ISSN (Print) 1598-5385
ISSN (Online) 2233-6648
≪연구논문≫ Journal of the Korean Magnetics Society 34(3), 116-120 (2024) https://doi.org/10.4283/JKMS.2024.34.3.116

Magnetic Proximity Effect on Weyl-semimetal/Magnet Heterostructure

Sobin Yun[1†], Ki-Hoon Son[1,2†], Ji-Eun Lee[1,3,4], Hong-Sub Lee[2], Chaun Jang[1*], and Hyejin Ryu[1*]

[1]*Center for Spintronics, Korea Institute of Science and Technology (KIST), Seoul 02792, South Korea*
[2]*Department of Advanced Materials Engineering for Information and Electronics, Kyung Hee University, Yongin 17104, South Korea*
[3]*Advanced Light Source, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720, USA*
[4]*Max Planck POSTECH Center for Complex Phase Materials, Pohang University of Science and Technology, Pohang 37673, Korea*

(Received 18 June 2024, Received in final form 27 June 2024, Accepted 27 June 2024)

Recent advancements in spintronics have focused on materials with strong spin-orbit coupling, such as topological insulators and Weyl semimetals, which offer new methods for controlling spin currents. This study investigates the magnetic proximity effect in a $NbIrTe_4/Ni_{81}Fe_{19}$ (Permalloy) heterostructure. Results show that crystallographic orientation of $NbIrTe_4$ induces uniaxial magnetic anisotropy in Permalloy, influenced by strong spin-orbit coupling in $NbIrTe_4$. This research enhances the understanding of magnetic interactions in Weyl semimetal/magnet heterostructure and promises advancements in low-power electronic devices and magnetic memory, improving the speed, size, and energy efficiency of spintronic technologies.
Keywords : magnetic proximity effect, uniaxial magnetic anisotropy, heterostructure, Weyl semimetal, spintronics

바일 준금속/자석 이종접합 구조에서의 자성 근접 효과

윤소빈[1†] · 손기훈[1,2†] · 이지은[1,3,4] · 이홍섭[2] · 장차운[1*] · 류혜진[1*]

[1]한국과학기술연구원, 스핀융합연구단, 서울시 성북구 화랑로 14길 5, 02792
[2]경희대학교 정보전자신소재공학과, 경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732, 17104
[3]로렌스 버클리 미국립연구소, Advanced Light Source, 미국, 캘리포니아 버클리, 94720
[4]포항공과대학교 막스플랑크 포스텍 연구소, 경상북도 포항시 남구 청암로 77, 37673

(2024년 6월 8일 받음, 2024년 6월 27일 최종수정본 받음, 2024년 6월 27일 게재확정)

최근 스핀트로닉스 연구의 주요 소재중 하나인 강한 스핀-궤도 결합을 가진 위상 절연체와 바일 준금속과 같은 이종접합 구조에 관현 연구는 스핀 전류를 제어하는 새로운 방법을 제시한다. 본 논문에서 설명된 연구는 $NbIrTe_4/Ni_{81}Fe_{19}$(Permalloy) 이종접합 구조에서 자기 근접 효과를 Magneto-optical Kerr Effect(MOKE)를 이용해 조사한 연구로, 그 결과, $NbIrTe_4$의 결정학적 방향이 퍼멀로이(Permalloy)에 단축 자기 이방성을 유도하는 것을 확인하였으며, 이는 $NbIrTe_4$의 강한 스핀-궤도 결합의 영향에 의한 것으로 예상할 수 있다. 본 연구는 이종접합에서의 자기 상호작용에 대한 이해를 높이고, 스핀트로닉스 기술의 속도, 크기, 에너지 효율성을 개선을 가능하게 하여, 저전력 전자소자와 자성 메모리 분야에서의 혁신을 이룩할 수 있을 것으로 기대한다.

주제어 : 자성 근접효과, 단축 자기 이방성, 이종접합 구조, 바일 준금속, 스핀트로닉스

I. 서 론

최근 스핀트로닉스에 관한 연구는 다양한 방면으로 진행되고 있으며, 특히 전자 스핀을 활용하고 조절하는 방법에 대한 분야에서의 연구가 활발히 진행되고 있다[1-3]. 다양한 물질들이 스핀트로닉스 연구에 활용되고 있으며, 그 중에서도 스핀-궤도 결합이 강한 물질인 위상 절연체와 바일 준금속 등은 스핀트로닉스 연구에 주요한 물질로 대두되고 있다. 이들의 독특한 전자구조와 자성 특성은 스핀전류 생성 및 제어 등에 새로운 방안을 제시하며, 다양한 방향으로 스핀트로닉스의 연구 분야를 확장 시키고 있다.

