ISSN (Print) 1598-5385
ISSN (Online) 2233-6648
≪해설논문≫ Journal of the Korean Magnetics Society 35(3), 105-109 (2025) https://doi.org/10.4283/JKMS.2025.35.3.105

Magnon-based Information Processing Technology

Kyongmo An*
Department of Physics Education, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Republic of Korea

(Received 10 June 2025, Received in final form 28 June 2025, Accepted 30 June 2025)

Magnons are emerging as a promising platform for ultra-low-power computing due to their potential for multiplexed information encoding using their intrinsic wave properties (amplitude and phase) and the near absence of Joule heating. This review highlights the major achievements in the field of magnonics over the past decade, focusing on two key themes: magnon information transport and nonlinear magnon computing. First, we discuss the potential for logic operations based on the long-range coherent propagation of magnons in magnetic insulator thin-film structures. We also cover recent advances such as efficient information conversion through magnon-phonon magnetoacoustic coupling and phonon-mediated long-distance spin information transport. Next, we explore the crucial role of the intrinsic nonlinearity of magnons in realizing neuromorphic computing that emulates the human brain, overcoming the limitations of conventional linear systems. In particular, we introduce recent research on magnetic texture-based pattern recognition, the generation of nonlinear magnons via parametric pumping, and their application in state-of-the-art neuromorphic computing.

Keywords : Magnon information transfer, Magnon-phonon coupling, Nonlinear magnon dynamics, Magnon neuromorphic computing

마그논 기반 정보 처리 기술

안경모*
충북대학교 물리교육과, 청주시 서원구 충대로 1, 28644

(2025년 6월 10일 받음, 2025년 6월 28일 최종수정본 받음, 2025년 6월 30일 게재확정)

마그논은 고유의 파동 특성(진폭, 위상)을 이용해 다중 정보 인코딩이 가능하고, 줄 히팅(Joule heating)이 거의 없어 초저전력 컴퓨팅 플랫폼으로 주목받고 있다. 본 해설 논문은 지난 10여년간 마그노닉스 분야의 주요 성과를 마그논 정보 전송과 비선형 마그논 컴퓨팅이라는 두 가지 핵심 주제로 나누어 조명한다. 먼저 자기 절연체 박막 구조에서 마그논의 긴 결맞음 전파를 이용한 논리 연산 가능성을 논의하고, 마그논-포논 자기음향 결합을 통한 효율적인 정보 변환 및 포논 매개 장거리 스핀 정보 전송과 같은 최신 성과를 다룬다. 다음으로, 인간의 뇌를 모방하는 뉴로모픽 컴퓨팅에서 마그논 고유의 비선형성이 어떤 핵심적인 역할을 하는지 논의한다. 특히 자기 텍스처 기반 패턴 인식, 파라메트릭 펌핑을 이용한 비선형 마그논 생성 및 이를 활용한 최신 마그논 기반 뉴로모픽 컴퓨팅 연구 결과를 소개한다.

주제어 : 마그논 정보 전송, 마그논-포논 결합, 비선형 마그논 동역학, 마그논 뉴로모픽 컴퓨팅

I. 서 론

초연결 사회에 접어들면서 기하급수적으로 늘어나는 데이터를 빠르고 효율적으로 처리하고 저장할 수 있는 새로운 정보 기술 수요가 늘어나고 있다. 그러나 CMOS(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) 기반 집적회로는 소자 축소 한계와 심각한 전력 소모 및 발열 문제를 동시에 안고 있어, 기존 전자 기반 소자만으로는 미래 수요를 충족하기 어렵다 [1]. 마그논(magnon)은 자성체 내부 스핀파(spin wave)의 집단적 여기(collective excitation)를 양자화한 준입자이다. 전하 동반없이 스핀 정보를 전달하므로 줄 히팅(Joule heating)을 근본적으로 억제할 수 있다. 또한 파동의 진폭, 위상, 주파수를 자유롭게 조절해 정보를 다중화하고, nm급 파장에서 THz 주파수 범위까지 넓은 스펙트럼을 활용할 수 있어 고밀도 및 초저전력 정보 처리에 매력적인 물리 플랫폼으로 부상하고 있

