

## Spin-Orbit Torque Based on Orbital-to-Spin Conversion

Woojin Kim<sup>†</sup>, Gunwoo Jung<sup>†</sup>, Daeun Woo, Seongjong Yoon, and Soogil Lee\*

Department of Semiconductor Engineering, Gachon University, Seongnam 13120, Korea

(Received 16 June 2025, Received in final form 1 July 2025, Accepted 1 July 2025)

Spin-orbit torque, which utilizes spin angular momentum generated in non-magnetic materials or non-magnet/ferromagnet interfaces to switch magnetization, has been widely employed in various spintronic devices, including magnetic random-access memory. To further enhance the efficiency of spin-orbit torque, magnetization switching using orbital angular momentum has recently attracted considerable attention. In this review, we introduce the generation mechanism of spin-orbit torque induced by orbital angular momentum and orbital-to-spin conversion, referred to as orbital torque, and summarize recent experimental results on orbital torque observed in various materials.

**Keywords :** Orbital current, Orbital torque, Orbital to spin conversion, Spin current, Spin-orbit torque

## 오비탈-스핀 전환기반 스핀 궤도 토크

김우진<sup>†</sup> · 정건우<sup>†</sup> · 우다은 · 윤성종 · 이수길\*

가천대학교 반도체공학과, 성남시 수정구 성남대로 1342, 13120

(2025년 6월 16일 받음, 2025년 7월 1일 최종수정본 받음, 2025년 7월 1일 게재확정)

스핀 궤도 토크는 비자성체 혹은 비자성체/강자성체 계면에서 발생하는 스핀 각운동량을 이용해 자화를 스위칭하는 방법으로 스핀트로닉 소자들에 널리 이용되고 있다. 스핀 궤도 토크의 효율을 더욱 키우기 위해 오비탈 각운동량을 이용한 자화 스위칭 방법이 최근 크게 주목받고 있다. 본 논문은 오비탈 각운동량 및 오비탈-스핀 전환을 이용한 스핀 궤도 토크 즉, 오비탈 토크의 발생 원리와 최근 보고되고 있는 다양한 물질에서의 오비탈 토크 실험 결과들을 소개하고자 한다.

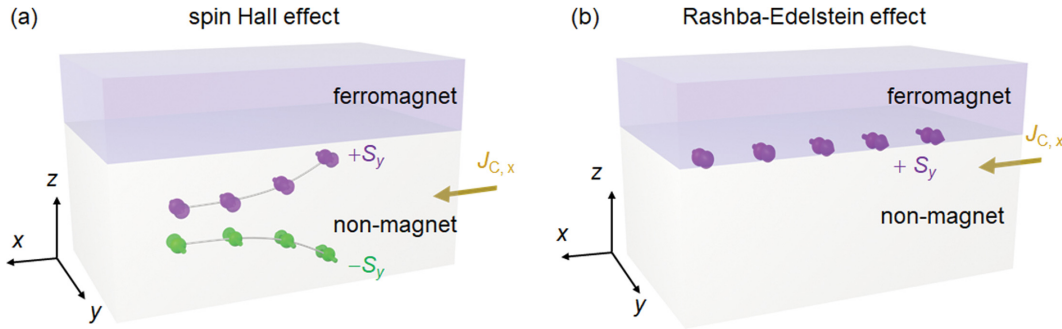
**주제어 :** 오비탈 전류, 오비탈 토크, 오비탈-스핀 전환, 스핀 전류, 스핀 궤도 토크

### I. 서 론

전자가 지닌 고유한 양자역학적 성질인 스핀(spin)을 이용하는 스핀트로닉스(spintronics)는 강자성체(ferromagnet)의 자화 방향(magnetization direction)을 활용해 정보를 처리 및 저장하는 기술이다[1,2]. 스핀트로닉 소자에서 정보의 제어 즉, 자화 방향의 스위칭은 스핀 각운동량(spin angular momentum)의 흐름인 스핀 전류(spin current)를 자성체에 주입해 스핀 각운동량을 자화에 전달함으로써 이루어진다. 이러한 자화 전환에는 대표적으로 스핀 전달 토크(spin-transfer torque, STT) 방식[3]과 스핀 궤도 토크(spin-orbit torque, SOT) 방식이 있

다[4-7]. STT는 자성층에 전하 전류(charge current)를 인가하여, 스핀 전류를 발생시키고 이를 다른 자성층에 주입해 자화 방향을 전환하는 방식이다. 이와 다르게 SOT는 비자성층(non-magnetic layer)에 전하 전류를 흘려 생성된 스핀 전류를 자성층에 전달함으로써 자화를 제어한다.

SOT의 스핀 전류 생성 메커니즘은 스핀 홀 효과(spin Hall effect, SHE)와 라쉬바-에델슈타인 효과(Rashba-Edelstein effect, REE)가 있다[6,7]. 첫 번째로, SHE는 스핀-궤도 결합(spin-orbit coupling, SOC)이 강한 비자성체(non-magnet)에서 크게 나타나는 현상이다. SHE는 Fig. 1(a)와 같이 층 내부를 따라 수평( $x$  축) 방향으로 전하 전류( $J_{c,y}$ )가 흐를 때, 전자의 스핀 방향( $y$  축)이 분극된 스핀 전류가 수직( $z$  축) 방향으로 형성된다. 두 번째로, REE는 반전 대칭(inversion symmetry)이 깨진 이중층(bilayer) 계면(interface)에서 발생한다. REE는 Fig. 1(b)와 같이 수평 방향( $x$  축)으로 전류가 흐르면, 계면의



**Fig. 1.** (Color online) Schematics of (a) spin Hall effect and (b) Rashba-Edelstein effect in conventional non-magnet/ferromagnet bilayers.  $J_{C,x}$  denotes the charge current along the  $x$ -axis, and  $\pm S_y$  represents spin angular momentum along the  $y$ -axis. The purple and green arrows in the non-magnet or at the non-magnet/ferromagnet interface indicate spin angular momentum.

구조적 비대칭성에 의해  $y$  축 방향의 스핀 분극(spin polarization)이 유도되며, 이는 계면에 축적(accumulation)되고 자화와 반응해 SOT를 인가한다. 효율적인, 즉 SOT가 큰 소자를 구현하기 위해서는 SOC가 강한 중금속(heavy metal, Pt, W, Ta 등)이나, 큰 비대칭 전위 분포를 갖는 이종접합(heterostructure) 계면이 주로 활용되고 있다. 최근에는 위상 절연체(topological insulator), 바일준금속(Weyl semimetal) 등 다양한 재료 시스템에서도 큰 스핀 전류 발생 및 이에 따른 큰 SOT가 활발히 연구되고 있다[4-11]. 한 가지 추가로 언급할 점은 스핀 전류 스핀 분극의 방향( $\pm y$ )은 비자성체의 SOC 부호에 따라 달라질 수 있다. 나아가 최근 결정구조의 대칭성, 계면에서의 스핀세차(precession) 등에 따라  $y$  방향 외에  $\pm x$ ,  $\pm z$  방향의 분극을 갖는 스핀 전류 생성이 가능하다는 것도 보고되고 있다[7,8].

STT와 비교했을 때 SOT는 강자성층에 직접 전류를 인가하지 않고, 비자성층에서 생성된 스핀 전류를 자성층에 전달해 자화를 제어하기 때문에 STT 방식보다 소자 내구성이나 수직 자화( $\parallel z$ )에 수직한 방향의 스핀 분극( $\parallel y$ )을 가진 스핀 전류 인가를 바탕으로 빠른 자화 전환 속도를 가지며, 강자성체 외에도 반강자성체(antiferromagnet)나 준강자성체(ferrimagnet) 등 다양한 자성체에 토크를 인가할 수 있는 자유도가 있다[12,13]. 이러한 장점들로 인해 고속-저전력 자성메모리(magnetic random-access memory, MRAM) 개발에 적합하다는 점에서 SOT는 학계뿐만 아니라 산업계에서도 주목받고 있다[7,14].

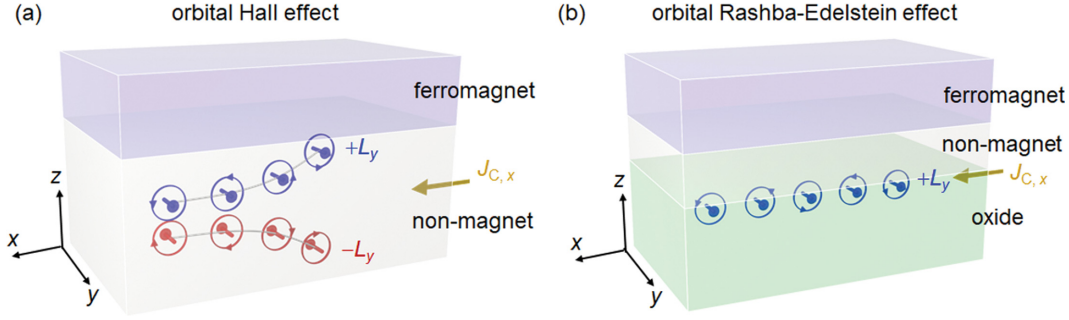
하지만 STT 대비 여전히 다소 높은 스위칭 전류 밀도와 실제 MRAM에 응용되기 위해 반도체 공정과의 정합성(compatibility)을 고려할 때 비롯되는 비자성체 재료 선택의 제약 등의 과제가 남아 있기에 이를 해결하기 위한 새로운 물리적 메커니즘과 재료군에 대한 연구가 지속되고 있다. 그 중 하나로 최근 전자의 오비탈 각운동량(orbital angular momentum)이 스핀 각운동량에 비해 훨씬 더 큰 각운동량을

생성할 수 있다는 이론이 제시되면서 스핀 각운동량이 아닌 오비탈 각운동량을 활용한 접근이 주목받고 있다[15-20]. 오비탈 전류(orbital current)는 오비탈 각운동량의 흐름으로, 스핀 전류로 자화를 제어하는 SOT와 유사하게 전하 전류에 의해 유도된 오비탈 전류를 자성체에 주입하여 자화에 토크를 인가하고 자화를 제어할 수 있으며 이를 오비탈 토크(orbital torque, OT)라고 한다. 본 논문에서는 OT 발생 원리와 자화 제어를 위해 필요한 오비탈-스핀 전환(orbital-to-spin conversion) 과정에 대한 소개 및 최근 연구동향을 정리하고자 한다. 또한, 지금까지 보고된 다양한 실험 결과를 바탕으로 저전력 스핀 트로닉 소자 구현을 위한 효율적인 OT 발생을 위해 고려해야 할 요소들을 정리하고자 한다.