스핀트로닉스 연구에는 활용되는 자성 특성을 결정하는 주요 물리적 성질들로 자기 이방성, 자성 상전이 온도(퀴리(Curie) 온도 또는 네엘(Néel) 온도), 자기 구조, 자기 저항, 자

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.
*Corresponding author: +82-2-958-5705
e-mail: hryu@kist.re.kr / cujang@kist.re.kr
†These authors are contributed equally to this work.

기 교환 결합 등과 같은 다양한 특성들이 존재한다. 이러한 특성들은 자기 재료의 성질을 이해하는데 중요한 역할을 하며, 스핀트로닉스 소자의 설계 및 최적화에 필수적인 요소들이다.

이러한 요소들 중 자기 이방성은 자기 재료가 특정 방향에서 자기적으로 더 선호되는 경향성을 말하는 것으로, 재료의 결정구조, 전자 궤도 상호작용 등에 의해서 나타난다. 이 중에서도, 단축 자기 이방성(uniaxial magnetic anisotropy)은 특정 축을 따라 선호적으로 자화 되는 경향을 말한다. 이 축은 일반적으로 용이축(easy axis)이라 불리며, 물질의 결정학적 대칭성, 형상 이방성 등의 요소에 의해 결정될 수 있다. 또는 소재의 형성 과정에서 외부 자기장의 영향을 받아 발생할 수도 있다. 단축 자기 이방성을 가진 재료에서는 용이 축을 따라 자화 될 경우, 다른 방향인 곤란축(hard axis)에 비해 낮은 에너지를 가진다. 따라서 외부 자기장이 없을 경우 자화가 용이 축을 따라 일어나게 된다. 이러한 단축 자기 이방성은 자기 저장 장치, 자기 센서, 스핀 기반 전자 장치 등의 응용에서 중요한 역할을 한다. 특히 자기 이방성을 활용하여 강자성체의 자기화(magnetization) 방향을 정밀하게 제어할 수 있기 때문에, 장치의 안정적인 작동과 성능 향상을 위해 필수적이다.

단축 자기 이방성은 나노 스케일에서 자성을 정밀하게 제어하는 것을 가능하게 함으로써, 스핀트로닉스 소자로의 응용에 중요한 역할을 한다. 최근 이러한 특성이 T_d 구조를 지나는 바일 준금속 WTe_2와 자성 물질 $Ni_{81}Fe_{19}$, (Permalloy, Py)의 이종접합 구조에서 보고되었다[4]. 자성 근접 효과(magnetic proximity effect)로 인해 WTe_2와 $Ni_{81}Fe_{19}$(Py) 물질의 인터페이스에서의 상호작용이 나타나, WTe_2 물질의 결정 대칭성 방향에 따라 $Ni_{81}Fe_{19}$(Py) 층에 단축 자기 이방성이 나타나는 결과를 보여주고 있다. 이는 바일물질의 독특한 전자구조와 WTe_2 층의 강한 스핀-궤도 결합으로 인해 나타난다는 메커니즘이 제시되었다[4].

본 연구에서는 $NbIrTe_4$ 물질과 $Ni_{81}Fe_{19}$(Py) 물질의 이종접합 구조를 제작하고, Magneto-optical Kerr effect(MOKE)를 활용하여, Permalloy의 자성특성 변화를 관찰하는 실험을 수행하였다. 자성 근접 효과로 인하여, Permalloy가 $NbIrTe_4$ 물질의 결정대칭성의 영향을 받아 단축 자기 이방성 특성이 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

이러한 시스템에서의 단축 자기 이방성과 자성 근접효과의 상호작용은 자성에 대한 근본적인 이해를 넓힐 수 있으며, 저전력 전자기기, 자성 메모리, 그리고 그 이상의 혁신적인 소자 개발을 가능하게 한다. 이와 같은 연구와 기술 발전을 통해 스핀트로닉스 소자의 속도, 크기, 에너지 효율성을 크게 개선할 수 있는 잠재력을 가지고 있다. 이종접합 구조 구현을 통한 새로운 재료 발견, 기본적 현상의 이해, 그리고 소재 구조의 혁신적 발전이 스핀트로닉스 분야에 더욱 많은 기능과 응용 가능성을 열어줄 것으로 기대한다.