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.
*Corresponding author: Tel: +82-43-261-2724,
e-mail: kman@cbnu.ac.kr

다[2]. 본 리뷰에서는 마그논을 중심으로 최근 스핀트로닉스 연구의 핵심 성과와 기술 동향을 살펴보고자 한다. 특히 마그논 기반 정보 전송 및 변환 기술, 마그논 비선형성을 활용한 뉴로모픽 컴퓨팅 두 축으로 나누어 최신 결과와 향후 과제를 논의한다.

II. 마그논 기반 정보 전달

마그논을 활용한 정보 전달 방식의 가장 큰 매력은 높은 결맞음 특성과 초저전력 구동 가능성에 있다. YIG(Yttrium Iron Garnet)와 같이 자기 손실이 극히 낮은 물질로 된 박막이나 도파관 구조에서 마그논은 수 mm 스케일까지 위상 정보를 유지하며 전파될 수 있다[3]. 이러한 긴 결맞음 거리는 마그논의 진폭뿐만 아니라 위상까지 정보 인코딩에 활용할 수 있게 하여, 기존의 '0'과 '1'의 이진 논리를 넘어선 다중값 논리 또는 파동 기반 컴퓨팅과 같은 새로운 정보 처리 패러다임을 가능하게 한다[4].

더욱이, 마그논은 전하 전류 없이 스핀파 그 자체로 에너지를 전달하므로, 기존 전자 소자의 주된 에너지 손실 및 발열 원인인 줄 히팅으로부터 자유롭다. 이는 차세대 초저전력 정보 소자 개발에 있어 결정적인 이점으로 작용한다. 예를 들어, 최근 비선형 마그논 기반 트랜지스터나 논리 게이트는 10^{-18} J 수준의 극히 낮은 에너지로 동작할 수 있음이 제안되기도 하였다[5]. 마그논의 높은 결맞음 및 초저전력 특성으로 최근 10여년간 많은 프로토 타입 마그논 소자들이 개발되었으며, 이러한 소자들은 자기장을 통해 쉽게 제어 가능하고, 현존하는 반도체 나노 공정을 통해 쉽게 제작가능 하다는 장점이 있다.

Fig. 1은 지난 10여 년간 마그논 기반 정보 처리 분야에서 중요한 이정표가 된 소자들을 보여준다. T. Schneider et al.은 실험적으로 XNOR 논리 게이트를 구현하였으며[6], 이후 마그논의 비선형성을 이용한 마그논 트랜지스터[7], 마그논 half-adder가 구현되었다[8]. 최근에는 마그논을 활용한 뉴로모픽 연산의 가능성이 전산 모사를 통해 확인되었고[9], L. Körber et al.은 마그논 레저버(reservoir) 컴퓨팅의 실험적 구현에 성공하였다[10].

마그논은 특히 포논(phonon, 격자 진동의 양자)과의 상호작용을 통해 정보를 효율적으로 변환하고 전달한다. 이러한 상호작용은 자기음향 결합(magnetoacoustic coupling)에 의해 매개된다[11]. 특히 결맞은 마그논-포논 결합은 수 기가헤르츠(GHz) 대역에서 강하게 나타나며, 마그논과 포논 모두 긴 결맞음 시간을 가질 수 있어 위상 정보를 보존하는 결맞은 정보 변환 및 전달에 매우 적합하다[12]. 이러한 결맞은 결합의 효율을 정량적으로 평가하는 중요한 지표는 Cooperativity (C)로 이는 결합강도(g)가 각 시스템의 손실률(κ_m, κ_p)에 비해 얼마나 큰지를 나타내는 양이다 ($C = g^2/(\kappa_m\kappa_p)$). C가 1보다 클 경우 강한 결합(strong coupling)이라고 하며, 이 영역에서는 두 시스템 간의 가역적인 에너지 교환 및 양자 상태 전송이 가능해진다. YIG와 같이 자기 댐핑이 매우 낮은 물질에서는 마그논과 포논 모두 에너지 손실이 작아 쉽게 강한 결합 조건을 만족시킬 수 있다[13]. 최근 연구에서는 YIG에서 강한 마그논-포논 결합을 실험적으로 관측하고, 포논이 매개하는 스핀 정보가 sub-mm 수준까지 효율적으로 전달될 수 있음을 입증하였다[14]. 또한 자기 공명 조건 최적화를 통해 포논에 의해 매개되는 스핀 펌핑 신호의 크기를 최대 4배까지 증폭할 수 있음을 보고하였다(Fig. 2 참조)[15].

