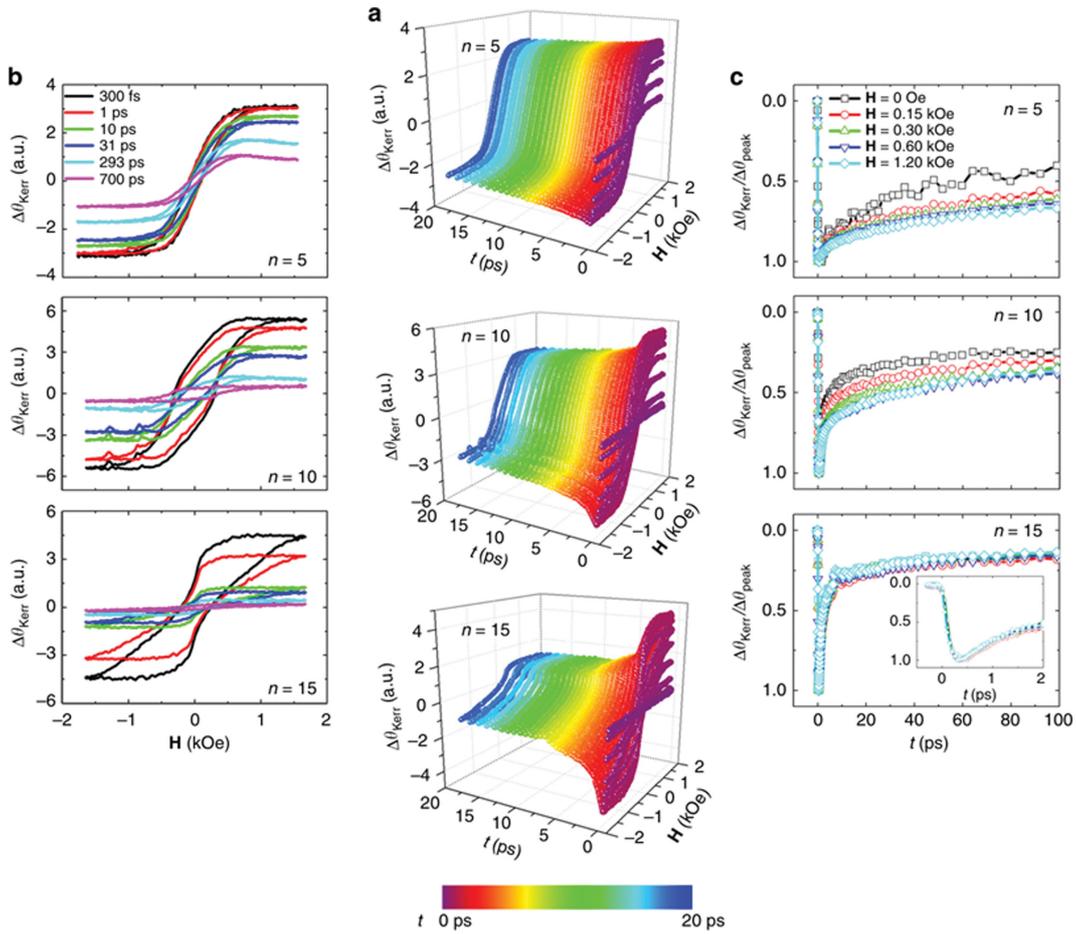


Fig. 1. (Color online) (a) Three-dimensional maps of time-resolved magnetic hysteresis loops measured by TR-MOKE for $[\text{Co}/\text{Pt}]_n$ multilayer thin films with $n = 5, 10,$ and 15 . The color scale at the bottom represents the time delay in the range of 0–20 ps. (b) Time-dependent magneto-optical Kerr hysteresis loops measured at different delay times ranging from 300 fs to 700 ps for $n = 5, 10,$ and 15 . (c) Representative TR-MOKE signals for $n = 5, 10,$ and 15 as a function of the applied external magnetic field. (Reproduced from Fig. 2 of Shim et al., Nature Communications 8, 796 (2017), CC BY 4.0) [5].

태로 나타난다. 이러한 신호 분석을 통해 감쇠 계수를 직접적으로 구할 수 있고, 유효 자기 이방성 및 스핀-격자 결합 강도에 대한 간접적 정보를 예측할 수 있다. TR-MOKE로 구한 감쇠 계수는 강자성공명(FMR: ferromagnetic resonance)에 의해 결정된 값과 비교될 수 있으며, 두 값이 항상 일치하지는 않는다[36]. TR-MOKE로 감쇠계수를 구할 때는 측정 신호를 지속적으로 진폭이 감소하는 사인과 진동함수로 맞추어 얻게 되는데, 시료내 불균일성 등으로 위상이 어긋나면서 나타나는 효과도 필연적으로 함께 따라오게 되어 이상적 상황보다 감쇠계수가 크게 측정될 수 있다. 또한, TR-MOKE의 경우 펨토초 레이저로 인한 광여기로 야기되는 자성시료 신호변화를 측정할 때 초반의 펨토초 영역 비평형 동역학이 개입되는 순간 간단히 해석하기 어려운 비선형 감쇠가 존재할 수 있다. 반면 FMR의 경우 마이크로파 영역의 주기적 여기에 의한 신호를 측정하게 되므로 TR-MOKE에서 보이는