## II. 오비탈 토크: 오비탈 전류 기반 스핀 궤도 토크

오비탈 전류는 고체 내에서 강한 결정장(crystal field)에 의해 전자의 오비탈 자유도가 억제되고, 평균 오비탈 각운동량( $\langle L \rangle$ )이 0이 되는 현상인 오비탈 급랭(orbital quenching)에 의해 오랫동안 그 역할이 무시되어 왔다. 그러나 최근 연구에 따르면, 바닥 상태에서 오비탈 각운동량이 평균적으로 소멸되더라도, 외부 전기장이 가해진 비평형(non-equilibrium) 또는 정상 상태(steady state)에서는 유한한  $\langle L \rangle$ 을 가진 전자들의 정렬이나 흐름이 생성될 수 있음이 밝혀졌다[16]. 이러한  $\langle L \rangle$ 의 비평형 반응은 크게 두 가지 대표적인 형태로 나타난다. 하나는 전기장에 수직한 방향으로  $\langle L \rangle$ 의 흐름인 오비탈 전류가 유도되는 오비탈 홀 효과(orbital Hall effect, OHE)이고, 다른 하나는 중심대칭(centrosymmetric)이 깨진 시스템에서 전기장 방향(계면에 수직한 방향)으로  $\langle L \rangle$ 이 정렬되는 오비탈 라쉬바-에델슈타인 효과(orbital Rashba-Edelstein effect, OREE)이다.

OHE는 외부 전기장에 의해 유도된 전자의  $\langle L \rangle$ 이 전기장에 수직한 방향으로 분극되어 흐르는 현상이다[16]. 이는 순수한

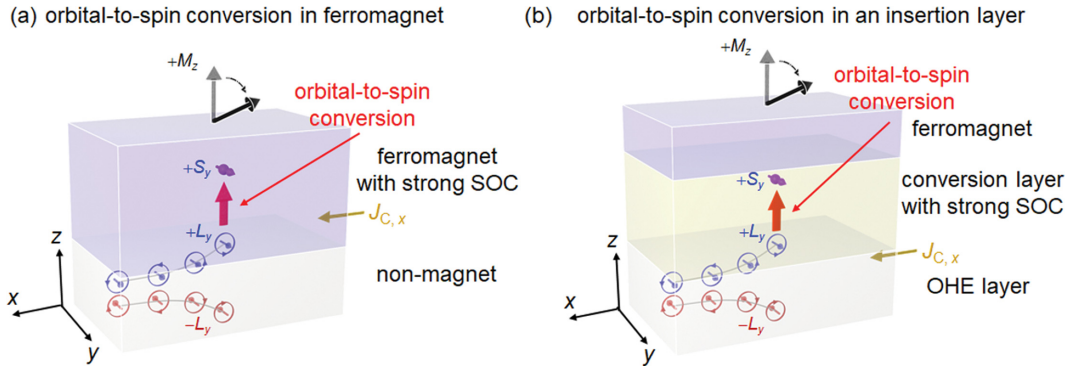


**Fig. 2.** (Color online) Schematics of (a) orbital Hall effect and (b) orbital Rashba-Edelstein effect in non-magnet/ferromagnet and oxide/non-magnet/ferromagnet heterostructures, respectively.  $J_{C,x}$  denotes the charge current along the  $x$ -axis, and  $\pm L_y$  represents orbital angular momentum along the  $y$ -axis. The blue and red arrows in the non-magnet or at the oxide/non-magnet interface indicate orbital angular momentum.

오비탈 전류가 전기적으로 생성되는 대표적인 비평형 효과이며, 일반적으로 Fig. 2(a)와 같이 전류( $J_{C,x}$ )가(혹은 전기장이)  $x$  축 방향으로 인가될 때,  $y$  축 방향으로 분극(polarization)된 오비탈 각운동량을 갖고  $z$  축 방향으로 흐르는 형태로 나타난다. 전기장이 인가되면 오비탈 텍스처(orbital texture)가 변화하게 되어 오비탈들의 중첩(superposition)에 따른 혼성화(hybridization)가 일어나게 되고 그 결과 OHE가 발생하게 된다[16,19]. OREE는 비중심대칭 구조에서 외부 전기장에 의해 전자의  $\langle L \rangle$ 이 계면에 분극되어 축적되는 현상을 의미한다[15,19]. 일반적으로 Fig. 2(b)와 같이 전류( $J_{C,x}$ )가(혹은 전기장이)  $x$  축 방향으로 인가될 때,  $y$  축 방향으로 분극된 오비탈 각운동량이 계면에 축적되는 형태로 나타난다. 비중심대칭 구조에서는 오비탈 라쉬바 효과(orbital Rashba effect, ORE)에 의해 정렬된 오비탈 각운동량( $L$ )이 전기장이 인가되면 오비탈 텍스처가 변화하게 되어 결과적으로 0이 아닌  $\langle L \rangle$ 이 축적되는 오비탈 에델슈타인 효과(orbital Edelstein effect, OEE)가 발생한다. 이러한 두 과정을 포괄하여 OREE라고 부르며 이 축적된  $\langle L \rangle$ 이 계면으로부터 확산되면서 오

비탈 전류를 형성할 수 있다. 최근 이론 계산에 따르면 대부분의 전이금속(transition metal)에서 OHE에 의해 유도되는 오비탈 홀 전도도(orbital Hall conductivity,  $\sigma_{OH}$ )는 스핀 홀 전도도(spin Hall conductivity,  $\sigma_{SH}$ )에 비해 월등히 큰 값을 가질 수 있음이 밝혀졌다[21-24]. 이러한 결과는 오비탈 전류가 스핀 전류보다 더 큰 각운동량을 전달할 수 있음을 시사하며, 오비탈 전류를 활용하면 더 효율적인 자화 스위칭 기술을 확보할 가능성이 있음을 보여준다.

그러나 오비탈 전류 기반의 SOT 즉, OT를 발생시키기 위해서는, 오비탈 각운동량이 강자성체의 자화를 구성하는 스핀 각운동량과 교환 상호작용(exchange interaction)을 통해 직접 상호작용하지 못한다는 한계로 인해, 오비탈-스핀 전환 단계를 필요로 한다[25]. 따라서 오비탈 각운동량을 이용해 강자성체의 자화 즉, 스핀 각운동량을 제어하기 위해서는 오비탈 각운동량을 스핀 각운동량으로 전환시켜줘야 한다. 오비탈-스핀 전환은 SOC를 통해 이뤄지며 Fig. 3(a)와 같이 SOC가 큰 강자성체를 사용하여 전환하거나, Fig. 3(b)와 같이 오비탈 생성층과 강자성층 사이에 SOC가 큰 물질을 전환층



**Fig. 3.** (Color online) Schematics of (a) orbital-to-spin conversion through spin-orbit coupling (SOC) of ferromagnet and (b) an insertion layer.  $J_{C,x}$  denotes the charge current along the  $x$ -axis.  $\pm L_y$  and  $\pm S_y$  represent orbital and spin angular momentum along the  $y$ -axis, respectively. The spin angular momentum converted from orbital angular momentum exerts an orbital torque on the magnetization ( $M_z$ ) of the ferromagnet. The orbital current originates from the orbital Hall effect (OHE) and the sign of SOC is positive in both cases.

**Table I.** Determination of the sign of orbital torque.

| Sign of SOC ( $\langle L \cdot S \rangle > 0$ ) |                   | Sign of SOC ( $\langle L \cdot S \rangle < 0$ ) |
|-------------------------------------------------|-------------------|-------------------------------------------------|
| $\sigma_{OH} > 0$                               | $\theta_{SH} > 0$ | $\theta_{SH} < 0$                               |
| $\sigma_{OH} < 0$                               | $\theta_{SH} < 0$ | $\theta_{SH} > 0$                               |

(conversion layer)으로 삽입하여 사용하는 방법으로 OT를 발생시킬 수 있다. 3d 전이금속 강자성물질(Fe, Co, Ni) 및 그 합금의 전환 효율에 대해서는 이론적인 계산 결과가 존재하며 Ni이 가장 좋은 효율을 보이는 것으로 알려져 있다[26].

OT를 다룰 때 중요한 점은 Table I과 같이 오비탈 홀 전도도와 SOC ( $\langle L \cdot S \rangle$ )의 부호에 의해 자성체에 인가되는 OT의 방향이 결정된다는 점이다[25,27,28]. 예를 들어 대부분의 전이금속은 양수의 부호를 갖는 오비탈 홀 전도도를 가지고 있음이 이론 연구를 통해 밝혀졌다. 이러한 전이금속에서 발생된 오비탈 전류를 양수의 SOC 부호를 갖는 물질을 통해 스핀 전류로 변환할 경우 최종적으로 측정되는 OT의 스핀 홀 각도(spin Hall angle,  $\theta_{SH}$ )의 부호는 양수가 되며 음수의 SOC 부호를 갖는 물질을 통해 스핀 전류로 변환할 경우 최종적으로 측정되는 OT의 스핀 홀 각도의 부호는 음수가 된다. 이를 바탕으로 지금까지 보고되는 대부분의 실험 결과가 설명되고 있다.

이와 관련해 최근 SHE 역시 그 기원이 OHE에 있을 수 있다는 해석도 제시되고 있다[16]. 구체적으로는, OHE로 유도된 오비탈 전류가 비자성체 내의 SOC에 의해 스핀 전류로 전환되는 것이 SHE의 근원이 된다는 것이다. 이를 바탕으로 SHE가 강한 Ta, Pt의 스핀 홀 각도 부호 역시 설명이 가능하다. 구체적으로 Ta, Pt의 오비탈 홀 전도도의 부호는 양수로 동일한데 SOC의 부호가 Ta은 음수, Pt는 양수이기 때문에 두 물질의 스핀 홀 각도는 Ta은 음수, Pt는 양수로 결정되며 이는 실험 결과들과 잘 일치한다.

### III. 다양한 오비탈-스핀 전환 실험 결과

전장에서 설명한 바와 같이, 오비탈 각운동량은 자화와 직접적인 상호작용을 하지 못한다. 따라서 오비탈 전류를 스핀 전류로 변환하기 위해 SOC가 큰 자성층이나 전환층을 이용해 OT를 유도하는 다양한 실험적 시도가 이루어졌다. 본 장에서는 다양한 전이금속 기반 물질에서 오비탈 전류를 발생시키고 이를 오비탈-스핀 전환을 일으켜 OT가 구현된 주요 실험 결과들을 소개하고자 한다.