마그논-포논 결합 현상은 전기적 측정 방법을 통해 확인할 수도 있지만, 브릴루앙 광산란(Brillouin Light Scattering, BLS) 같은 광학 측정 기법을 활용하면 국소적인 영역에서의 결합 특성을 높은 공간 분해능으로 분석하는 것이 가능하다[16]. BLS 국소 측정은 샘플내의 불균일성(inhomogeneity)을 최소화하여, 더욱 순수한 마그논 포논 커플링 상호 작용 분석을 가능하게 한다. 향후 이러한 마그논-포논 결합 플랫폼은 극저온 환경에서의 정밀 제어를 통해 양자 정보 전달 및 처리 시스템을 구축하거나, 서로 다른 물리적 특성을 가진 양자 시스템(예: 초전도 큐비트와 광학 큐비트)을 연결하는 핵

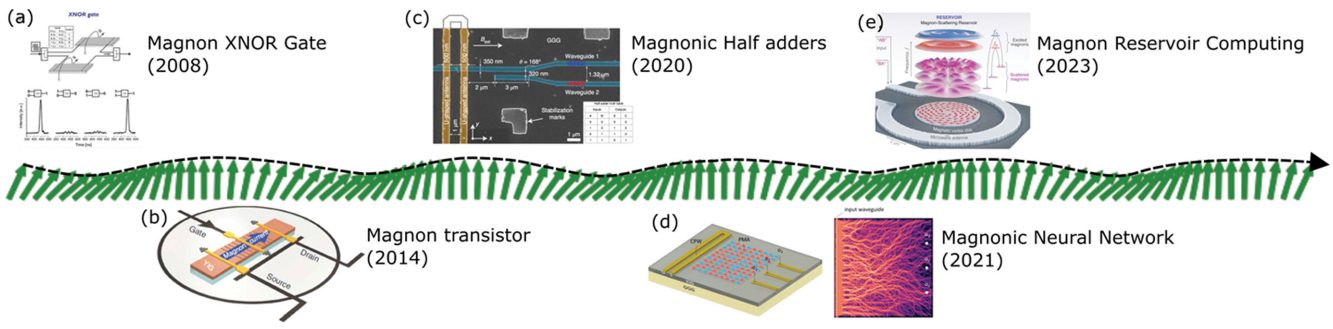

Fig. 1. (Color online) Examples of magnon based computing devices (a) Magnon XNOR gate [6] (b) Magnon transistor [7] (c) Magnon half adders [8] (d) Neural network system based on magnon nonlinear scattering [9] (e) Magnon reservoir computing for pattern recognition [10].