비평형 동역학 효과는 상대적으로 크지 않지만, FMR 선폭 측정시 나타날 수 있는 마그논간 모드혼합 가능성을 고려해야 한다. 두 측정법 모두 시료의 불균일성에 영향을 받을 수 밖에 없다. 측정되는 시료의 범위도 TR-MOKE의 경우 수 nm 영역 시료 표면에 국한된 반면, FMR은 시료 전체에 해당한다고 볼 수 있어 두 측정법으로 얻어진 감쇠계수 비교는 종합적인 접근이 필요하다.

최근, 반강자성체 및 페리자성체에서는 광여기에 의해 테라헤르츠 주파수 대역의 스핀파 모드가 여기될 수 있음이 보고되었으며, 이는 기존 마이크로파 기반 자기 공명 기법으로는 접근하기 어려운 영역으로 THz 스핀트로닉스가 새롭게 각광받고 있다. 그러나, 자기광 Kerr 신호는 기본적으로 단순한 자화 변화뿐 아니라 전자 구조 변화나 광학 상수의 비자극적 변화와 중첩될 수 있어 신호 해석에 조심할 필요가 있다[4]. 이러한 이유로 TR-MOKE 기법을 새로운 물질계로 확장시켜

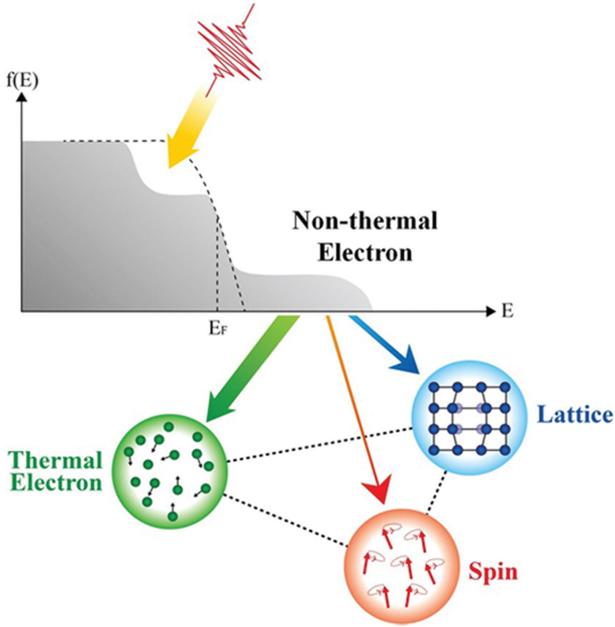


Fig. 2. (Color online) Schematic illustration of energy transfer mediated by nonthermal electrons. After excitation from the Fermi-Dirac distribution, nonthermal electrons transfer energy to the thermal electron, lattice, and spin subsystems. (Reproduced from Fig. 1 of Shim et al., Scientific Reports 10, 6355 (2020), CC BY 4.0) [5].

적용할 때 특별한 주의가 필요하다.

TR-MOKE/TR-Faraday 기법의 주요 장점은 실험 구성의 상대적 단순성, 높은 시간 분해능, 그리고 다양한 물질계에 대한 폭넓은 적용 가능성에 있다. 반면, 측정되는 신호가 공간적으로 평균되고 알짜 자화량에만 의존하며, 원소 선택성이 부족하다는 한계가 존재한다. 그리고 상기했듯이 광학적 신호가 전자 및 격자 기여와 혼합될 수 있어 정량적 해석을 위해서는 보조 실험이나 구체적인 이론적 모델링이 요구될 수 있다. 이러한 한계에도 불구하고, TR-MOKE는 여전히 초고속 스핀 동역학 연구의 기본적 기법으로서 중요한 위치를 차지하고 있다.

2. 시간분해 X선 자기 원형 이색성(Time-Resolved X-ray Magnetic Circular Dichroism, TR-XMCD)

시간분해 X선 자기 원형 이색성(time-resolved X-ray magnetic circular dichroism, TR-XMCD)은 광여기에 의해 유도되는 초고속 스핀 동역학을 원소 선택적(element-specific)으로 관측할 수 있는 강력한 실험 기법이다. XMCD는 원형 편광된 X선의 흡수 계수가 시료의 자화 방향에 따라 달라지는 현상을 이용한다. 이를 위해 주로 방사광가속기의 방사광 X선을 광원으로 사용한다. 특정 원소의 흡수예지(absorption edge)에서 신호를 측정함으로써 해당 원소의 스핀 및 궤도 자기 모멘트를 정량적이고 독립적으로 구할 수 있다[37]. TR-