Table II에 전이금속 기반 주요 OT 실험 결과들을 정리하였다. 표에는 오비탈 전류층(orbital source)과 오비탈-스핀 전환층, OT 효율, 오비탈 확산길이( $\lambda_L$ ), 자성층의 자기이방성(magnetic anisotropy)과 측정 방법을 포함하고 있다. OT 효율

은  $\xi_{DL}$  (damping-like torque efficiency normalized by current density)와  $\theta_{SH}^{eff}$  (effective spin Hall angle) 및  $\xi_{DL}^E$  (damping-like torque efficiency normalized by electric field)로 정리하였으며  $\xi_{DL}$  (혹은  $\theta_{SH}^{eff}$ )와  $\xi_{DL}^E$ 는 각각 비자성층에 흐르는 전류 밀도( $J_{NM}$ ) 또는 인가되는 전기장( $E_{NM} = \rho_{NM} J_{NM}$ ,  $\rho_{NM}$ 는 비자성층의 비저항)를 기준으로 구한 OT 효율이다. 일부 논문에서는 OT 효율을 유효 오비탈 홀 각도(effective orbital Hall angle,  $\theta_{OH}^{eff}$ )로 표기하고 있지만 본 논문에서는 편의상  $\theta_{SH}^{eff}$ 로 통일해 정리했다. 오비탈 확산 길이는 오비탈 각운동량의 물질 내 이동 거리를 나타내는 변수이다. 자성층의 자기이방성은 자화 용이 축(easy axis) 방향을 나타내며 박막에 수직 방향은 수직이방성(perpendicular magnetic anisotropy, PMA), 수평 방향은 수평이방성(in-plane magnetic anisotropy, IMA)로 분류하였다. 측정 방법(measurement method)은 OT를 구현 실험 방법이다. 아래 다양한 실험 결과 설명에서 각 구조는 기판에 가까운 층부터 기술하였다.

#### 1. 3d 전이금속기반 OT

3d 전이금속에서는 Ti, V, Cr, Mn을 이용한 다양한 실험이 수행되었다. 먼저 양수의  $\sigma_{OH}$ 를 갖는 Ti는 Ti/Ni 이중층에서 OHE에 의해 생성된 OT를 광자기 커 효과(magneto-optic Kerr effect, MOKE)를 이용해 측정했다. 그 결과 오비탈 전극층 Ti 30 nm~100 nm, 강자성 전환층 Ni 5 nm와 10 nm에서  $\theta_{SH}^{eff} = 0.015 \pm 0.002$ 와  $0.021 \pm 0.002$ 이 보고되었다. 참고로 이론 계산에 따르면 Ni의 SOC 부호는 양수이다. 오비탈 확산 길이는 각 Ni 전환층 두께에 따라  $\lambda_L = 50 \pm 15$  nm와  $60 \pm 15$  nm로 기존 SHE보다 매우 길게 얻어졌다[29]. 같은 Ti/Ni 구조에서 스핀 토크 강자성공명(spin torque ferromagnetic resonance, ST-FMR) 측정 시 Ti (2 nm~80 nm)/Ni (8 nm) 구조에서  $\theta_{SH}^{eff} = 0.13$ 의 값과  $\lambda_L = 47 \pm 11$  nm 값이 보고되었다[30]. 추가로 언급할 점은 결과값이 같은 물질로 구성된 시스템임에도 불구하고 차이가 매우 큰데 이는 MOKE와 ST-FMR의 측정 방법차이에서 기인하는 것이라 생각된다. Ti의 두께를 증가시킨 Ti (5 nm~100 nm)/Ni (6 nm) 구조에서 ST-FMR 측정 시  $\theta_{SH}^{eff} = 0.17 \pm 0.02$ ,  $\lambda_L = 42 \pm 6$  nm의 값이 보고되었으며, 같은 Ti를 기반으로 SOC(>0)가 큰 Pt를 전환층으로 사용한 구조(Ti (0 nm~120 nm)/Pt (1 nm)/Ni<sub>81</sub>Fe<sub>19</sub> (6 nm))에서 ST-FMR 측정 시  $\theta_{SH}^{eff} = 2.4 \pm 0.5$ ,  $\lambda_L = 39 \pm 8$  nm의 값을 얻었고 Ni를 사용한 이중층 구조 대비 토크 효율이 약 14배 증가하였다[31]. 다른 비자성 전환층을 사용한 실험으로는 Ti (3 nm~50 nm)/Ta (1 nm)/CoFeB (1.2 nm) 구조에서 하모닉 홀 측정(harmonic Hall measurement, HHM) 시  $\theta_{SH}^{eff} = -0.06 \pm 0.004$ 과  $\lambda_L = 4.83 \pm 0.41$  nm이 보고되었으며 일반적인 SHE에 의한 SOT가 지배적인 Ta (1 nm~15 nm)/CoFeB

**Table II.** Summary of experimentally reported orbital torque in various materials.

| Orbital Source (nm)                                             | Conversion source                                                                                           | $\xi_{DL}$ or $\theta_{SH}^{eff}$ | $\xi_{DL}^E$<br>( $10^3 \times \Omega^{-1}m^{-1}$ ) | Orbital diffusion length (nm) | Magnetic anisotropy | Measurement method | Ref. |
|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------|---------------------|--------------------|------|
| Ti (30~100)                                                     | Ni                                                                                                          | 0.015~0.021 $\pm$ 0.002           |                                                     | 50~60 $\pm$ 15                | IMA                 | MOKE               | [29] |
| Ti (2~80)                                                       | Ni                                                                                                          | 0.13                              |                                                     | 47 $\pm$ 11                   | IMA                 | ST-FMR             | [30] |
| Ti (5~100)                                                      | Ni                                                                                                          | 0.17 $\pm$ 0.02                   |                                                     | 42 $\pm$ 6                    | IMA                 | ST-FMR             | [31] |
| Ti (0~120)                                                      | Pt                                                                                                          | 2.4 $\pm$ 0.5                     |                                                     | 39 $\pm$ 8                    | IMA                 | ST-FMR             | [31] |
| Ti (3~50)                                                       | Ta                                                                                                          | -0.06 $\pm$ 0.004                 |                                                     | 4.83 $\pm$ 0.41               | PMA                 | HHM                | [32] |
| V (2~15)                                                        | Co                                                                                                          | 0.091                             |                                                     | 3.61 $\pm$ 0.21               | IMA                 | ST-FMR             | [33] |
| V (2~15)                                                        | Ni <sub>81</sub> Fe <sub>19</sub>                                                                           | 0.072                             |                                                     | 3.61 $\pm$ 0.21               | IMA                 | ST-FMR             | [33] |
| Cr (7.5)                                                        | Gd                                                                                                          | -0.21 $\pm$ 0.01                  |                                                     |                               | PMA                 | HHM                | [28] |
| Cr (15)                                                         | Ni                                                                                                          |                                   | 20                                                  |                               | IMA                 | HHM                | [34] |
| Cr (9)                                                          | Gd                                                                                                          | -0.25                             |                                                     |                               | IMA                 | HHM                |      |
| Cr (9)                                                          | Tb                                                                                                          | -0.25                             |                                                     |                               | IMA                 | HHM                |      |
| Mn (9)                                                          | Ni                                                                                                          | -0.03                             |                                                     |                               | IMA                 | HHM                |      |
| Cr (20)                                                         | Ni                                                                                                          |                                   | 0.17 $\pm$ 0.05                                     |                               | IMA                 | MOKE               | [35] |
| Cr (20)                                                         | Ge                                                                                                          |                                   | 43                                                  |                               | IMA                 | MOKE               |      |
| Cr (20)                                                         | Pt                                                                                                          |                                   | 55                                                  |                               | IMA                 | MOKE               |      |
| Cr (4)                                                          | Au                                                                                                          | 0.019 $\pm$ 0.002                 |                                                     |                               | PMA                 | HHM                | [36] |
| Cr (4~16)                                                       | TbCo                                                                                                        | -0.57                             |                                                     | 3.2                           | PMA                 | HHM                | [37] |
| Mn (3~20)                                                       | Pt                                                                                                          | 0.64                              |                                                     | 11                            | IMA                 | HHM                | [38] |
| Pt <sub>0.5</sub> Mn <sub>0.5</sub> (20)                        | Fe                                                                                                          | 0.19                              |                                                     |                               | IMA                 | MOKE               |      |
| Pt <sub>0.5</sub> Mn <sub>0.5</sub> (20)                        | Co                                                                                                          | 0.21                              |                                                     |                               | IMA                 | MOKE               | [39] |
| Pt <sub>0.5</sub> Mn <sub>0.5</sub> (20)                        | Ni                                                                                                          | 0.31                              |                                                     |                               | IMA                 | MOKE               |      |
| Zr (10)                                                         | [Co/Pt] <sub>3</sub>                                                                                        | 0.78                              |                                                     |                               | PMA                 | HHM                |      |
| Zr (10)                                                         | Co <sub>20</sub> Fe <sub>60</sub> B <sub>20</sub> /Gd/<br>Co <sub>20</sub> Fe <sub>60</sub> B <sub>20</sub> | 0.04                              |                                                     |                               | PMA                 | HHM                | [40] |
| Nb (4)                                                          | Ni                                                                                                          | 0.035                             |                                                     |                               | IMA                 | ST-FMR             | [41] |
| Nb (5)                                                          | Ni                                                                                                          | 0.018 $\pm$ 0.005                 |                                                     |                               | IMA                 | ST-FMR             | [42] |
| Ru (4)                                                          | Ni                                                                                                          | 0.019 $\pm$ 0.005                 |                                                     |                               | IMA                 | ST-FMR             |      |
| Ru (2~4)                                                        | Pt                                                                                                          | 0.03 $\pm$ 0.004                  |                                                     |                               | IMA                 | ST-FMR             |      |
| Nb (6~15)                                                       | Co                                                                                                          | 0.16                              |                                                     | 3.1                           | IMA                 | ST-FMR             | [43] |
| Ru (5)                                                          | Ni                                                                                                          | 0.016                             |                                                     |                               | IMA                 | ST-FMR             | [44] |
| Ru <sub>50</sub> Mo <sub>50</sub> (5~50)                        | Ni                                                                                                          | 0.053                             |                                                     | 24.3 $\pm$ 6.8                | IMA                 | ST-FMR             |      |
| Ru <sub>50</sub> Mo <sub>50</sub> (2.5)/<br>Ru (2.5)            | Ni                                                                                                          | 0.046                             |                                                     |                               | IMA                 | ST-FMR             |      |
| Cr (2)                                                          | Pt                                                                                                          | 0.22 $\pm$ 0.002                  |                                                     |                               | PMA                 | HHM                | [45] |
| Nb (2)                                                          | Pt                                                                                                          | 0.33 $\pm$ 0.005                  |                                                     |                               | PMA                 | HHM                |      |
| Ru (2)                                                          | Pt                                                                                                          | 0.46 $\pm$ 0.006                  |                                                     |                               | PMA                 | HHM                |      |
| Hf (3~43)                                                       | Ni                                                                                                          |                                   | 1.352 $\pm$ 0.213                                   | 23.6 $\pm$ 4.1                | IMA                 | ST-FMR             | [46] |
| Hf (3~43)                                                       | Ni                                                                                                          |                                   | 0.622 $\pm$ 0.062                                   | 15.6 $\pm$ 2.8                | IMA                 | ST-FMR             |      |
| Ta (4)                                                          | Ni                                                                                                          | 0.03                              |                                                     |                               | IMA                 | ST-FMR             | [27] |
| Ta (4)                                                          | Ni                                                                                                          | 0.029                             |                                                     |                               | IMA                 | ST-FMR             | [41] |
| W (0~26)                                                        | Ni                                                                                                          | 0.45                              |                                                     | 68 $\pm$ 16                   | IMA                 | ST-FMR             | [30] |
| CuO <sub>x</sub> (3))                                           | Pt                                                                                                          |                                   | 116                                                 |                               | IMA                 | HHM                | [47] |
| Gd <sub>23</sub> Co <sub>77</sub> (10)/<br>CuO <sub>x</sub> (6) |                                                                                                             |                                   | -44 (300 K)<br>-540 (20 K)                          |                               | IMA                 | HHM                | [48] |
| Cu (10)/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (20)                     | Co <sub>25</sub> Fe <sub>75</sub>                                                                           | 0.12                              |                                                     |                               | IMA                 | ST-FMR             | [49] |
| Cu (10)/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (20)                     | Fe                                                                                                          | 0.13                              |                                                     |                               | IMA                 | ST-FMR             |      |
| Cu (10)/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (20)                     | Ni <sub>80</sub> Fe <sub>20</sub>                                                                           | 0.005                             |                                                     |                               | IMA                 | ST-FMR             |      |
| Cu (10)/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (20)                     | Ni                                                                                                          | 0.002                             |                                                     |                               | IMA                 | ST-FMR             |      |
| Cu (10)/Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (20)                     | Co <sub>25</sub> Fe <sub>75</sub> , Fe,<br>Ni <sub>80</sub> Fe <sub>20</sub> , Ni                           | 0.02 < $\theta_{SH}^{eff}$ < 0.04 |                                                     |                               | IMA                 | ST-FMR             |      |
| Cu (15)/SiO <sub>2</sub> (20)                                   | Co <sub>25</sub> Fe <sub>75</sub>                                                                           | 0.26                              |                                                     |                               | IMA                 | ST-FMR             | [50] |
| Cu (15)/TiO <sub>2</sub> (20)                                   | Co <sub>25</sub> Fe <sub>75</sub>                                                                           | 0.24                              |                                                     |                               | IMA                 | ST-FMR             |      |
| Cu (15)/MgO (20)                                                | Co <sub>25</sub> Fe <sub>75</sub>                                                                           | 0.17                              |                                                     |                               | IMA                 | ST-FMR             |      |
| Cu (15)/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (20)                     | Co <sub>25</sub> Fe <sub>75</sub>                                                                           | 0.12                              |                                                     |                               | IMA                 | ST-FMR             |      |
| Ru (6)/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (20)                      | Co <sub>40</sub> Fe <sub>40</sub> B <sub>20</sub>                                                           | -0.15~0.3                         |                                                     |                               | IMA                 | ST-FMR             | [51] |
| [W (2)/Ti (2)] <sub>3</sub>                                     | Ni <sub>81</sub> Fe <sub>19</sub>                                                                           | -27.4                             |                                                     | 47                            | IMA                 | ST-FMR             | [52] |
| [Pt (2)/Ru (1)] <sub>10</sub>                                   | Ni <sub>81</sub> Fe <sub>19</sub>                                                                           | 0.257                             |                                                     |                               | IMA                 | ST-FMR             | [53] |