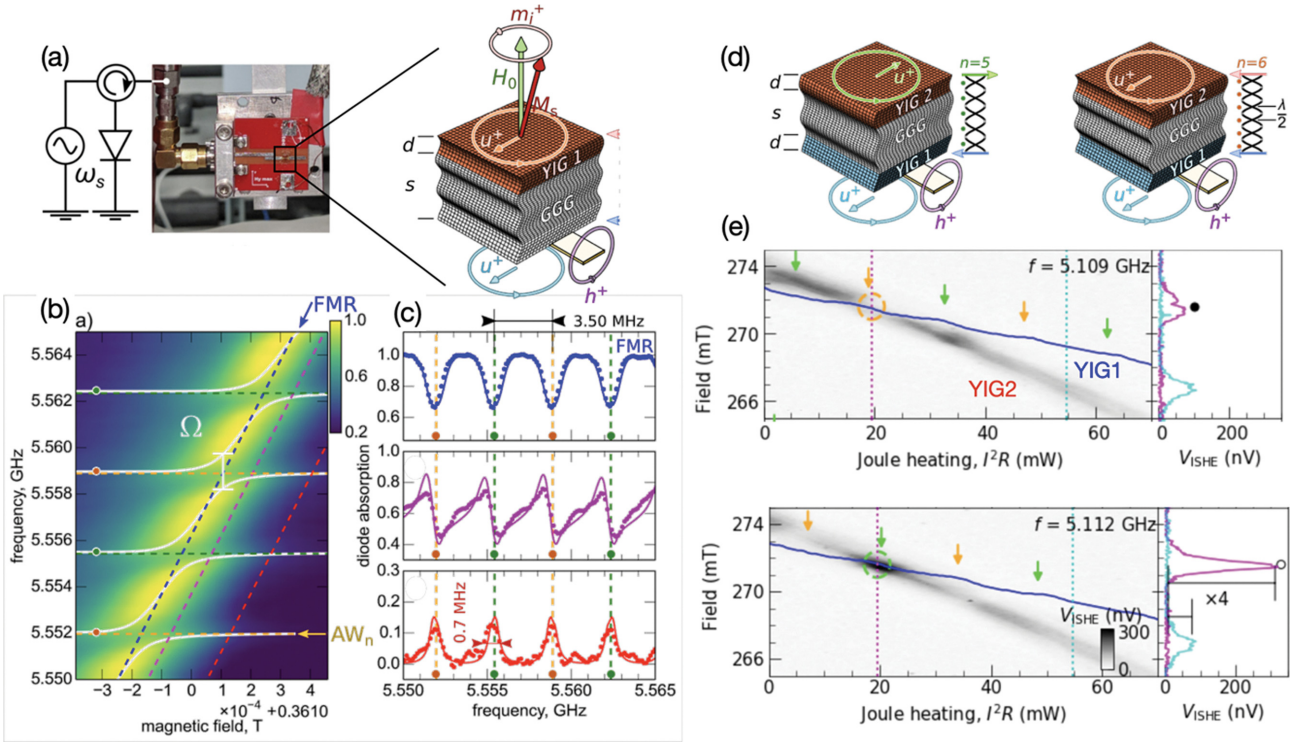

Fig. 2. (Color online) (a) Experimental setup for magnon-phonon coupling and a schematic of the sample. (b) Magnon resonance signal obtained from microwave absorption experiments, showing the observation of strong magnon-phonon coupling. (c) Variation in signal amplitude for three representative lines/traces from panel (b). (d) Magnon-phonon coupling in a YIG/spacer/YIG-like sandwich structure. Odd (left) and Even (right) phonon modes are generated, respectively. (e) Measured spin pumping intensity. At the intersection of the YIG1 and YIG2 magnon modes, the spin pumping signal exhibits up to a four-fold modulation due to coupling with either Even or Odd phonons. Figure reproduced from Ref. [14,15].

심 인터페이스로서 그 역할이 더욱 증대될 것으로 기대된다[17].

III. 마그논 비선형성과 뉴로모픽 컴퓨팅

인공지능 기술의 급격한 발전은 인간의 뇌가 정보를 처리하는 방식을 모방하여 에너지 효율적인 연산을 추구하는 뉴로모픽 컴퓨팅(neuromorphic computing)에 기반한다[18]. 뉴로모픽 시스템의 핵심은 입력 신호에 대한 비선형적(nonlinear) 응답이다. 선형 시스템에서는 입력과 출력 간의 관계가 단순 비례적으로 결정되기 때문에, 복잡한 데이터 속에서 의미 있는 특징을 추출하거나 새로운 지식을 학습하는 데 본질적인 한계를 가진다. 반면, 비선형성은 시스템이 다양한 입력 패턴에 대해 풍부하고 복잡한 동적 상태를 나타내도록 하며, 이는 마치 생물학적 뉴런이 특정 임계값 이상의 자극에 대해 활성화하는 것과 유사한 기능을 수행하여 신경망의 정보 처리 및 학습 능력을 구현하는 데 결정적인 역할을 한다. 마그논의 고유한 비선형 특성은 뉴로모픽 컴퓨팅을 위한 효과적인 물리적 플랫폼을 제공한다.