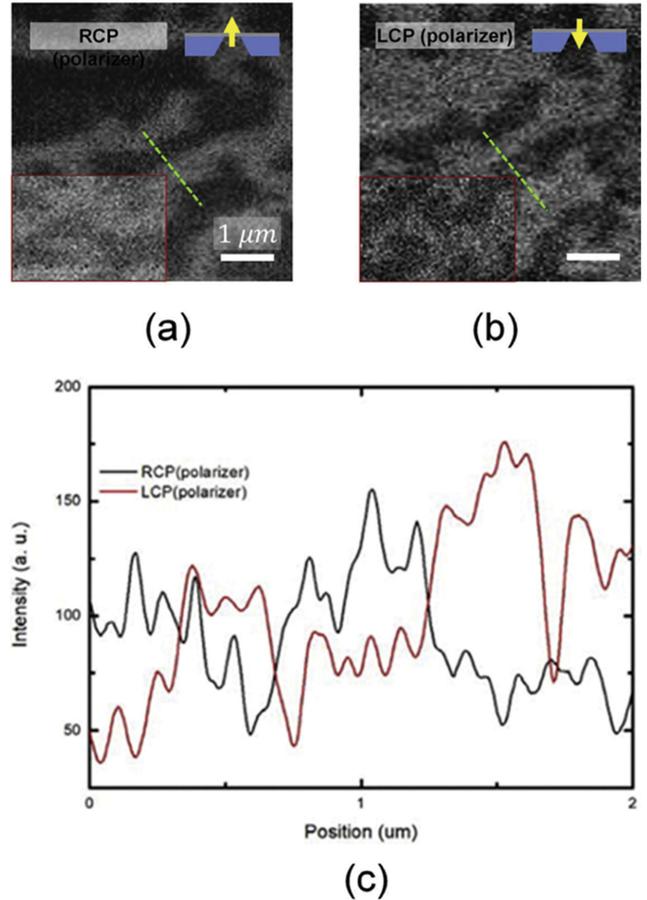


Fig. 3. (Color online) Magnetic domain images of Co/Pt multilayer thin films acquired using (a) right circularly polarized (RCP) and (b) left circularly polarized (LCP) X-rays generated by a polarizer. (c) Line profiles obtained along the green dashed line for the RCP and LCP cases. (Adapted from Fig. 3 of Lee et al., Current Applied Physics 18, 1196 (2018)) [39].

XMCD는 XMCD 기반 신호를 펌프-프로브 스트로보스코피 기법에 기반하여 측정을 진행한다. 많은 경우 펌프는 펨토초 레이저 펄스, 프로브는 방사광 X선 펄스가 되고, 펌프 펄스에 의해 여기된 탈자화 및 재자화 과정에서 변화하는 XMCD 신호를 측정하게 된다. 일반적인 3세대 방사광 가속기의 경우 수백 MHz의 방사광 X선 펄스 반복률로 인해, 스트로보스코피 시간 윈도우가 수 ns에 불과하다. 이 때문에 기본적인 방사광가속기 셋업보다는 few-bunch 모드[9,26]나 femto-slicing[38] 기법과 결합하여 적용되는 경우가 많다. 이러한 시간분해 측정기법과 결합되어 TR-XMCD는 다성분 자성체나 다층 구조에서의 초고속 스핀 동역학을 규명하는 데 핵심적인 역할을 수행하고 있다. 3세대 방사광가속기 뿐 아니라 4세대 자유전자레이저(free-electron laser, FEL) 기반 방사광가속기에서도 XMCD 측정이 가능하므로 [30], 3세대의 피코초 시간스케일이 아닌 4세대의 펨토초 시간스케일에서도 TR-

XMCD 측정이 가능하다. 4세대 가속기의 경우 원형/타원 편광 X선 생성이 어려울 수도 있는데, 이 경우는 Fig. 3과 같이 자성박막으로 구성된 투과형 원편광 생성장치를 사용할 수 있다[39].

TR-XMCD의 가장 중요한 장점은 원소별 스핀 동역학을 분리하여 측정할 수 있다는 점이다. 예를 들어, 전이금속-희토류 합금이나 페리자성체에서는 서로 다른 원소 서브격자가 상이한 시간 스케일로 탈자화되는 현상이 보고되었다[40]. 이러한 결과는 스핀 각운동량이 단일 열저장소(heat reservoir)로 즉각적으로 소산되지 않으며, 원소별 전자 구조와 스핀-궤도 결합 강도에 따라 비동시적으로 재분배됨을 시사하며 광유도 탈자화 메커니즘에 대한 기존의 단순화된 모델을 재검토하게 만드는 중요한 실험적 근거를 제공하였다.

또한 XMCD 합규칙(sum rule)[37,41]을 이용하면 스핀 자기 모멘트와 궤도 자기 모멘트를 분리하여 정량적 결정을 할 수 있어, 초고속 과정에서 이들 두 자유도가 어떻게 상호작용하는지를 추적할 수 있다. 일부 실험에서는 광여기 직후 궤도 모멘트가 스핀 모멘트보다 빠르게 변화하거나, 일시적으로 궤도 모멘트가 증가하는 현상이 관측되었으며[38,42], 이는 스핀-궤도 결합을 통한 각운동량 전달이 펨토초 비평형 시간스케일에서 매우 중요한 역할을 한다는 것을 직접적으로 보여주는 결과로 해석된다.