II. 자성-바일 이종접합 구조 물질 제작

본 연구에 사용된 $NbIrTe_4$ 물질은 T_d 상으로 space group은 $Pmn2_1$이며, 실험적으로 측정한 격자 상수는 a = 3.77 Å, b = 12.51 Å, and c = 13.12 Å이다. 이 구조는 Nb, Ir, Te 원자층이 c축을 따라 적층된 형태로, 거울 대칭($\{M_a \mid (0, 0, 0)\}$)과 글라이드 거울 대칭($\{M_b \mid (1/2, 0, 1/2)\}$)을 유지하지만 반전 대칭은 없다[5].

본 연구를 위해 Fig. 1(b)와 같은 적층 구조를 가진 샘플을 제작하였다. $NbIrTe_4$ 단결정은 산화 방지를 위해 질소 분위기의 글로브박스(globe box)에서 젤팩(Gel-Pak)을 이용해 실리콘

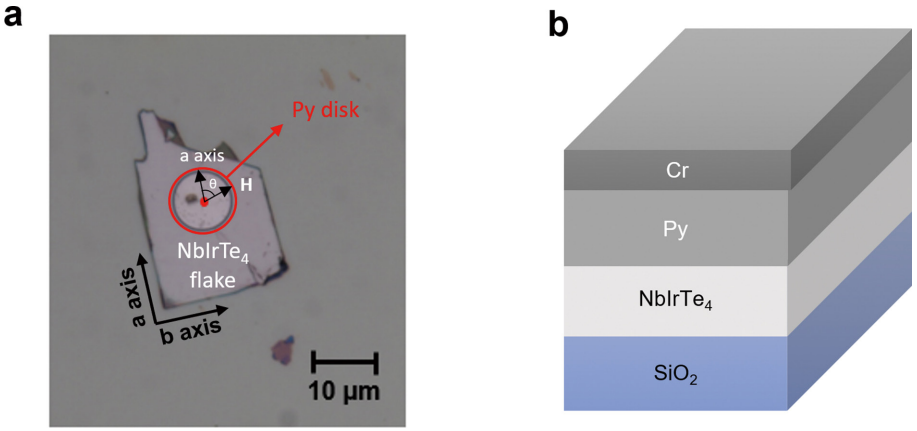

Fig. 1. (Color online) a, Optical microscope image of a Py disk on top of an a mechanically exfoliated $NbIrTe_4$ flake on SiO_2 substrate. MOKE measurements were performed at the red point in the middle of the disk. θ is the angle between magnetic field H and a-axis. b, Sample geometry for the measurements.

산화막(SiO_2) 기판 위에 박리되었고 글로브박스와 연결된 열증착기(thermal evaporator) 챔버로 산소에 노출되지 않고 옮겨졌다. 샘플을 옮긴 thermal evaporator 챔버를 3×10^{-6} torr 이하의 진공상태로 만들어 열증착법(thermal evaporation)으로 퍼멀로이(Permalloy, Py) 5 nm를 먼저 증착 하였고 산화방지를 위해 그 위에 크롬(Chromium, Cr) 3 nm를 추가적으로 증착 하였다. 본 연구에서는 Fig. 1(a)와 같이 증착된 Py를 디스크모양으로 만들어 Py의 모양 이방성으로 인한 영향을 최소화했다. 디스크모양의 Py를 만들기 위해 전자 빔 레지스트(E-beam Resist, ER)인 PMMA 495와 PMMA 950을 스핀 코팅(spin coating)하고 전자빔 리소그래피(E-beam lithography)와 디벨롭(develop)으로 디스크 모양을 제외한 영역의 ER만 제거한 후 아르곤으로 이온 빔 밀링(ion beam milling)하였다. 그 후 남은 ER은 아세톤(Acetone)으로 제거하였다. $NbIrTe_4$의 결정 방향에 대한 Py의 자화 이방성을 밝히기 위해 저온 자기 히스테리시스 곡선이 면내(in-plane)에서 MOKE(Magneto-Optic Kerr Effect) 시스템을 사용하여 측정되었다. 측정은 a axis를 0도, b axis를 90도로 설정하고 진행하였다.