마그논의 비선형성을 뉴로모픽 시스템에 접목하기 위한 연구는 다양한 방향으로 전개되고 있다. 예를 들어, J. C. Gartside et al.에서는 강자성 공명(Ferromagnetic Resonance, FMR) 현상이나 자기 텍스처(magnetic texture)의 복잡한 동역학을 활용하여 뉴로모픽 기능을 구현하는 연구를 진행하고 있다[19]. 자성 박막이 평형 상태에 도달하는 과정에서 형성되는 자구벽 구조나 스핀 텍스처가 매번 미묘하게 달라질 수 있다는 점을 이용해 머신러닝과 같은 학습 과정에 활용한다. 또한, L. Körber, et al.에서는 자성 박막의 비선형 마그논을 이용하여 실제 패턴 인식 연산의 가능성을 실험적으로 시연하였으며, 마이크로 자기 시뮬레이션(muMax3)을 통해 그 실현 가능성을 구체화하였다[10].

마그논 비선형성을 효과적으로 제어하는 대표적인 실험 기법 중 하나는 파라메트릭 펌핑(parametric pumping)이다. 이는 강력한 마이크로파를 특정 주파수(ω_p)로 자성체에 인가하여, 펌프 에너지가 특정 역치값(threshold) 를 넘어서면 주파수가 $\omega_p/2$인 한 쌍의 마그논을 생성시킨다. 파라메트릭 펌핑을 통해 생성된 마그논들은 서로 위상 관계를 가질 수 있으며[20], 이들의 복잡한 상호작용은 뉴로모픽 컴퓨팅에 필수적인 풍부한 비선형 특성을 제공한다. 최근 연구에서는 VNA (vector network analyzer)의 주파수 오프셋 기능을 사용해

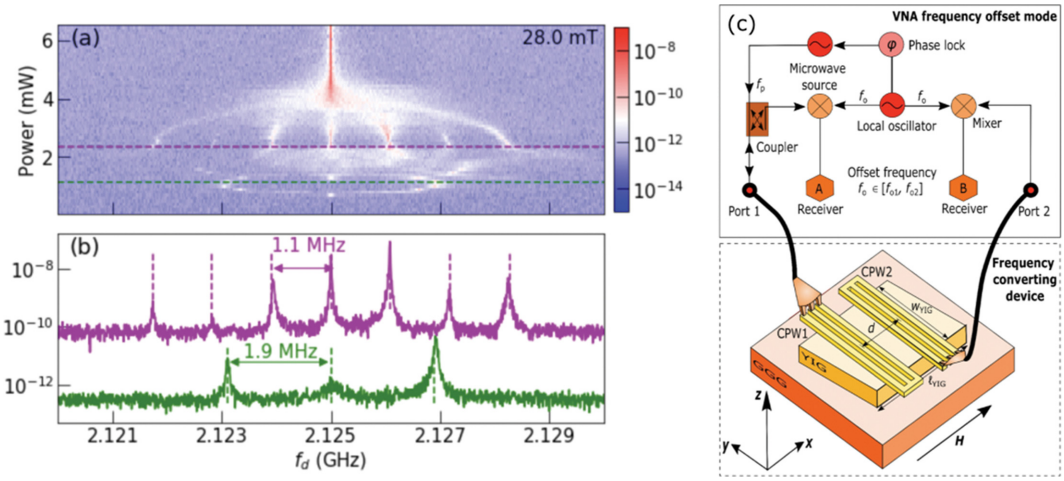

Fig. 3. (Color online) Parametric pumping of magnons (a) Frequency comb-like structure observed near half frequency (b) The frequency spacing sensitively depends on the external microwave power level. (c) VNA Frequency offset measurements to detect nonlinear frequency shifted magnons. Figure reproduced from Ref. [21].