TR-XMCD는 또한 다층 박막 및 계면 구조에서의 초고속 스핀 동역학 연구에 유용하다. 서로 다른 자성층 또는 자성-비자성 계면에서 발생하는 스핀 전류, 계면 혼성화 효과, 그리고 층간 교환 결합의 시간적 진화를 원소 선택적으로 추적함으로써, 스핀 수송과 국소 자화 동역학 간의 관계를 규명할 수 있다. 이러한 연구는 초고속 스핀트로닉 소자의 작동 원리를 이해하는 데 중요한 실험적 기반을 제공할 수 있다. 반면 TR-XMCD 기법은 대형 가속기 기반 X선 광원을 필요로 하여 제한된 빔타임과 few-bunch 모드나 femto-slicing 모드의 낮은 반복률 및 SNR로 인해 많은 경우 충분한 실험 시간을 갖기 어렵다는 한계를 지닌다. 그럼에도 불구하고, TR-XMCD는 원소 선택성과 합규칙에 기반한 스핀 및 궤도 모멘트의 정량 결정이라는 독보적인 장점을 바탕으로, TR-MOKE와 상호보완하며 보다 근본적인 이해를 가능하게 해주는 초고속 스핀 동역학 연구분야의 주요 실험 기법으로 자리매김하고 있다.

3. THz 방출 분광법(Terahertz Emission Spectroscopy)

THz 방출 분광법(terahertz emission spectroscopy)은 광여기에 의해 생성되는 초고속 스핀 전류 및 전하 전류를 테라헤르츠(THz) 전자기와 방출로 변환하여 검출하는 실험 기법으로, 최근 초고속 스핀 동역학 연구에서 빠르게 주목받고 있

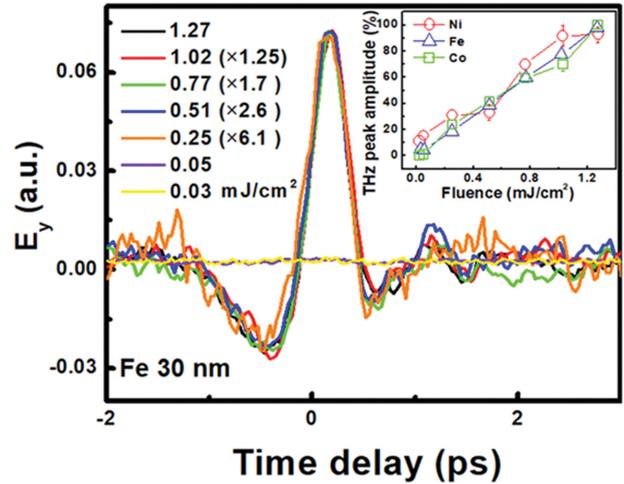


Fig. 4. (Color online) THz signals emitted from an Fe thin film at various pump fluences. The inset shows the THz peak amplitude as a function of fluence for Ni, Fe, and Co thin films. (Reproduced from Fig. 4 of Lin et al., Scientific Reports 10, 15843 (2020), CC BY 4.0) [28].

다. 이 기법은 펨토초 레이저 펄스에 의해 유도된 비평형 전하 및 스핀 수송 현상을 비접촉 방식으로 관측할 수 있다는 점에서 기존의 자기광학 측정과 구별되는 의미 있는 실험적 정보를 제공한다.

일반적인 실험 구성에서는 자성층/비자성층 이중 구조 또는 다층 박막 시료에 펨토초 레이저 펄스를 조사하며 생성된 초고속 비평형 상태에서 다양한 메커니즘으로 방출되는 THz 파를 검출한다[27]. THz는 기본적으로 전자기파로서 피코초 이하의 시간스케일에서 발생하는 전자기적 이벤트(전하를 띤 입자의 가속)가 존재하면 필연적으로 존재해야 한다. 광여기 초고속 스핀동역학에서 나타나는 대부분의 탈자화/재자화의 시간스케일이 이에 해당하기 때문에[14] THz 파가 방출될 가능성이 있으며, 실제로 Fig. 4에서 보여지는 바와 같이 30-nm 수준의 두꺼운 강자성 박막의 경우 Co, Fe, Ni 원소 특성과 상관없이 THz 방출이 관측된다[28].