III. $NbIrTe_4$ 물질에서의 비선형 홀 효과

$NbIrTe_4$ 물질은 T_d 구조를 가지는 물질로 time reversal symmetry는 보존되어 있고, inversion symmetry만 깨져 있는 물질로, 그 독특한 대칭성으로 인하여 비선형 홀효과를 나타낸다(Fig. 2)[5]. $NbIrTe_4$ 물질에서 나타나는 비선형 홀효과는 온도에 따라 비선형 홀전압이 달라지는 특성을 보여준다. I^{ω} = 600 μA 일때, 저온인 10 K에서는 비선형 홀전압이 ~1.2 μV 정도로 크게 나타나다가 온도가 100 K까지 올라가게 되면 비선형 홀 전압이 점차적으로 줄어들어 ~0.3 μV 정도로 1/4로 줄어들게 되는 현상을 관찰할 수 있다. 또한, 이러한 비선형 홀 효과 특성은 전류를 a축, 즉 $NbIrTe_4$ 물질이 지니는 결정의 mirror 평면에 수직한 방향으로 걸어주었을 때에만 나타나는 현상으로 결정의 대칭성에 많은 영향을 받는다. 이러한 바일 준금속의 대칭성이 자석인 퍼멀로이와 만나게 되면, 그 자성 특성에 어떠한 영향을 끼칠지 알아보고자 MOKE를 활용하여 바일 준금속/자석 이종접합 구조에서 자성특성 측정 실험을 수행하였다.

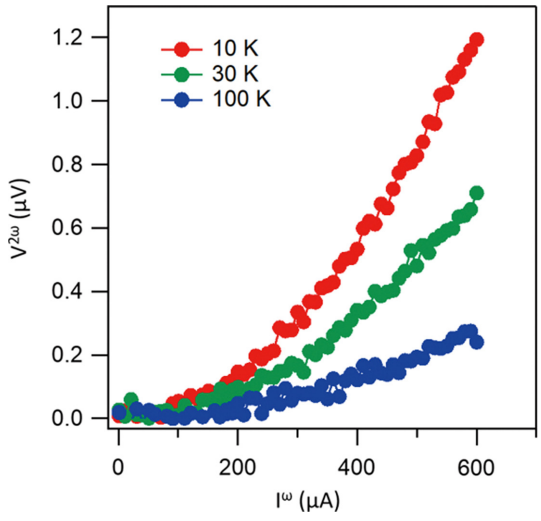

Fig. 2. (Color online) Temperature dependence of the nonlinear Hall effect in $NbIrTe_4$. Second-harmonic $V^{2\omega}$ as a function of the AC current I^{ω} which illustrates quadratic behavior at 10 K, 30 K, and 100 K.

IV. 자성 근접 효과로 인한 Py 자성 특성 변화

$NbIrTe_4/Ni_{81}Fe_{19}$(Py) 이종접합 물질의 자성특성을 관찰하기 위해 Magneto-optical Kerr effect(MOKE)를 활용하여 측정을 수행하였고, 그 결과로 $NbIrTe_4$의 결정 방향에 대한 Py의 자기 이방성을 관찰할 수 있었다. Fig. 3 a는 표준화된 잔류 자기의 각도 의존성을 보여준다. M_R/M_S의 M_R은 잔류 자기(remanent magnetization, M_R)로, 외부 자기장이 제거된 후 강자성 물질에 남겨진 자기이고 M_S는 포화 자기(saturation magnetization, M_S)로, 적용된 외부 자기장 H의 증가가 재료의 자화를 더 이상 증가시킬 수 없어 자속밀도(Magnetic Flux Density, B)가 어느 정도 수준을 유지할 때의 자기이다. 자화 용이축(easy axis)에서는 외부자기장이 0으로 돌아갈 때도 Magnetic Flux Density의 변화가 없어 여전히 포화된 상태로 유지되어서 M_R 값이 M_S 값과 같다.

Fig. 3 **a**에 easy axis에서 포화된 M 값을 M_S로 고정하고 각각의 각도별로 M_R과의 비율인 M_R/M_S를 계산해 그래프로 나타냈다. 자기장의 방향이 $NbIrTe_4$ 플레이크의 a axis와 평행한 0°와 180°에서의 M_R/M_S 값이 가장 크게 나타나고, b axis쪽으로 이동할 수록 점점 줄어들면서 $NbIrTe_4$ 플레이크의 b axis와 평행한 90°와 270°에서 최소가 되는 것을 볼 수 있다. 이 결과는 Py의 자화 용이축(easy axis)이 $NbIrTe_4$ 플레이크의 a axis를 따라 생기고 자화 곤란축(hard axis)이 b axis를 따라 생기는 것을 나타내며 단축 자기 이방성(uniaxial magnetic anisotropy)을 보여준다. 물질에 자기 이방성이 있을 때 easy axis는 물질이 자화 되기 쉬운 방향과 평행한 방향이고 hard axis는 물질이 자화 되기 어려운 방향과 평행한 방향이다.