성공적으로, 수 kHz의 주파수 분해능으로 파라메트릭 펌핑된 secondary 마그논들을 관측할 수 있었다[21][Fig. 3]. 이전 연구가 광학적 측정으로 시간이 오래 걸리는 반면[10], VNA를 통한 전기적 측정은 넓은 주파수 영역을 빠르고 미세하게 측정할 수 있는 장점이 있어, 앞으로 실제 산업에 응용될 가능성이 높다.

IV. 맺음말

본 리뷰는 마그논 스핀트로닉스의 최근 연구 동향을 (1) 마그논 기반 정보 전달·변환 기술과 (2) 마그논 비선형성을 활용한 뉴로모픽 컴퓨팅 이라는 두 축으로 심층 분석하였다. 마그논은 초저전력 에너지 전송, 위상 정보 인코딩, 정밀 제어가 가능한 비선형 동역학 등의 물리적 특성을 가지고 있다. 이는 기존 CMOS 기술이 직면한 한계를 보완하며, 새로운 대안이 될 수 있다.

특히 마그논-포논 결합과 같은 하이브리드 시스템은 상이한 정보 채널 간의 양방향 교환을 가능하게 하는 핵심 인터페이스로 주목받고 있다. 더불어, 마그논이 지닌 내재적 비선형성은 인간 뇌 기능을 모사하는 하드웨어 기반 뉴로모픽 연산에 최적의 물리 플랫폼을 제공함으로써 차세대 인공지능 소자의 새로운 방향을 제시한다. 이러한 기초 연구의 성과에 힘입어 실용적 마그논 소자의 개발이 가속화되고 있으며, 이는 미래 정보 처리 아키텍처의 핵심 구성 요소가 될 가능성을 보여준다.

그러나 마그논 기술이 실질적 혁신으로 도약하기 위해서는 여전히 해결해야 할 과제가 많다. 고효율 마그논 생성 및 검출, 나노 스케일에서의 특성 저하 억제, 저손실 나노구조 가공, 상온에서 우수한 특성을 유지하는 신소재 탐색, 복잡한 다중 모드 동역학의 이론적 규명, CMOS 플랫폼과의 하이브리드 집적화 등이 대표적이다. 향후 연구는 응집물질물리, 재료과학, 전자공학, 광학 등 학제 간 긴밀한 협력을 통해 확장될 전망이다. 이러한 다학제적 노력은 현재의 난제를 극복하고 새로운 돌파구를 마련함으로써, 마그논 스핀트로닉스가 에너지 효율적이고 지속 가능한 고성능 정보 처리 기술의 실현을 앞당기는 데 결정적 기여를 할 것이다. 더 나아가 마그논 연구는 스핀트로닉스를 넘어 응집물질물리 전반에 걸쳐 중요한 과학적 발견과 기술적 진보를 촉진할 것으로 기대된다. 마그논 연구자들의 창의적 도전을 통해 머지않아 마그논 기술이 일상 속에 깊이 자리 잡아, 정보 처리 기술의 새로운 지평을 여는 모습을 목격하게 되기를 기대한다.

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2021R1C1C2012269).

References

[1] K. Wang, Y. Zhang, Z. Wang, J.-O. Klein, C. Chappert, D. Ravelosona, G. Wang, Y. Zhang, and W. Zhao, ACM Journal on Emerging Technologies in Computing Systems **12**, 1 (2015).

[2] A. Mahmoud, F. Ciubotaru, F. Vanderveken, A. V. Chumak, S. Hamdioui, C. Adelmann, and S. Cotofana, J. Appl. Phys. **128**, 161101 (2020).

[3] H. Yu, O. d'Allivy Kelly, V. Cros, R. Bernard, P. Bortolotti, A.