그러나 자성체에서 광여기에 의해 THz 파가 방출되는 메커니즘은 상당히 다양하게 존재한다. 예를 들어, 자성층 내부 또는 계면에서 생성된 스핀 분극 전류가 비자성층으로 주입되며, 강한 스핀-궤도 결합을 갖는 비자성 금속층에서는 역스핀 홀 효과(ISHE: inverse spin Hall effect)에 의해 순간적인 전하 전류로 변환된다. 이 초고속 전하 전류는 전자기 복사로서 THz 파를 방출하며 두께가 상대적으로 얇은 박막 시료의 경우 탈자화/재자화에 의한 보편적 THz 방출신호보다 일반적으로 큰 THz 파 신호를 방출한다. 다양한 메커니즘에 의해 발생하는 THz 파는 그 기여도를 어느정도 정량적으로 구별할 수 있는데, 가장 간단한 방법은 시료를 뒤집으며 시

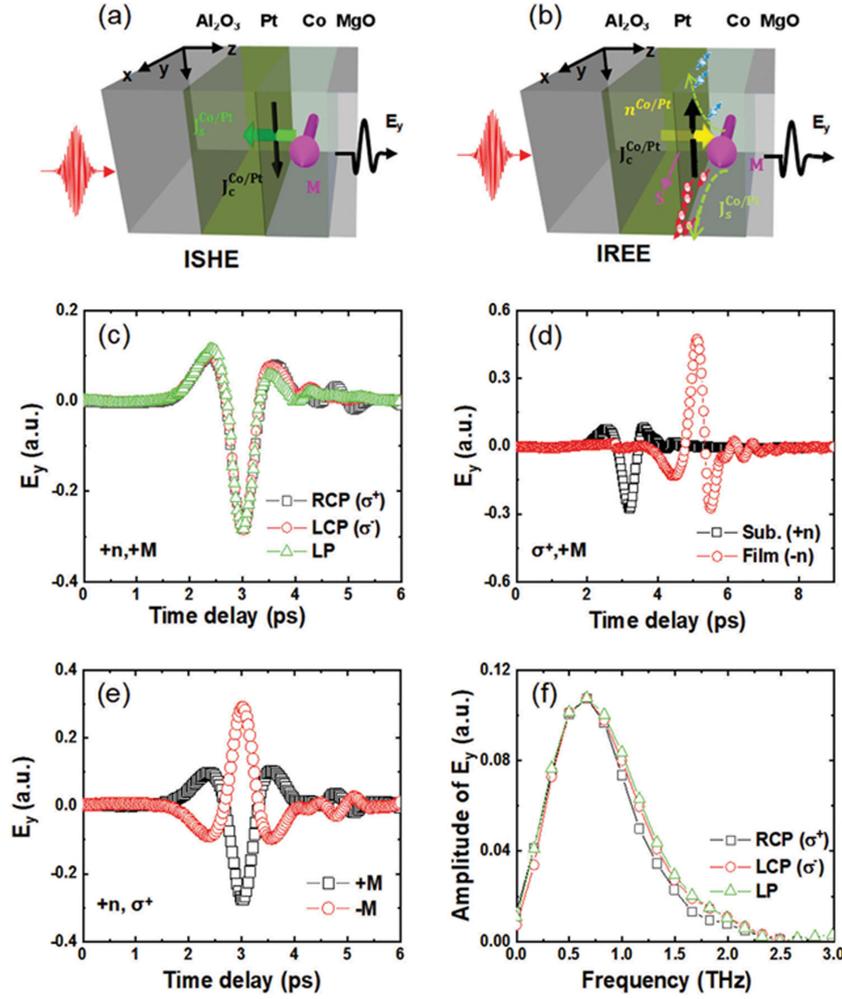


Fig. 5. (Color online) (a) Schematic illustration of the inverse spin Hall effect (ISHE) and (b) the inverse Rashba-Edelstein effect (IREE) mechanisms. (c) Representative THz emission signals generated by left circularly polarized (LCP), right circularly polarized (RCP), and linearly polarized (LP) pump pulses under the $+M$ and $+n$ conditions. (d) Emitted THz signals under RCP (σ^+) excitation and the $+M$ condition for pump incidence from the substrate ($+n$) and thin-film ($-n$) sides. (e) THz signals measured as a function of magnetization reversal ($+M$ and $-M$) under the $+n$ and σ^+ conditions. (f) Fast Fourier transform (FFT) spectra of the emitted THz waves measured for LCP, RCP, and LP pump excitations. (Adapted from Fig. 4 of Zhao et al., *Advanced Optical Materials* 12, 2302571 (2024)) [15].

료 양면을 각각 펨토초 레이저 펄스를 조사하는 것이다. 이 경우, 보편적 탈자화에 의해 방출되는 THz 파는 외부자기장을 고정시키면 시료 뒤집기에 대칭적이지만, ISHE에 의해 방출되는 THz 파는 시료를 뒤집으면서 스핀전류의 방향 또한 뒤집히게 되어 시료뒤집기에 대해 반대칭 신호를 보이게 된다. ISHE 이외에도 역 라쉬바 에델스타인 효과(IREE: inverse Rashba Edelstein effect) 및 역 스핀궤도 토크(ISOT: inverse spin-orbit torque) 등의 다양한 스핀전류와 연관된 THz 방출 메커니즘이 존재할 수 있으며, 시료 뒤집기와 함께, 펨프 펄스의 편광, 외부자기장 방향 등을 함께 조절하여 Fig. 5와 같이 각 메커니즘별 방출되는 THz 파 신호를 분리해 낼 수 있다[15,29].