(1.2 nm) 구조( $\theta_{SH}^{eff} = -0.038 \pm 0.004$ ) 대비 토크 효율이 1.6 배 증가하였다(논문에 CoFeB의 조성비가 명시되어 있지 않음)[32]. 참고로 Ta의 SOC 부호는 음수이다. 이러한 결과들은 전환층으로 사용된 Pt와 Ta의 큰 SOC에 의해 오비탈-스핀 전환이 잘 이루어져 강자성 Ni를 사용한 경우보다 OT가 증가한 것으로 해석될 수 있다. 한 가지 언급할 점은 측정 결과들 사이에 OT 효율이나  $\lambda_L$  값이 매우 넓게 분포하고 있는데 이는 측정 방법의 차이 및 샘플의 결정성 및 계면상태 차이에서 기인하는 것으로 보인다. V를 사용한 실험으로는 V/Fe, V/Co, V/Ni<sub>81</sub>Fe<sub>19</sub> 이중층에서 실험 결과가 보고되었다. V (2 nm~15 nm)를 오비탈 전극층으로 사용하고, 강자성 전환층으로 Fe, Co, Ni<sub>81</sub>Fe<sub>19</sub> (각각 10 nm)를 사용한 구조에서 ST-FMR로 측정하였다. Fe 전환층을 사용한 경우  $\xi_{DL} = -0.193$ 와  $\lambda_L = 3.61 \pm 0.21$  nm, Co 전환층을 사용한 경우  $\xi_{DL} = 0.091$ 와  $\lambda_L = 3.61 \pm 0.33$  nm, NiFe 전환층을 사용한 경우  $\xi_{DL} = 0.072$ 와  $\lambda_L = 3.61 \pm 0.21$  nm로 보고되었다[33]. 여기서 Fe에서 음수의  $\xi_{DL}$ 가 얻어진 것에 대해서는 Fe의 SOC가 작기 때문에 효과적인 오비탈-스핀 전환을 얻기가 어렵고 그에 따라 V의 OHE에 의한 토크가 아닌 SHE에 의한 토크 때문이라고 설명하고 있다(V의  $\sigma_{SH}$ 는 음수이고  $\sigma_{OH}$ 는 양수). Cr은  $\sigma_{OH}(>0)$ 가 클 것으로 이론적으로 예측되기에 다양한 실험들이 보고되었다. 먼저 오비탈 전극층 Cr 7.5 nm에 Co 10 nm와 Gd 10 nm를 강자성 전환층으로 사용하고 HHM을 이용해 측정한 결과에서 각각  $\xi_{DL} = -0.018 \pm 0.002$ ,  $-0.21 \pm 0.01$ 의 값이 보고되었으며, Cr/Co와 다르게 Cr/Gd의 경우 Gd의 큰 SOC( $<0$ )로 인해 효과적인 오비탈-스핀 전환이 일어나 12배에 달하는 큰 OT를 얻을 수 있음을 밝혀냈다. 나아가 이 연구에서는 Cr (10.0 nm)/Pt (1.0 nm)/Co<sub>32</sub>Fe<sub>48</sub>B<sub>20</sub> (0.9 nm) 구조에서 OT를 인가하여 수직 자화를 스위칭하는 것이 가능함을 보였다[28]. 또 다른 결과로는 Cr (15 nm)/Ni (4 nm) 이중층 구조에서 HHM 측정 시  $\xi_{DL}^E \sim 0.2 \times 10^5 \Omega^{-1}m^{-1}$ 의 값이 측정되었다. Cr은 계산상  $\sigma_{SH} < 0$ 과  $\sigma_{OH} > 0$ 을 가지는데, Ni를 사용한 경우 Ni의 높은 오비탈-스핀 전환 효율로 인해 양수의 OT 효율이 나온 것으로 보고했다[34]. 희토류 금속(Tb, Gd)를 전환층으로 삽입한 Cr (9 nm)/Tb or Gd (0 nm~6 nm)/Co (2 nm) 구조에서 HHM 측정 시 3 nm 두께의 Tb와 Gd를 삽입하였을 때 최대의  $\xi_{DL}^E$ 를 가지는데 이는 오비탈의 Tb, Gd 내 전달거리와 전환 효율이 최대가 되기 때문으로 해석하고 있다. 참고로 Tb와 Gd의 SOC 부호는 음수로 고려했다[34]. 추가로 오비탈 전극층으로 Mn을 사용한 실험도 진행되었다. 우선 Mn (9 nm)/Ni (2 nm), Mn (9 nm)/Co (2 nm) 이중층 구조에서 HHM 측정 시 각각  $\theta_{SH}^{eff} \sim -0.001$ ,  $\theta_{SH}^{eff} \sim -0.03$ 의 값이 측정되었다. Mn은 Cr과 동일하게 계산상  $\sigma_{SH} < 0$ 과  $\sigma_{OH} > 0$ 을 가지기 때