Fig. 3 b-d는 각각 easy axis(θ = 0°), easy axis와 hard axis의 가운데 축(θ = 45°), 그리고 hard axis(θ = 90°) 방향으로 외부 자기장(H)를 걸어준 자기 이력 곡선(Magnetic Hysteresis Loop) 그래프이다. 가로축인 H는 걸어준 외부 자기장이고 세로축인 M은 편광된 빛의 각도 θ로, 빛이 많이 편광 되었다는 것은

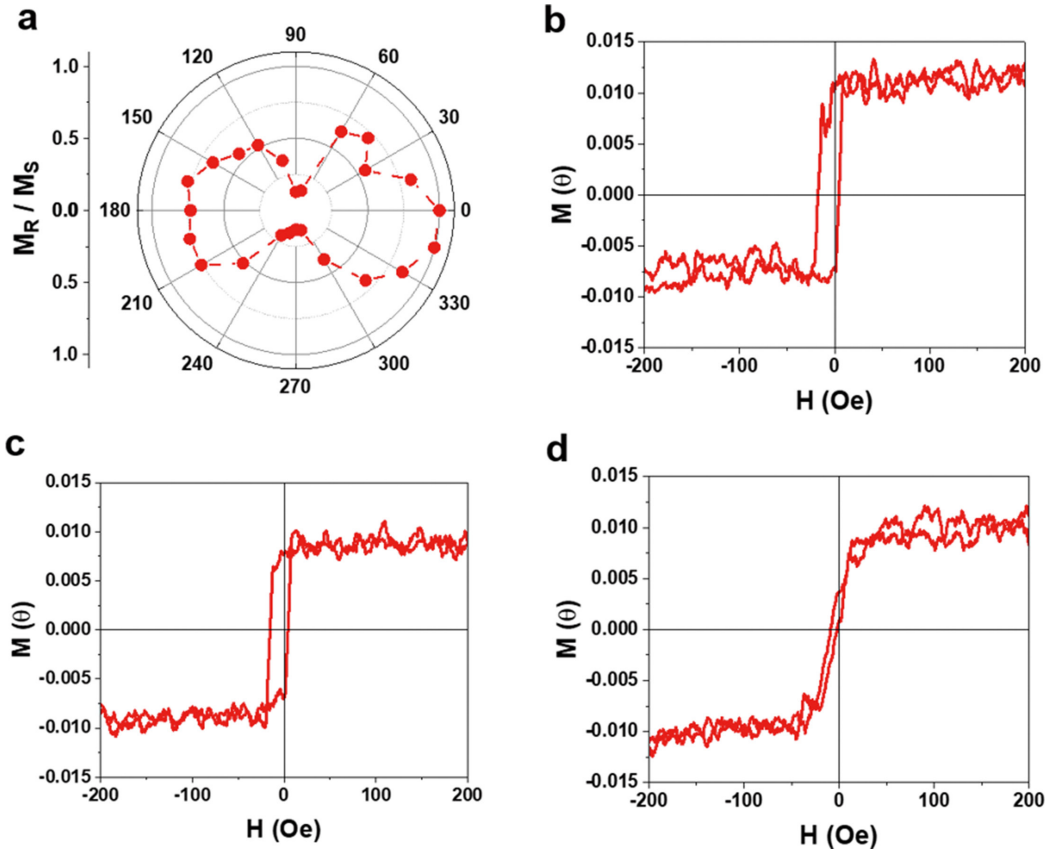

Fig. 3. (Color online) a, The angular dependence of M_R/M_S. b, The magnetic hysteresis loops for an external magnetic field H along the easy axis, $\theta = 0^o$ c, The magnetic hysteresis loops for an external magnetic field H at $\theta = 45^o$ d, The magnetic hysteresis loops for an external magnetic field H along the hard axis $\theta = 90^o$.