THz 방출 분광법의 가장 큰 특징은 스핀 전류의 시간적

프로파일을 직접적으로 반영하는 신호를 제공한다는 점이다. 방출된 THz 전기장 파형은 펨토초 시간 분해능으로 스핀 전류의 생성, 전달, 소멸 과정을 포함하며, 이를 통해 스핀 수송의 비평형 동역학을 정밀하게 분석할 수 있는 채널을 제공한다. 특히 THz 신호의 위상과 편광 특성은 스핀 전류의 방향과 크기에 대한 정보를 제공하므로, 계면 효과나 층간 구조에 따른 차이를 체계적으로 비교하는 데 유용할 것으로 기대된다. THz 측정기법은 금속 기반 초고속 스핀 시스템 연구에서 중요한 역할을 수행하고 있다. 최근, 페리자성체 및 반강자성체 기반 구조에서도 효율적인 THz 방출이 보고되면서 [16,17], 알짜 자화량이 매우 작거나 없는 시스템에서도 초고속 스핀 수송이 가능성이 실험적으로 입증되었다.

최근에는 테라헤르츠 방출 분광법이 단순한 측정 기법을 넘

Table I. Major experimental techniques for ultrafast spin dynamics.

실험 기법	주요 관측 물리량	원소 선택성	장점	한계
TR-MOKE	자화 M(t), 스핀세차운동	×	간단한 구성, 높은 SNR	원소 평균, 정량성 제한
Time-resolved XMCD	스핀-궤도 자기모멘트	○	원소 선택성, 정량 분석	대형 시설 필요
THz emission spectroscopy	초고속 스핀 전류	△	스핀 전류 탐지	해석 모델 의존

이 스핀트로닉 THz 방출 소자(spintronic THz emitter) 개발로 확장되고 있다. 물질 조합, 두께, 계면 품질을 최적화함으로써 넓은 대역폭과 높은 출력의 THz 방출이 가능함이 보고되었으며[13], 이는 초고속 스핀 동역학 연구와 응용 간의 연결 고리를 제공한다. 이러한 연구는 스핀 전류의 생성 메커니즘을 이해하는 데 실험적 기준을 제시하는 동시에, 실용적인 초고속 광-스핀 변환 소자로의 가능성을 보여준다. 그러나 테라헤르츠 방출 분광법은 자화 자체를 측정하는 것이 아닌 스핀 및 전하 전류 또는 자화량의 초고속 변화에 민감하다는 점에서, 측정 신호의 해석이 다소 간접적이라는 한계를 지닌다. 방출된 THz 신호는 시료의 광학 상수, 전기 전도도, 계면 투과도 등 다양한 요소에 영향을 받으므로, 정량적 분석을 위해서는 보조 실험이나 모델링이 필요할 수 있다. 그럼에도 불구하고, 이 기법은 초고속 스핀 전류 동역학을 실시간으로 관측할 수 있는 주요한 실험적 수단으로서, 자기광학 및 X선 기반 기법과 상호보완적 위치를 차지하고 있다.

III. 요약

본 리뷰에서는 광역기 초고속 스핀 동역학 메커니즘을 규명하기 위해 활용되는 주요한 최신 실험 기법들을 정리하였다. 이러한 기법으로 스핀, 전자, 격자 비평형 상태의 실시간 관측이 가능하게 되었고, 이를 통해 초고속 스핀 현상에 대한 실험적 이해가 크게 진전될 수 있었다. 시간분해 자기광학 효과, 시간분해 X선 자기 원형 이색성, THz 방출 분광법 등 대표적인 측정기법을 정리해 보았고 그 요약은 Table I과 같다.

광역기 초고속 스핀 동역학에 대한 심층적인 이해는 단일 실험 기법보다는 다양한 실험적 접근과 실험-이론 간의 긴밀한 협력이 필수적이다. 향후 높은 시간/공간-에너지 분해능 측정 기법의 발전은 비평형 스핀 현상의 미시적 메커니즘을 보다 정량적으로 규명할 수 있는 길을 열어줄 것으로 기대되며 이는 초고속 스핀트로닉스 및 THz 기능성 소자 구현을 향한 중요한 발판이 될 것이다.

감사의 글

이 논문은 2024학년도 충북대학교 학술연구영역 사업의 연

구비 지원에 의하여 연구되었음. 본 논문은 2025년도 교육부 및 충청북도의 재원으로 충북RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과임(2025-RISE-11-014-05). 이 논문은 2024학년도 충북대학교 연구년제 지원에 의하여 연구되었음.