문에, Ni의 높은 오비탈-스핀 전환 효율로 인해 양수의 OT 효율이 나온 것으로 해석했다. 오비탈 전극으로 Cr을 사용하고 Ni를 전환층으로 사용할 때 그 사이에 다양한 물질을 삽입하고 오비탈 전류의 투과도(transparency)를 연구한 결과도 보고되었다[35]. 먼저 전환층이 없는 Cr (20 nm)/Ni (5 nm) 이중층 구조에서 MOKE 측정 시  $\xi_{DL}^E = (0.17 \pm 0.05) \times 10^3 \Omega^{-1}m^{-1}$ 의 값이 측정되었다. Cr과 Ni 사이에 0.8 nm 두께의 비자성 물질(Al, Ti, Cu, Ge, Pd, Ag, Sn, Ta, W, Pt, Au), 강자성 물질(Fe, Co)을 사용한 실험에서는 Ti, Ge, Pt, Fe를 사용한 구조에서 유의미한 결과가 나타났다. 해당 전환층을 사용할 때 MOKE 측정 시  $\xi_{DL}^E \sim 12 \times 10^3 \Omega^{-1}m^{-1}$ ,  $\xi_{DL}^E \sim 43 \times 10^3 \Omega^{-1}m^{-1}$ ,  $\xi_{DL}^E \sim 55 \times 10^3 \Omega^{-1}m^{-1}$ ,  $\xi_{DL}^E \sim 8.5 \times 10^3 \Omega^{-1}m^{-1}$ 의 값이 측정되었다. 먼저 Ti는 SOC가 작고, 오비탈 확산 길이가 전환층보다 길어 오비탈 전류에 별다른 영향을 미치지 않아 Cr/Ni 구조와 비슷한  $\xi_{DL}^E$  값을 가진다. 그러나 SOC가 작은 Ge는 이중층 구조보다 약 2.5배 증가한  $\xi_{DL}^E$  값이 측정되었는데, 이는 Ge의 4p 오비탈과 Cr의 3d 오비탈이 혼성화 되어 계면에서 오비탈 전류의 전달을 더 효율적으로 만들었기 때문이라고 언급하고 있다. 또한 SOC가 큰 Pt를 전환층으로 사용 시 효율적으로 오비탈 전류가 전환되어 가장 큰  $\xi_{DL}^E$  값이 측정되었다. 마지막으로 강자성체 Fe를 전환층으로 삽입 시 다른 비자성 금속과 다르게 부호가 반전되었고, 이는 Fe의 SOC의 크기가 작아 오비탈-스핀 전환을 잘 시키지 못하고 나아가 오비탈 전류가 Fe 내부에서 빠르게 감쇠해 SHE가 토크를 거는 근원이 되기 때문에 음수의  $\xi_{DL}^E$  값이 측정되었다고 해석하였다. 하지만 이러한 해석은 오비탈 전류의 전달거리가 강자성체 내부에서 매우 길 것이라는 이론과 실험 결과들과는 상반된 결과이므로 명확한 원인을 밝히기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다. 양수의 SOC 부호를 갖는 Au를 전환층으로 사용한 Cr (4 nm)/Au (3 nm)/Co (1 nm)/Ti (5 nm) 구조에서 HHM 측정을 바탕으로  $\xi_{DL} = 0.019 \pm 0.002$ 의 값이 보고되었다[36]. 여기서 Ti는 오비탈 전류를 발생시키는 역할보다는 Co의 산화를 막기 위한 보호층으로 사용되었다. 또한 같은 구조에서 Cr의 OT로 수직자화 스위칭 시 Pt/Co 이중층 구조보다 낮은 전력소비를 가짐을 보고하였다. TbCo 준강자성체를 전환층으로 사용한 Ti (5 nm)/TbCo (7 nm)/Cr (4 nm~16 nm)의 구조에선 TbCo 조성비에서 Tb의 함량이 높아질수록  $\xi_{DL}$ 가 커지는 것을 보고하였고 이는 Tb의 비율이 높아질수록 강한 Tb의 SOC에 의해 효과적인 오비탈-스핀 전환이 일어나기 때문으로 해석했다[37]. 이 연구에서 Ti는 오비탈 전류의 소스보다는 TbCo의 수직자화를 유도하기 위한 씨앗층(seed layer)으로 사용되었다. Ti/TbCo 구조를 이용해 HHM 측정 시 기존 Ti/TbCo/Cr 구조 대비 낮은  $\xi_{DL}$  값이 측정되었고, 이를 바탕



으로 Ti는 오비탈 전극으로써 역할이 Cr 대비 크지 않음을 확인했다. 나아가 Mn을 오비탈 전극층으로 사용하여 OT로 비공선형(non collinear) 반강자성체의 스위칭을 수행한 실험도 있다[38]. Mn (3 nm~20 nm)/Pt (2 nm)/Mn<sub>3</sub>Sn (40 nm) 구조에서 HHM 측정을 통해  $\theta_{SH}^{eff} = 0.64$ ,  $\lambda_L = 11$  nm의 값이 보고되었다. 추가적으로 Mn을 사용한 다른 실험으로는 SOC가 강해 전환층으로 많이 사용되는 Pt를 동시 스퍼터링(co-sputtering)을 이용하여 Mn과 50:50의 원자비로 구성된 Pt<sub>0.5</sub>Mn<sub>0.5</sub> 합금을 만들어 OT 생성층으로 사용한 실험이 보고되었다. 20 nm 두께의 Pt<sub>0.5</sub>Mn<sub>0.5</sub>와 3 nm 두께의 강자성층 Fe, Co, Ni로 이루어진 이중층 구조에서 MOKE 측정 시 각 강자성층 별로  $\xi_{DL} = 0.19, 0.21, 0.31$  값을 가지며, Ni를 사용할 때 같은 두께의 Pt를 사용한 구조 대비 3배 높은  $\xi_{DL}$ 을 가지는 결과를 보고하였다[39]. 이와 같이 다양한 3d 전이금속에서 OT 다양한 전환층을 사용한 실험 결과가 보고되고 있으나, 같은 물질 및 구조를 연구했다라도 측정 방법에 따라 그 값들이 매우 상이하며 그 원인을 밝히기 위해서는 앞으로 물질의 결정성이나 계면상태 등이 오비탈-스핀 전환에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구가 더 많이 진행되어야 할 필요가 있다.

## 2. 4d 전이금속기반 OT

4d 전이금속 물질에서는 Zr, Nb, Ru, Ru<sub>50</sub>Mo<sub>50</sub>를 오비탈 전극층으로 사용한 다양한 실험들이 보고되었다. 먼저 Zr을 오비탈 전극층으로 사용한 실험에서는 Zr (10 nm)과 다층박막(multilayer) 강자성체[Co (0.3 nm)/Pt (0.7 nm)]<sub>3</sub>를 전환층으로 사용한 이중층 구조에서 HHM 측정 결과  $\xi_{DL} = 0.78$ 의 값을, 다른 구조의 강자성체 Co<sub>20</sub>Fe<sub>60</sub>B<sub>20</sub> (0.8 nm)/Gd (1.2 nm)/Co<sub>20</sub>Fe<sub>60</sub>B<sub>20</sub> (1.1 nm)가 전환층으로 사용한 구조에서는  $\xi_{DL} = 0.04$ 의 값을 측정하였다. 이를 통해 [Co (0.3 nm)/Pt (0.7 nm)]<sub>3</sub>를 전환층으로 사용했을 때 더 높은 오비탈-스핀 전환효율을 가져 더 높은  $\xi_{DL}$ 이 나타남을 보고하였다[40]. 특별히 언급할 점은 두 강자성 전환층(CoPt 합금과 CoFe 합금) 모두 양수의 SOC를 가지는 것으로 제일원리 계산을 통해 제시하였으며 Gd의 전환에 대해서는 언급하지 않고 있다. Nb를 오비탈 전극층(이론적으로  $\sigma_{SH} < 0$ 과  $\sigma_{OH} > 0$ 가 예측됨)으로 사용한 실험에서는 Ni<sub>81</sub>Fe<sub>19</sub>과 Ni 강자성층의 두께 변화에 따른 ST-FMR 측정 결과 Ti (1 nm)/Nb (4 nm)/Ni<sub>81</sub>Fe<sub>19</sub> (4 nm~8 nm)에서  $\xi_{DL} \sim 0.011$ 의 값이, Ti (1 nm)/Nb (4 nm)/Ni (6 nm~9 nm)에서는  $\xi_{DL} \sim 0.035$ 의 값이 측정되었다. 여기서 Ti는 오비탈 전류를 발생시키는 역할이 아닌 실리콘 기판에 Nb를 증착하기 위한 접착층(adhesion layer)으로 사용되었다. Nb/Ni<sub>81</sub>Fe<sub>19</sub>의 경우 음수 부호(Ni<sub>81</sub>Fe<sub>19</sub>의 SOC가 작기 때문에 Nb의 SHE가 우세), Ni는 양수 부

호(Ni에서 효과적인 오비탈-스핀 전환에 따른 Nb의 OHE의 우세)의  $\xi_{DL}$  측정에 따른  $\xi_{DL}$ 의 부호 반전을 통해 Nb/Ni 이중층에서의 OT를 확인하였다[41]. 또한 Nb와 Ru를 오비탈 전극층(Ru의 경우 이론적으로  $\sigma_{SH} > 0$ 과  $\sigma_{OH} > 0$ 가 예측됨)으로 OT를 검증한 실험이 보고되었다[42]. 큰 SOC를 가지는 강자성체 Ni를 전환층으로 사용한 구조인 Nb (5 nm)/Ni (4 nm~12 nm), Ru (4 nm)/Ni (4 nm~12 nm)에서  $\xi_{DL} = 0.018 \pm 0.005, 0.019 \pm 0.005$ 의 값을 측정하였다. 이에 더해 Ru를 오비탈 전극층으로 사용하고, SOC가 큰 비자성체 Pt를 전환층으로 삽입한 구조인 Ru (2 nm~4 nm)/Pt (0.5 nm~2.5 nm)/Fe<sub>60</sub>Co<sub>20</sub>B<sub>20</sub> (5 nm)/Pt (0.5 nm~2.5 nm)에서도 ST-FMR 측정을 수행하였다. 그 결과 Fe<sub>60</sub>Co<sub>20</sub>B<sub>20</sub> 위아래에 같은 두께의 Pt를 삽입하여 Pt에서 발생하는 SHE의 기여를 상쇄시킨 구조에서  $\xi_{DL} = 0.03 \pm 0.004$ 의 값을 측정하여 1 nm 두께를 갖는 Pt에서의 효과적인 오비탈-스핀 전환을 통해 큰  $\xi_{DL}$ 가 나타남을 보고하였다[42]. Nb를 오비탈 전극층으로 사용하고 강자성체 Fe, Co를 전환층으로 사용한 실험에서는 ST-FMR 측정을 통해 Fe (6 nm~16 nm)/Nb (6 nm), Co (6 nm~14 nm)/Nb (6 nm) 이중층에서 Fe, Co의 두께 변화를 통해  $\xi_{DL} = -0.22, \xi_{DL} = 0.16$ 을 보고하였으며, 전환층 SOC 부호에 의한 반대 부호의  $\xi_{DL}$ 과 Nb (6 nm~15 nm) 두께 변화를 통해  $\lambda_L = 3.1$  nm를 구하여 Nb/Fe의 토크는 부호가  $\sigma_{SH}$ 를 따르고 Nb/Co의 토크는 부호가  $\sigma_{OH}$ 를 따라 Nb/Co에서 OT가 발생함을 주장하였다[43]. 특별히 언급할 점은 다른 대부분의 실험에서 Fe와 Co는 SOC가 작아서 전환층으로 역할을 못한다고 간주하는데 이 실험에서는 Co는 오비탈-스핀 전환이 가능하다는 주장을 하고 있다는 점이다. 이에 대해 논문에서는 Co의 비저항이 커서 전체 토크 효율에 영향을 미친 것이 그 원인 중 하나로 제시하고 있다. Ru와 Mo를 50:50의 조성비를 가지는 Ru<sub>50</sub>Mo<sub>50</sub> 합금으로 제작하여 오비탈 전극층으로 사용한 실험도 보고되었다[44]. Ru와 Mo는 비슷한 크기의 반대되는 부호의  $\sigma_{SH}$ 를 가져 SHE는 배제할 수 있을 것으로 예측하고 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0001) 기판 위에 에피택셜 성장(epitaxial growth)을 통해 Ru<sub>50</sub>Mo<sub>50</sub> 합금을 성장시켰다. Ru<sub>50</sub>Mo<sub>50</sub> (10 nm)/CoFeB (3.0 nm~5.5 nm)에서 ST-FMR 측정 결과 강자성체 CoFeB의 두께 변화를 통해  $\xi_{DL} = 0.004$  값이 보고되었으며 강자성체 Ni를 전환층으로 사용한 구조인 Ru (5 nm)/Ni (3 nm~15 nm), Ru<sub>50</sub>Mo<sub>50</sub> (5 nm)/Ni (6 nm~15 nm)에서 강자성체 Ni의 두께 변화를 통해  $\xi_{DL} = 0.016, 0.053$ 의 값을 보고하였다. 이를 통해 낮은 SOC를 가지는 CoFeB는 낮은 오비탈-스핀 전환 효율을 가지고 예상대로  $\sigma_{SH}$ 가 매우 작아 작은 토크 효율을 보이는 반면(논문에 CoFeB의 조성비가 명시되어 있지 않음), SOC가 큰 Ni를 사용한 구조에서는 높은 오비탈-스핀 전환 효율을 가지