물질의 스핀방향이 한쪽으로 정렬되어 Magnetic Flux Density가 높다는 것을 의미한다. MOKE 측정은 자기장을 0 Oe에서부터 500 Oe까지 걸어주고 0 Oe로 돌아와 –500 Oe까지 걸어준 후 다시 0 Oe로 돌아오며 자성 히스테리시스를 관찰했다. H를 500 Oe까지 걸어줬다가 0 Oe로 돌아올 때 easy axis(Fig. 3 **b**)에서는 외부자기장을 가해줬을 때의 스핀방향이 외부 자기장이 없어져도 스핀들이 정렬된 채로 남아 있어서 H 값이 0 Oe일 때의 M_R 값이 크다. –500 Oe까지 걸어줬다가 0 Oe로 돌아올 때는 500 Oe일 때와는 반대방향으로 스핀이 정렬된 채로 남아 있어서 0 Oe일 때의 M_R 값이 절대값은 같지만 반대부호를 가진다. 따라서 0 Oe일 때의 M 값 2개가 대칭적으로 생기고 Fig. 3 **a**에서는 절대값으로 계산했다. hard axis(Fig. 3 **d**)에서는 외부자기장을 가해줬을 때 같은 방향으로 정렬되어있던 스핀들이 외부자기장이 줄어들면서 점점 정렬이 흐트러져 M 값이 줄어든다. H 값이 0 Oe일 때는 자성이 거의 남아있지 않아 M_R 값이 작아진 것을 볼 수 있다. 결론적으로 우리는 $NbIrTe_4$ 플레이크 위에 Permalloy를 증착하면 자기 이방성이 형성되고 $NbIrTe_4$ 결정 방향에 따라 easy axis와 hard axis가 정해지는 것을 관찰할 수 있었다.

이러한 연구를 통해 우리는 $NbIrTe_4$의 결정 방향이 Permalloy의 자화 용이축 과 자화 곤란축을 결정짓는 데 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있었다. $NbIrTe_4/Ni_{81}Fe_{19}$(Py)에서 관찰된 Py의 단축 자기 이방성(uniaxial magnetic anisotropy)는 $NbIrTe_4$ 표면에 있는 매달린 결합(dangling bond)으로부터 기인한다고 예상해 볼 수 있다. 또한, $NbIrTe_4$와 Py 박막 증착 과정에서 야기되는 strain에 의한 영향도 배제할 수 없을 것으로 예상된다. 이와 유사한 결과는 WTe_2/Py, GaAs/Fe 및 GaAs/Co와 같은 다른 이종접합 구조에서도 보고되고 있다[4,6]. 이러한 연구 결과를 바탕으로 개발된 이종접합 구조 신소재는 초저전력 전자소자 및 자성 메모리 등 스핀트로닉스 소자의 정보전달 속도, 크기, 에너지 효율성 등에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

V. 맺음말

최근 스핀트로닉스 연구는 전자의 스핀을 활용해 다양한 전자기기의 성능을 향상시키기 위한 기술적 발전에 주목하고 있다. 특히 위상 절연체와 바일 준금속과 같은 물질들은

강한 스핀-궤도 결합을 가지고 있어 스핀트로닉스 분야에서 중요한 소재로 다뤄지고 있다. 본 연구에서는 바일 준금속, $NbIrTe_4$와 자성물질 $Ni_{81}Fe_{19}$(Py)의 이종접합 구조의 자성특성 측정을 통해, 자성 근접 효과로 인해 바일 준금속 $NbIrTe_4$의 결정 방향이 $Ni_{81}Fe_{19}$(Py)의 자기 이방성 형성에 중요한 영향을 미치는 것을 확인하였다. 이러한 특성 연구 결과는 스핀 기반 소자의 설계와 최적화에 중요한 배경지식을 제공하며, 자기 저장 장치나 저전력 전자기기 등의 응용에서도 중요한 기여를 할 것으로 기대된다.

감사의 글

This work was mainly supported by the KIST Institutional Program (2E32961) and the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. 2020R1A5A1016518, 2021M3H4A1A03054856, RS-2023-00284081, 2021R1A2C2014179). Max Planck POSTECH/Korea Research Initiative is supported by the NRF of Korea (2022M3H4A1A04074153).

References

[1] S.-H. Yang, R. Naaman, Y. Paltiel, and S. S. P. Parkin, Nature Reviews Physics **3**, 328 (2021).
[2] P. J. Rajput, S. U. Bhandari, and G. Wadhwa, Silicon **14**, 9195 (2022).
[3] A. Hirohata et al., Journal of Magnetism and Magnetic Materials **509**, 166711 (2020).
[4] S. Shi et al., Nat. Nanotech. **14**, 945 (2019).
[5] J.-E. Lee et al., Nat. Commun. **15**, 3971 (2024).
[6] G. Bayreuther, J. Premper, M. Sperl, and D. Sander, Phys. Rev. B **86**, 054418 (2012).