References

- [1] A. Kirilyuk, A. V. Kimel, and T. Rasing, *Rev. Mod. Phys.* **82**, 2731 (2010).
- [2] E. Beaurepaire, J.-C. Merle, A. Daunois, and J.-Y. Bigot, *Phys. Rev. Lett.* **76**, 4250 (1996).
- [3] J.-Y. Bigot, M. Vomir, and E. Beaurepaire, *Nat. Phys.* **5**, 515 (2009).
- [4] B. Koopmans, G. Malinowski, F. Dalla Longa, D. Steiauf, M. Fähnle, T. Roth, M. Cinchetti, and M. Aeschlimann, *Nat. Mater.* **9**, 259 (2010).
- [5] J.-H. Shim, A. A. Syed, C.-H. Kim, K. M. Lee, S.-Y. Park, J.-R. Jeong, D.-H. Kim, and D. E. Kim, *Nat. Commun.* **8**, 796 (2017).
- [6] Y.-G. Choi, D. Jo, K.-H. Ko, D. Go, K.-H. Kim, H. G. Park, C. Kim, B.-C. Min, G.-M. Choi, and H.-W. Lee, *Nature* **619**, 52 (2023).
- [7] C. Stamm, T. Kachel, N. Pontius, R. Mitzner, T. Quast, K. Holdack, S. Khan, C. Lupulescu, E. F. Aziz, M. Wietstruk, H. A. Dürr, and W. Eberhardt, *Nat. Mater.* **6**, 740 (2007).
- [8] B. Pfau, S. Schaffert, L. Müller, C. Gutt, A. Al-Shemmary, F. Büttner, R. Delaunay, S. Düsterer, S. Flewett, R. Frömter, J. Geilhufe, E. Guehrs, C. M. Günther, R. Hawaldar, M. Hille, N. Jaouen, A. Kobs, K. Li, J. Mohanty, H. Redlin, W. F. Schlottter, D. Stickler, R. Treusch, B. Vodungbo, M. Kläui, H. P. Oepen, J. Lüning, G. Grübel, and S. Eisebitt, *Nat. Commun.* **3**, 1100 (2012).
- [9] B. L. Mesler, P. Fischer, W. Chao, E. H. Anderson, and D.-H. Kim, *J. Vac. Sci. Technol. B* **25**, 2598 (2007).
- [10] H.-S. Han, S. A. Montoya, E. E. Fullerton, W. Chao, S.-G. Je, K.-S. Lee, and M.-Y. Im, *NPG Asia Mater.* **16**, 9 (2024).
- [11] T. Kampfrath, M. Battiato, P. Maldonado, G. Eilers, J. Nötzold, S. Mährlein, V. Zbarsky, F. Freimuth, Y. Mokrousov, S. Blügel, M. Wolf, I. Radu, P. M. Oppeneer, and M. Münzenberg, *Nat. Nanotechnol.* **8**, 256 (2013).
- [12] J. Walowski and M. Münzenberg, *J. Appl. Phys.* **120**, 140901 (2016).
- [13] T. Seifert, S. Jaiswal, U. Martens, J. Hannegan, L. Braun, P.