며,  $\text{Ru}_{50}\text{Mo}_{50}$  합금에서 Ru보다 큰 OT가 생성됨을 확인하였다. 또한  $\text{Ru}_{50}\text{Mo}_{50}$  (5 nm~50 nm)/Ni에서  $\text{Ru}_{50}\text{Mo}_{50}$ 의 두께 변화를 통해  $\lambda_L = 24.3 \pm 6.8$  nm를 구했다. 이에 더해 오비탈 전극층과 전환층 사이 Ru를 삽입한 구조인  $\text{Ru}_{50}\text{Mo}_{50}$  (2.5 nm)/Ru (2.5 nm)/Ni (3 nm~15 nm)에서 ST-FMR 측정을 수행하였다.  $\xi_{\text{DL}} = 0.046$ 의 값이 측정되었으며, 이는  $\text{Ru}_{50}\text{Mo}_{50}$  (5 nm)/Ni에서 측정된 값보다 약간 낮지만, 2.5 nm 두께의 Ru이 오비탈 전류 전달을 크게 방해하지 않는다는 것을 주장했다. 오비탈 전극층으로 각 2 nm의 Cr, Nb, Ru를 사용하고, 전환층으로 Pt 1.5 nm를, 자성층으로 수직자화를 가지는 다층박막 강자성체[Co (0.2 nm)/Ni (0.6 nm)]<sub>3</sub>을 사용한 실험에서는 HHM 측정 결과 Cr, Nb, Ru에서 각각  $\xi_{\text{DL}} = 0.22 \pm 0.002$ ,  $0.33 \pm 0.005$ ,  $0.46 \pm 0.006$ 의 값을 얻어냈다[45]. 비교를 위한 SHE 기반 구조인 Pt 3.5 nm/[Co (0.2 nm)/Ni (0.6 nm)]<sub>3</sub>는  $\xi_{\text{DL}} = 0.33 \pm 0.003$ 의 값이 보고되었다. 이를 통해 Ru를 오비탈 전극층으로 사용할 때 Pt 대비  $\xi_{\text{DL}}$  값이 약 1.4배 증가함을 확인하였다. 4d 전이금속 역시 3d 전이금속과 유사하게 얻어진 OT 효율 및 오비탈 전달거리에 큰 편차를 보이고 있으며 시편의 결정학적 상태, 계면상태에 따른 오비탈-스핀 전환 효과에 대한 연구가 이러한 편차를 설명할 수 있을 것이라 기대한다.

### 3. 5d 전이금속기반 OT

5d 전이금속의 경우 원자번호가 3d, 4d 대비 크고 그에 따라 강한 SOC 및 이에 수반되는 큰 SHE를 가지고 있기에 SOT와 OT를 구분하기가 쉽지 않다. 따라서 3d, 4d 대비 적은 수의 실험 결과가 보고되고 있다. 먼저  $\text{SiO}_2$  기판 위에 성장된 Hf (3 nm~43 nm)/Ni (12 nm), Ni (12 nm)/Hf (3 nm~43 nm)로 결정성을 다르게 제어한 이중층에서 Hf(이론적으로  $\sigma_{\text{SH}} < 0$  과  $\sigma_{\text{OH}} > 0$ 가 예측됨)두께 변화에 따른 ST-FMR 측정 결과  $\text{SiO}_2/\text{Ni}/\text{Hf}$ 에서  $\xi_{\text{DL}}^E = (1.352 \pm 0.213) \times 10^3 \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ ,  $\lambda_L = 23.6 \pm 4.1$  nm와 구조를 반대로 바꾼  $\text{SiO}_2/\text{Hf}/\text{Ni}$ 에서  $\xi_{\text{DL}}^E = (0.622 \pm 0.062) \times 10^3 \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ ,  $\lambda_L = 15.6 \pm 2.8$  nm의 값을 측정하였다[46]. 두 구조의  $\xi_{\text{DL}}^E$  과  $\lambda_L$  값이 다른 이유는 Ni의 결정성에 따른 오비탈-스핀 전환 효율과 계면의 오비탈 투과도의 차이 때문이라고 해석하고 있다. 오비탈 전극층으로 Ta(이론적으로  $\sigma_{\text{SH}} < 0$ 과  $\sigma_{\text{OH}} > 0$ 가 예측됨)를, 전환층으로 Ni를 사용하여 OT의 존재를 확인한 실험도 보고되었다[27].  $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$  (2 nm~7 nm)/Ta (4 nm), Ni (3 nm~15 nm)/Ta (4 nm)에서  $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$ , Ni 두께 변화에 따른 ST-FMR 측정 결과  $\xi_{\text{DL}} = -0.03$ ,  $\xi_{\text{DL}} = 0.03$ 의 값이 측정되었다. 이 결과는  $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$ 의 경우 SOC가 작기 때문에 전환 효율이 작아 SHE가 토크에 주도적인 역할을 하는 반면 Ni의 경우 SOC가 크기 때문에 OHE가 토크에 주도적인 역할을 하는

것으로 해석했다. Ta를 사용한 다른 실험으로는 Ta (4 nm)/ $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$  (3 nm~7 nm) 이중층에서  $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$  두께 변화에 따른 ST-FMR 측정 결과  $\xi_{\text{DL}} = -0.025$ 의 값이 보고되었으며, Ta (4 nm)/Ni (6 nm~9 nm) 이중층에서는 Ni 두께 변화에 따른 ST-FMR 측정 결과  $\xi_{\text{DL}} = 0.029$ 의 값이 보고되었다[41]. 이 결과 역시  $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ 은 전환층 역할을 못하는 반면 Ni은 전환층 역할을 해 토크 효율의 부호가 반전되고 이를 바탕으로 OT를 측정했다고 해석했다. 마지막으로  $\alpha$ 상을 갖는 W (이론적으로  $\sigma_{\text{SH}} < 0$ 과  $\sigma_{\text{OH}} > 0$ 가 예측됨)을 이용한 W/Ni 구조에서 ST-FMR 측정 시 W (0 nm~26 nm)/Ni (5 nm) 구조에서  $\theta_{\text{SH}}^{\text{eff}} = 0.45$ 의 값과  $\lambda_L = 68 \pm 16$  nm 값이 보고되었다[30]. 5d 전이금속을 이용한 실험들은 주로 OT의 존재 및 긴  $\lambda_L$ 를 확인하는데 초점이 맞춰져 있다. 앞서 언급한대로 5d 전이금속에는 SHE가 큰 물질들이 존재하므로 OHE에 의한 OT와 SHE에 의한 SOT의 부호를 잘 조절해 같은 방향으로 작용하게 하는 것이 가능하고 이를 통해 저전력 스위칭 소자를 구현하는 것이 가능할 것으로 기대된다.

### 4. OREE 기반 OT

전이금속들의 OHE를 기반으로 생성된 OT뿐만 아니라 다양한 산화물/비자성체, 비자성체/비자성체 계면에서 발생한 OREE를 바탕으로 OT를 측정한 실험들이 있다. 먼저 최초로 OT를 보고한 실험 결과로 TmIG (6.5 nm)/Pt (0.5 nm~7 nm)/ $\text{CuO}_x$  (3 nm) 구조에서  $\text{CuO}_x$ 의 내부에서 발생한 오비탈 각운동량이 Pt의 강한 SOC를 통해 스핀 각운동량으로 전환되고 이것이 TmIG 산화물 자성체에 OT를 인가할 수 있음이 HHM 측정을 통하여 보고되었다[47]. 이 실험에서는 Pt가 1.5 nm일 때  $\xi_{\text{DL}}^E = 116 \times 10^3 \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ 의 값이 보고되었다. 이는 기존 SHE를 기반으로 하는 TmIG/Pt 구조 대비  $\xi_{\text{DL}}^E$ 의 값이 16배 증가된 것을 보여 OT가 기존 SHE 기반 SOT 대비 큰 토크를 인가할 수 있음을 보였다.  $\text{CuO}_x$ 를 기반으로 하여 조성을 달리한 GdCo (조성비는  $\text{Gd}_{10}\text{Co}_{90}$ ~ $\text{Gd}_{35}\text{Co}_{65}$ 로 조절)를 준강자성 합금을 전환층으로 사용하는 실험이 보고되었다[48]. 온도 20 K에서  $\text{Gd}_{23}\text{Co}_{77}$  (10 nm)/ $\text{CuO}_x$  (6 nm) 구조를 사용해 HHM 측정 시  $\xi_{\text{DL}}^E = -540 \times 10^3 \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ 의 최대  $\xi_{\text{DL}}^E$  값을 얻었으며, 온도 300 K에서 전환 효율이 낮은 Co (7 nm)/ $\text{CuO}_x$  (6 nm) 구조에서  $\xi_{\text{DL}}^E = 72 \pm 8 \times 10^3 \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ 의 값이 얻어 GdCo 준강자성체를 전환층으로 사용할 때 7.5배 큰 OT를 얻을 수 있음이 보고되었다. 이 연구에서 주목할 점은 Co와 Gd의 SOC 크기차이를 바탕으로 GdCo의 조성을 변화시켜가며 오비탈-스핀 전환 효율을 제어할 수 있다는 점이다.  $\text{Cu}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 를 OREE 소스로 사용한 실험에선  $\text{Co}_{25}\text{Fe}_{75}$ , Fe,  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  (각각 5 nm), Ni (12 nm)를 강자성층으로 사용했고, Cu (10 nm)/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  (20 nm)의 계면