Anane, F. Brandl, R. Huber, I. Stasinopoulos, and D. Grundler, Sci. Rep. **4**, 6848 (2014).
[4] G. Csaba, A. Papp, and W. Porod, J. Appl. Phys. **115**, 17C741 (2014).
[5] X. Liang, J. Tang, Y. Zhong, B. Gao, H. Qian, and H. Wu, Nature Electronics **7**, 193 (2024).
[6] T. Schneider, A. A. Serga, B. Leven, B. Hillebrands, R. L. Stamps, and M. P. Kostylev, Appl. Phys. Lett. **92**, 022505 (2008).
[7] A. V. Chumak, A. A. Serga, and B. Hillebrands, Nature Commun. **5**, 4700 (2014).
[8] Q. Wang, M. Kewenig, M. Schneider, R. Verba, F. Kohl, B. Heinz, M. Geilen, M. Mohseni, B. Lägel, F. Ciubotaru, C. Adelmann, C. Dubs, S. D. Cotofana, O. V. Dobrovolskiy, T. Brächer, P. Pirro, and A. V. Chumak, Nature Electronics **3**, 765 (2020).
[9] Á. Papp, W. Porod, and G. Csaba, Nature Commun. **12**, 6422 (2021).
[10] L. Körber, C. Heins, T. Hula, J.-V. Kim, S. Thlang, H. Schultheiss, J. Fassbender, and K. Schultheiss, Nature Commun. **14**, 3954 (2023).
[11] C. Kittel, Phys. Rev. **110**, 836 (1958).
[12] D. Lachance-Quirion, Y. Tabuchi, A. Gloppe, K. Usami, and Y. Nakamura, Appl. Phys. Express **12**, 070101 (2019).
[13] M. Settipalli, X. Zhang, and S. Neogi, J. Appl. Phys. **135**, 104401 (2024).
[14] K. An, A. N. Litvinenko, R. Kohno, A. A. Fuad, V. V. Naletov, L. Vila, U. Ebels, G. de Loubens, H. Hurdequint, N. Beaulieu, J. Ben Youssef, N. Vukadinovic, G. E. W. Bauer, A. N. Slavin, V. S. Tiberkevich, and O. Klein, Phys. Rev. B **101**, 060407 (2020).
[15] K. An, R. Kohno, A. N. Litvinenko, R. L. Seeger, V. V. Naletov, L. Vila, G. de Loubens, J. Ben Youssef, N. Vukadinovic, G. E. W. Bauer, A. N. Slavin, V. S. Tiberkevich, and O. Klein, Phys. Rev. X **12**, 011060 (2022).
[16] K. An, C. Kim, K.-W. Moon, R. Kohno, G. Olivetti, G. de Loubens, N. Vukadinovic, J. Ben Youssef, C. Hwang, and O. Klein, Phys. Rev. Appl. **20**, 014046 (2023).
[17] S. P. Wolski, D. Lachance-Quirion, Y. Tabuchi, S. Kono, A. Noguchi, K. Usami, and Y. Nakamura, Phys. Rev. Lett. **125**, 117701 (2020).
[18] J. Grollier, D. Querlioz, K. Y. Camsari, K. Everschor-Sitte, S. Fukami, and M. D. Stiles, Nature Electronics **3**, 360 (2020).
[19] J. C. Gartside, K. D. Stenning, A. Vanstone, H. H. Holder, D. M. Arroo, T. Dion, F. Caravelli, H. Kurebayashi, and W. R. Branford, Nature Nanotechnol. **17**, 460 (2022).
[20] T. Makiuchi, T. Hioki, Y. Shimazu, Y. Oikawa, N. Yokoi, S. Daimon, and E. Saitoh, Appl. Phys. Lett. **118**, 022402 (2021).
[21] K. An, M. Xu, A. Mucchietto, C. Kim, K.-W. Moon, C. Hwang, and D. Grundler, Nature Commun. **15**, 7302 (2024).