- Maldonado, F. Freimuth, A. Kronenberg, J. Henrizi, I. Radu, E. Beaurepaire, Y. Mokrousov, P. M. Oppeneer, M. Jourdan, G. Jakob, D. Turchinovich, L. M. Hayden, M. Wolf, M. Münzenberg, M. Kläui, and T. Kampfrath, *Nat. Photon.* **10**, 483 (2016).
- [14] L. Huang, J.-W. Kim, S.-H. Lee, S.-D. Kim, V. M. Tien, K. P. Shinde, J.-H. Shim, Y. Shin, H. J. Shin, S. Kim, J. Park, S.-Y. Park, Y. S. Choi, H.-J. Kim, J.-I. Hong, D. E. Kim, and D.-H. Kim, *Appl. Phys. Lett.* **115**, 142404 (2019).
- [15] Y. Zhao, A. Gayen, L. Huang, X. You, N. L. Thi, Q. Mustaghfiroh, F. Rahmani, P. V. Gaikwad, P. D. H. Yen, J.-H. Shim, D. E. Kim, H. J. Shin, J. Park, C. Wan, O. Xiang, H.-G. Piao, K.-H. Kim, J. Bang, H. S. Lee, K. W. Kim, and D.-H. Kim, *Adv. Opt. Mater.* **12**, 2302571 (2024).
- [16] T. Jungwirth, X. Marti, P. Wadley, and J. Wunderlich, *Nat. Nanotechnol.* **11**, 231 (2016).
- [17] A. V. Kimel and M. Li, *Nat. Rev. Mater.* **4**, 189 (2019).
- [18] I. Radu, K. Vahaplar, C. Stamm, T. Kachel, N. Pontius, H. A. Dürr, T. A. Ostler, J. Barker, R. F. L. Evans, R. W. Chantrell, A. Tsukamoto, A. Itoh, A. Kirilyuk, Th. Rasing, and A. V. Kimel, *Nature* **472**, 205 (2011).
- [19] B. Huang, G. Clark, E. Navarro-Moratalla, D. R. Klein, R. Cheng, K. L. Seyler, D. Zhong, E. Schmidgall, M. A. McGuire, D. H. Cobden, W. Yao, D. Xiao, P. Jarillo-Herrero, and X. Xu, *Nature* **546**, 270 (2017).
- [20] D. Hsieh, D. Qian, L. Wray, Y. Xia, Y. S. Hor, R. J. Cava, and M. Z. Hasan, *Nature* **452**, 970 (2008).
- [21] J. Orenstein and A. J. Millis, *Science* **288**, 468 (2000).
- [22] M. J. Gomez; K. Liu, J. G. Lee, and R. B. Wilson, *Rev. Sci. Instrum.* **91**, 023905 (2020).
- [23] K.-D. Lee, J.-W. Kim, J.-W. Jeong, D.-H. Kim, S.-C. Shin, K.-H. Hong, Y. S. Lee, C. H. Nam, M. H. Son, and S. W. Hwang, *J. Kor. Phys. Soc.* **49**, 2402 (2006).
- [24] C. H. Kim, J.-H. Shim, K. M. Lee, J.-R. Jeong, D.-H. Kim, D. E. Kim, *Sci. Rep.* **6**, 22054 (2016).
- [25] J.-H. Shim, A. A. Syed, J.-I. Kim, H.-G. Piao, S.-H. Lee, S.-Y. Park, Y. S. Choi, K. M. Lee, H.-J. Kim, J.-R. Jeong, J.-I. Hong, D. E. Kim, and D.-H. Kim, *Sci. Rep.* **10**, 6355 (2020).
- [26] J.-H. Shim, D.-H. Kim, B. Mesler, J.-H. Moon, K.-J. Lee, E. Anderson, and P. Fischer, *J. Appl. Phys.* **107**, 09D302 (2010).
- [27] D.-H. Kim, *J. Kor. Mag. Soc.* **35**, 291 (2023).
- [28] L. Huang, S.-H. Lee, S.-D. Kim, J.-H. Shim, H. J. Shin, S. Kim, J. Park, S.-Y. Park, Y. S. Choi, H.-J. Kim, J.-I. Hong, D. E. Kim, and D.-H. Kim, *Sci. Rep.* **10**, 15843 (2020).
- [29] J.-H. Shim, Y. Zhao, Q. Mustaghfiroh, N. L. Thi, F. Rahmani, K. Kim, H. J. Shin, J. Park, X. You, C. Wan, M.-S. Jung, J.-I. Hong, H.-G. Piao, X. Han, and D.-H. Kim, *Adv. Opt. Mater.* e03272 (2025). (<https://doi.org/10.1002/adom.202503272>)
- [30] S. H. Park, J. Yoon, C. Kim, C. Hwang, D.-H. Kim, S.-H. Lee, and S. Kwon, *J. Synch. Rad.* **26**, 1 (2019).
- [31] M. Battiato, K. Carva, and P. M. Oppeneer, *Phys. Rev. Lett.* **105**, 027203 (2010).
- [32] P. M. Oppeneer and A. Liebsch, *J. Phys.: Condens. Matter* **23**, 013001 (2011).
- [33] J. Kerr, *Phil. Mag.* **3**, 321 (1877).
- [34] J. Kerr, *Phil. Mag.* **5**, 161 (1878).
- [35] P. Weinberger, *Phil. Mag.* **88**, 897 (2008).
- [36] D.-H. Kim, H.-H. Kim, C.-Y. You, and H. Kim, *J. Magnetism* **16**, 206 (2011).
- [37] G. Schütz, E. Goering, and H. Stoll, *Handbook of Magnetism and Advanced Magnetic Materials: Synchrotron Radiation Techniques Based on X-ray Magnetic Circular Dichroism*, WILEY (2007).
- [38] C. Boeglin, E. Beaurepaire, V. Halté, V. López-Flores, C. Stamm, N. Pontius, H. A. Dürr, and J.-Y. Bigot, *Nature* **465**, 458 (2010).
- [39] S.-H. Lee, L. Huang, J.-W. Lee, N. Kim, H.-J. Shin, J.-R. Jeong, C. Hwang, and D.-H. Kim, *Curr. Appl. Phys* **18**, 1196 (2018).
- [40] N. Bergeard, V. López-Flores, V. Halté, M. Hehn, C. Stamm, N. Pontius, E. Beaurepaire, and C. Boeglin, *Nat. Commun.* **5**, 3466 (2014).
- [41] B. T. Thole, P. Carra, F. Sette, and G. van der Laan, *Phys. Rev. Lett.* **68**, 1943 (1992).
- [42] I. Radu, C. Stamm, A. Eschenlohr, F. Radu, R. Abrudan, K. Vahaplar, T. Kachel, N. Pontius, R. Mitzner, K. Holldack, A. Föhlisch, T. A. Ostler, J. H. Mentink, R. F. L. Evans, R. W. Chantrell, A. Tsukamoto, A. Itoh, A. Kirilyuk, A. V. Kimel, and Th. Rasing, *SPIN* **5**, 1550004 (2015).