을 오비탈 전극층으로 사용하였다[49]. 강자성층/Cu (10 nm)/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  (20 nm) 구조에서 ST-FMR 측정 결과  $\theta_{\text{SH}}^{\text{eff}}$ 은 각각  $\text{Co}_{25}\text{Fe}_{75}$ 에서 0.12, Fe에서 0.13,  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ 에서 0.005, Ni에서 0.002로 나타났다.  $\text{Co}_{25}\text{Fe}_{75}$ 와 Fe는 상대적으로 높은 OT 효율이 나타났으며,  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ 와 Ni는 다소 낮은 토크 효율이 관찰되었다. 이는 Ni가 Cu와 동일한 fcc 격자구조와 유사한 격자상수(Ni = 3.52 Å, Cu = 3.61 Å)를 가지기 때문에 두 물질간 계면혼합(inter mixing)이 발생하여 OT 전환 효율이 감소되었다고 주장했다. 한편, Cu/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  계면의 영향을 확인하기 위해 산화물을 SOC가 큰  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  (20 nm)로 변경하여 동일한 구조에서 추가 실험을 수행하였다. 자성층의 종류와 관계없이  $0.02 \leq \theta_{\text{SH}}^{\text{eff}} \leq 0.04$  범위의 값이 나타났으며, 이는 산화물 층의 SOC에 관계없이 Cu/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  계면에서 생성된 오비탈 전류가 OT를 발생하는 것으로 보였다. 이와 유사하게 Cu와 다양한 산화물( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ , MgO)을 사용하여 이에 따른 OT 효율을 측정한 실험도 보고되었다[50].  $\text{Co}_{25}\text{Fe}_{75}$  (5 nm)/Cu (0 nm~30 nm)/산화물 (20 nm) 구조에서 ST-FMR 측정 시 각각  $\theta_{\text{SH}}^{\text{eff}} = 0.12(\text{Cu}/\text{Al}_2\text{O}_3)$ ,  $0.26(\text{Cu}/\text{SiO}_2)$ ,  $0.24(\text{Cu}/\text{TiO}_2)$ ,  $0.17(\text{Cu}/\text{MgO})$ 의 값이 측정되었다. 이러한 차이가 나타나는 이유는 Cu/산화물 계면에서 Cu 원자와 산화물의 산소 원자 오비탈 혼성화 정도에 의한 것으로 주장한다. 즉,  $\text{SiO}_2$ 는 다른 산화물에 비해 상대적으로 혼성화가 잘 이루어져 높은  $\theta_{\text{SH}}^{\text{eff}}$  값을 가진다고 주장하였다.  $\text{CuO}_x$ 가 아닌  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 와 Ru 계면에서 발생하는 OREE를 이용한 실험도 보고되었다[51]. 먼저  $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$  (7 nm)/Ru (6 nm) 이중층 구조에서 ST-FMR 측정 시,  $\xi_{\text{DL}} = -0.04$ 의 값이 측정된 것에 비해  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 를 추가한  $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$  (7 nm)/Ru (6 nm)/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  (2 nm) 구조에서  $\xi_{\text{DL}} = -0.15$ 의 더욱 큰 값이 측정되었고, 이를 통해 OT가 Ru/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  계면에 의해 생성되었음을 주장했다. 추가로 자성층 두께에 따른 OT 효율을 보기 위해  $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$ 를 증가시킨  $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$  (12.6 nm)/Ru (6 nm)/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  (2 nm) 구조에서 측정 시  $\xi_{\text{DL}} = -0.3$ 까지 증가하여 강자성 전환층 두께 증가가 OT 생성 증가로 이어진다고 주장하였다. 특별히 언급할 점은 많은 연구들이  $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$ 은 SOC가 작아서 전환층 역할을 못하는 것으로 간주하는데 이 연구에서는 전환층 역할을 하는 것으로 간주하고 있다. 비자성층/산화물 계면이 아닌 초격자(superlattice) 구조의 계면을 기반으로 한 연구도 보고된 바 있다[52]. 8 nm 두께의  $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$  위에 총 12 nm의 두께를 유지한 초격자박막[W (1 nm~3 nm)/Ti (3 nm~1 nm)]<sub>3</sub>를 오비탈 전극층으로 사용한  $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$  (8 nm)/[W (1 nm~3 nm)/Ti (3 nm~1 nm)]<sub>3</sub> 구조에서 ST-FMR로 측정 시[W (1 nm)/Ti (3 nm)]<sub>3</sub>에서  $\xi_{\text{DL}} = -23.61$ , [W (2 nm)/Ti (2 nm)]<sub>3</sub>에서  $\xi_{\text{DL}} = -27.4$ , [W (3 nm)/Ti (1 nm)]<sub>3</sub>에서  $\xi_{\text{DL}} = -18.42$ 의 값을 측정하였다. 이 실험

에서 OT는 초격자 구조 안에서 OREE에 의해 생성된 오비탈 전류가 큰 SOC를 가지는 W로 주입되어 오비탈-스핀 전환되고  $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$  자성층에 토크를 전달하는 것으로 해석했다. 이 논문에서는 나아가 [Pt (2 nm)/Co (1 nm)/Pt (1 nm)] 수직자화 강자성층을 도입해 OREE에 의한 스위칭이 가능함 역시 보여줬다. 이 연구와 유사하게 [Pt/Ru]<sub>n</sub> 다층박막 구조를 오비탈 전극층으로 사용하고, 반복 수(n)를 조절하여 OT 효율을 향상시킨 연구가 존재한다[53]. 반복횟수가 10회인  $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$  (6 nm)/[Pt (2 nm)/Ru (1 nm)]<sub>10</sub>/Pt (2 nm)의 구조에서 ST-FMR 측정 시  $\xi_{\text{DL}} = 0.257$ 가 얻어졌으며 비교를 위해 SHE기반 구조인  $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$  (6 nm)/Pt (12 nm)에서 ST-FMR 측정 시  $\xi_{\text{DL}} = 0.055$ 가 얻어졌는데 OT는 이에 대해 4.7배 크다.

이와 같이 매우 다양한 물질에서 OT를 측정한 실험 결과들이 보고되고 있다. 다만 물질의 두께, 전환층의 종류, 측정 방법에 따라 매우 다른 실험값들이 얻어지고 있는 상황이기 때문에 제대로 OT를 이해하기 위해서는 더욱 많은 실험 결과들이 필요하다. 특히 오비탈 전달거리나 오비탈-스핀 전환에서 SOC의 역할에 대한 정량적 이해, 계면상태에 따른 오비탈 전류의 전달 등 아직 연구되어야 할 주제가 많이 남아 있다. 또한 위에 언급한 물질 외에도 2차원 소재에서 OHE가 이론적으로 예측[54-58]되고 있기 때문에 더욱 다양한 물질들로 OT에 대한 연구가 확장될 필요가 있다.

#### IV. 결 론

본 논문을 통해 최근 각광받는 오비탈 전류 및 이를 이용한 오비탈 토크 연구동향에 대해서 살펴보았다. OHE나 OREE는 기존에 무시되는 오비탈 자유도에 대한 새로운 물리적 관점을 제시하는 것을 넘어 차세대 자성메모리인 SOT-MRAM의 스위칭 전류를 낮춰 에너지 효율성을 크게 높일 수 있는 가능성을 지니고 있다. 이를 위해서 해결되어야 할 과제는 우선 오비탈 전달거리에 대한 명확한 실험 결과 및 오비탈 전달거리를 어떻게 제어할 수 있는지를 밝혀내야 하고 큰 오비탈 각운동량을 효과적으로 스핀 각운동량으로 전환하기 위한 방법이 고안되어야 한다. 특히 긴 오비탈 전달거리는, 전달거리가 비교적 짧은 스핀 전류를 사용하는 경우에 비해, 큰 오비탈 각운동량을 얻기 위해 오비탈 전극층의 두께가 증가되어야 함을 의미한다. 이는 스위칭 전류밀도가 기존 스핀 전류 기반 SOT에 비해 동등하거나 더 낮을 수 있더라도, 소자에 실제로 인가되는 전류의 크기 자체는 증가해야 하므로, SOT-MRAM 관점에서는 에너지 효율적인 스위칭에 불리하다. 또한 지금까지 단순히 SOC가 큰 물질을 사용하는 접근을 벗어나 오비탈-스핀 전환에 대한 심도 있는 물

리적 이해를 바탕으로 스핀 각운동량보다 훨씬 큰 오비탈 각운동량을 자화 스위칭에 모두 사용할 수 있는 연구가 필수적이라 볼 수 있다. 일례로 최근 오비탈 각운동량이 고체 내에서 스핀 각운동량보다 훨씬 긴 거리까지 전파되며 분극이  $\pm y$  방향에서  $\pm x$  방향으로 회전하고 SOC를 바탕으로 수직자화( $\pm z$ )에 토크를 발생시킬 수 있다는 것이 이론적, 실험적으로 밝혀졌다[59,60]. 이는 본 해설 논문에서 다루고 있는 오비탈-스핀 전환과는 근본적으로 다른 현상이며 고체내 오비탈 각운동량 및 SOC의 역할에 대한 이해가 깊어짐에 따라 새로운 토크를 발견할 가능성이 있음을 시사한다. 마지막으로 오비탈 각운동량에 대한 새로운 이해 및 접근연구가 더욱 성숙되면 단순히 오비탈 토크를 자성메모리에 응용하는 것을 넘어 오비탈 각운동량을 이용한 새로운 물리 현상의 발견 및 획기적인 응용 소자를 개발할 수 있는 기회가 될 것이라 생각한다.

## 감사의 글

본 연구는 한국연구재단 원천기술국제협력 개발사업(RS-2024-00443721)의 지원을 받아 이루어졌음을 밝히며 초기에 오비탈 관련 연구를 진행할 수 있도록 관련 분야를 소개해주신 이정진, 박병국, 고동욱, 김갑진, 이현우 교수님들께 감사를 표하는 바이다.

## References

- [1] S. A. Wolf, D. D. Awschalom, R. A. Buhrman, J. M. Daughton, S. von Molnár, M. L. Roukes, A. Y. Chtchelkanova, and D. M. Treger, *Science* **294**, 1488 (2001).
- [2] I. Žutić, J. Fabian, and S. Das Sarma, *Rev. Mod. Phys.* **76**, 323 (2004).
- [3] D. C. Ralph and M. D. Stiles, *J. Magn. Magn. Mater.* **320**, 1190 (2008).
- [4] I. M. Miron, K. Garello, G. Gaudin, P. J. Zermatten, M. V. Costache, S. Auffret, S. Bandiera, B. Rodmacq, A. Schuhl, and P. Gambardella, *Nature* **476**, 189 (2011).
- [5] L. Liu, C. F. Pai, Y. Li, H. W. Tseng, D. C. Ralph, and R. A. Buhrman, *Science* **336**, 555 (2012).
- [6] A. Manchon, J. Železný, I. M. Miron, T. Jungwirth, J. Sinova, A. Thiaville, K. Garello, and P. Gambardella, *Rev. Mod. Phys.* **91**, 035004 (2019).
- [7] J. Ryu, S. Lee, K.-J. Lee, and B.-G. Park, *Adv. Mater.* **32**, 1907148 (2020).
- [8] M.-G. Kang, S. Lee, and B.-G. Park, *npj Spintronics* **3**, 8 (2025).
- [9] K. Garello, I. M. Miron, C. O. Avci, F. Freimuth, Y. Mokrousov, S. Blügel, S. Auffret, O. Boulle, G. Gaudin, and P. Gambardella, *Nat. Nanotechnol.* **8**, 587 (2013).
- [10] Y. Fan, P. Upadhyaya, X. Kou, M. Lang, S. Takei, Z. Wang, J. Tang, L. He, L.-T. Chang, M. Montazeri, G. Yu, W. Jiang, T. Nie, R. N. Schwartz, Y. Tserkovnyak, and K. L. Wang, *Nat. Mater.* **13**, 699 (2014).
- [11] A. R. Mellnik, J. S. Lee, A. Richardella, J. L. Grab, P. J. Mintun, M. H. Fischer, A. Vaezi, A. Manchon, E.-A. Kim, N. Samarth, and D. C. Ralph, *Nature* **511**, 449 (2014).
- [12] S. Fukami, C. Zhang, S. DuttaGupta, A. Kurenkov, and H. Ohno, *Nat. Mater.* **15**, 535 (2016).
- [13] K. Cai, Z. Zhu, J. M. Lee, R. Mishra, L. Ren, S. D. Pollard, P. He, G. Liang, K. L. Teo, and H. Yang, *Nat. Electron.* **3**, 37 (2020).
- [14] V. D. Nguyen, S. Rao, K. Wostyn, and S. Couet, *npj Spintronics* **2**, 48 (2024).
- [15] S. R. Park, C. H. Kim, J. Yu, J. H. Han, and C. Kim, *Phys. Rev. Lett.* **107**, 156803 (2011).
- [16] D. Go, D. Jo, C. Kim, and H.-W. Lee, *Phys. Rev. Lett.* **121**, 086602 (2018).
- [17] D. Go and H.-W. Lee, *Phys. Rev. Res.* **2**, 013177 (2020).
- [18] D. Go, D. Jo, H.-W. Lee, M. Kläui, and Y. Mokrousov, *Euro Phys. Lett.* **135**, 37001 (2021).
- [19] D. Jo, D. Go, G.-M. Choi, and H.-W. Lee, *npj Spintronics* **2**, 19 (2024).
- [20] Q. Zhao, X. Luo, H. Wu, B. He, Q. Wang, T. Zhang, Z. Li, P. Liu, C. Zhao, J. Wang, Q. Liu, G. Yu, and J. Wei, *Adv. Electron. Mater.* **11**, 2400721 (2025).
- [21] H. Kontani, T. Tanaka, D. S. Hirashima, K. Yamada, and J. Inoue, *Phys. Rev. Lett.* **102**, 016601 (2009).
- [22] D. Jo, D. Go, and H.-W. Lee, *Phys. Rev. B* **98**, 214405 (2018).
- [23] L. Salemi and P. M. Oppeneer, *Phys. Rev. Mater.* **6**, 095001 (2022).
- [24] D. Go, H.-W. Lee, P. M. Oppeneer, S. Blügel, and Y. Mokrousov, *Phys. Rev. B* **109**, 174435 (2024).
- [25] D. Go and H.-W. Lee, *Phys. Rev. Res.* **2**, 013177 (2020).
- [26] H. Lee and H.-W. Lee, *Curr. Appl. Phys.* **67**, 60 (2024).
- [27] D. Lee, D. Go, H.-J. Park, W. Jeong, H.-W. Ko, D. Yun, D. Jo, S. Lee, G. Go, J. H. Oh, K.-J. Kim, B.-G. Park, B. C. Min, H. C. Koo, H.-W. Lee, O. J. Lee, and K.-J. Lee, *Nat. Commun.* **12**, 6710 (2021).
- [28] S. Lee, M.-G. Kang, D. Go, D. Kim, J.-H. Kang, T. Lee, G.-H. Lee, J. Kang, N. J. Lee, Y. Mokrousov, S. Kim, K.-J. Kim, K.-J. Lee, and B.-G. Park, *Commun. Phys.* **4**, 234 (2021).
- [29] 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).
- [30] H. Hayashi, D. Jo, D. Go, T. Gao, S. Haku, Y. Mokrousov, H.-W. Lee, and K. Ando, *Commun. Phys.* **6**, 32 (2023).
- [31] X. Xu, D. Zhang, Y. Wang, L. Zhang, Y. Qu, Z. Zhong, F. Bai, X. Tang, Q. Yang, H. Zhang, and L. Jin, *Small* **21**, 2408721 (2025).
- [32] S. Y. Shin, D. Han, S. Lee, and B.-G. Park, *Adv. Funct. Mater.* **2425932** (2025).
- [33] X. Liu, F. Liu, and C. Jiang, *J. Magn. Magn. Mater.* **610**,

- 172585 (2024).
- [34] G. Sala and P. Gambardella, *Phys. Rev. Res.* **4**, 033037 (2022).
- [35] I. Lyalin and R. K. Kawakami, *Phys. Rev. B* **110**, 104418 (2024).
- [36] J. Zhang, H. Xie, X. Zhang, Z. Yan, Y. Zhai, J. Chi, H. Xu, Y. Zuo, and L. Xi, *Appl. Phys. Lett.* **121**, 172405 (2022).
- [37] Y. Guo, Y. Zhang, W. Lv, B. Wang, B. Zhang, and J. Cao, *Appl. Phys. Lett.* **123**, 022408 (2023).
- [38] Z. Zheng, T. Zeng, T. Zhao, S. Shi, L. Ren, T. Zhang, L. Jia, Y. Gu, R. Xiao, H. Zhou, Q. Zhang, J. Lu, G. Wang, C. Zhao, H. Li, B. K. Tay, and J. Chen, *Nat. Commun.* **15**, 745 (2024).
- [39] S. Kim and G.-M. Choi, *Curr. Appl. Phys.* **68**, 26 (2024).
- [40] Y. Yang, P. Wang, J. Chen, D. Zhang, C. Pan, S. Hu, T. Wang, W. Yue, C. Chen, W. Jiang, L. Zhu, X. Qiu, Y. Yao, Y. Li, W. Wang, and Y. Jiang, *Nat. Commun.* **15**, 8645 (2024).
- [41] S. Dutta and A. A. Tulapurkar, *Phys. Rev. B* **106**, 184406 (2022).
- [42] A. Bose, F. Kammerbauer, R. Gupta, D. Go, Y. Mokrousov, G. Jakob, and M. Kläui, *Phys. Rev. B* **107**, 134423 (2023).
- [43] F. Liu, B. Liang, J. Xu, C. Jia, and C. Jiang, *Phys. Rev. B* **107**, 054404 (2023).
- [44] K. Tang, C. He, Z. Wen, H. Sukegawa, T. Ohkubo, Y. Nozaki, and S. Mitani, *APL Mater.* **12**, 031131 (2024).
- [45] R. Gupta, C. Bouard, F. Kammerbauer, J. O. Ledesma-Martin, A. Bose, I. Kononenko, S. Martin, P. Usé, G. Jakob, M. Drouard, and M. Kläui, *Nat. Commun.* **16**, 130 (2025).
- [46] R. Fukunaga, S. Haku, T. Gao, H. Hayashi, and K. Ando, *Phys. Rev. B* **109**, 144412 (2024).
- [47] S. Ding, A. Ross, D. Go, L. Baldrati, Z. Ren, F. Freimuth, S. Becker, F. Kammerbauer, J. Yang, G. Jakob, Y. Mokrousov, and M. Kläui, *Phys. Rev. Lett.* **125**, 177201 (2020).
- [48] S. Ding, M.-G. Kang, W. Legrand, and P. Gambardella, *Phys. Rev. Lett.* **132**, 236702 (2024).
- [49] J. Kim, D. Go, H. Tsai, D. Jo, K. Kondou, H.-W. Lee, and Y. Otani, *Phys. Rev. B* **103**, L020407 (2021).
- [50] J. Kim, J. Uzuhashi, M. Horio, T. Senoo, D. Go, D. Jo, T. Sumi, T. Wada, I. Matsuda, T. Ohkubo, S. Mitani, H.-W. Lee, and Y. Otani, *Phys. Rev. Mater.* **7**, L111401 (2023).
- [51] L. Liao, F. Xue, L. Han, J. Kim, R. Zhang, L. Li, J. Liu, X. Kou, C. Song, F. Pan, and Y. Otani, *Phys. Rev. B* **105**, 104434 (2022).
- [52] J. Wei, X. Xu, Z. Lin, Y. Qu, X. Tang, Z. Zhong, H. Zhang, and L. Jin, *Adv. Electron. Mater.* **11**, 2400314 (2025).
- [53] X. Zhan, H. Wang, Z. Li, and R. Liu, *Appl. Phys. Lett.* **124**, 072406 (2024).
- [54] S. Bhowal and S. Satpathy, *Phys. Rev. B* **101**, 121112(R) (2020).
- [55] S. Bhowal and S. Satpathy, *Phys. Rev. B* **102**, 035409 (2020).
- [56] L. M. Canonico, T. P. Cysne, T. G. Rappoport, and R. B. Muniz, *Phys. Rev. B* **101**, 075429 (2020).
- [57] L. M. Canonico, T. P. Cysne, A. Molina-Sánchez, R. B. Muniz, and T. G. Rappoport, *Phys. Rev. B* **101**, 161409(R) (2020).
- [58] T. P. Cysne, M. Costa, L. M. Canonico, M. B. Nardelli, R. B. Muniz, and T. G. Rappoport, *Phys. Rev. Lett.* **126**, 056601 (2021).
- [59] D. Go, D. Jo, K.-W. Kim, S. Lee, M.-G. Kang, B.-G. Park, S. Blügel, H.-W. Lee, and Y. Mokrousov, *Phys. Rev. Lett.* **130**, 246701 (2023).
- [60] T. Gao, P. Rüßmann, Q. Wang, R. Fukunaga, H. Hayashi, D. Go, T. Harumoto, R. Tu, S. Zhang, L. Zhang, Y. Mokrousov, J. Shi, and K. Ando, *Nat. Phys.* **20**, 1896 (2024).