ISSN (Print) 1598-5385
ISSN (Online) 2233-6648
≪해설논문≫ Journal of the Korean Magnetics Society 36(4), 311-315 (2026) https://doi.org/10.4283/JKMS.2026.36.4.311

Strategies for Measuring Exchange Stiffness in Magnetic Films Across Different Thickness Regimes

Dae-Yun Kim*
Department of Physics, Ewha Womans University, Seoul 03760, Republic of Korea

(Received 25 June 2026, Received in final form 30 July 2026, Accepted 31 July 2026)

Exchange stiffness (A_{ex}) is a fundamental magnetic parameter that describes how strongly neighboring magnetic moments tend to align with each other in space. Because exchange stiffness is usually extracted indirectly, the appropriate measurement strategy depends strongly on the sample structure and magnetic-layer thickness regime. In this review article, we summarize representative methods for measuring exchange stiffness across different magnetic-layer thickness regimes. In particular, we introduce domain-wall-based measurement strategies for the ultrathin regime below 1 nm and spin-wave-dispersion-based methods for magnetic films with thicknesses of several nanometers. For thicker magnetic films, we discuss exchange-stiffness extraction methods based on perpendicular standing spin-wave (PSSW) modes. Finally, we summarize the advantages and limitations of each approach and discuss cross-validation strategies across different thickness regimes.

Keywords : exchange stiffness, magnetic film, magnetic domain wall, spin wave

자성 박막의 두께 영역에 따른 교환강성 측정 전략

김대연*
이화여자대학교 물리학과, 서울특별시 서대문구 이화여대길 52, 03760

(2026년 6월 25일 받음, 2026년 7월 30일 최종수정본 받음, 2026년 7월 31일 게재확정)

교환강성(exchange stiffness, A_{ex})은 자성체 내에서 인접한 자기모멘트가 공간적으로 얼마나 강하게 정렬되려 하는지를 나타내는 기본 물성이다. 교환강성은 대부분 간접적인 방식으로 추출되기 때문에 시료의 구조와 두께 영역에 따라 적절한 측정 전략이 달라진다. 본 해설논문에서는 자성층 두께 영역에 따라 교환강성을 측정하는 대표적인 방법들을 정리한다. 특히 1 nm 미만의 초박막 영역에서는 자구벽을 기반으로 한 측정 전략을 소개하고, 수 nm 두께의 박막 영역에서는 스핀파 분산을 이용한 측정법을 소개한다. 또한 더 두꺼운 자성 박막에서는 자기 공명으로 관측되는 수직 정재 스핀파 모드를 이용한 교환강성 추출법을 설명한다. 마지막으로 각 방법의 장점과 한계, 그리고 두께 영역에 따른 상호 검증 전략을 제시한다.

주제어 : 교환강성, 자성 박막, 자구벽, 스핀파

I. 서 론

강자성체에서 교환 상호작용은 인접한 자기모멘트들이 서로 평행하게 정렬되도록 하는 가장 기본적인 상호작용이다. 연속체 근사에서 이러한 교환 상호작용은 자화 방향 m의 공간적 변화에 대한 에너지 비용으로 표현되며, 일반적으로 다음과 같은 형태로 주어진다.

$$E_{ex} = A_{ex} \int (\nabla \mathbf{m})^2 \, dV \tag{1}$$

여기서 A_{ex}는 교환강성(exchange stiffness)으로, 자화 방향이 공간적으로 변화할 때 시스템이 지불해야 하는 에너지 비용의 크기를 나타낸다. 따라서 A_{ex}가 클수록 자화는 공간적으로 완만하게 변하려 하며, 자구벽 두께는 넓어지고 스핀파 분산에서 교환 에너지의 기여는 커진다. 반대로 A_{ex}가 작을수록 자화 구조는 더 짧은 길이 척도에서 변화할 수 있으며, 자구벽이나 스커미온과 같은 자기 구조체의 크기도 작아질 수 있다. 이처럼 교환강성은 자성체의 정적 자기 구조와 동적 자화 거동을 동시에 지배하는 핵심 물리량이다.

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.
*Corresponding author: Tel: +82-2-3277-3444, e-mail: daeyun@ewha.ac.kr

교환강성은 자화의 공간적 비균일성과 관련된 물성이므로, 일반적으로 자구벽, 스핀파, 또는 두께 방향 정재 스핀파와 같이 공간적으로 변화하는 자화 구조나 동역학을 통해 간접적으로 추출된다. 따라서 교환강성 측정법은 시료의 두께, 자기이방성, 계면 효과, 잘로신스키-모리야 상호작용 (Dzyaloshinskii-Moriya interaction, DMI), 표면 피닝 조건 등에 따라 달라질 수밖에 없다.

가장 대표적인 측정법 중 하나는 자구벽이라는 비균일 자화 구조를 이용하는 것이다. 수직 자기 이방성을 갖는 박막에서 서로 반대 방향으로 자화된 두 자구 사이에는 자구벽이 형성되며, 이때 자화 방향은 유한한 두께에 걸쳐 연속적으로 회전한다. 자구벽의 두께는 교환 에너지와 자기 이방성 에너지 사이의 경쟁으로 결정되므로, 자구벽의 구조, 장력, 또는 동역학을 분석하면 교환강성에 접근할 수 있다. 특히 1 nm 미만의 초박막 자성층에서는 계면 효과가 강하고 두께 방향 스핀파 모드를 관측하기 어려운 경우가 많기 때문에, 자구벽 기반 방법이 중요한 측정 전략이 될 수 있다.

스핀파 역시 교환강성과 밀접하게 관련되어 있다. 스핀파의 파수가 커질수록 인접한 자기모멘트 사이의 상대적인 기울어짐이 커지므로, 교환 에너지의 기여가 증가한다. 많은 경우 스핀파 분산식에는 $A_{ex}k^2$에 비례하는 교환 항이 포함되며, 여러 파수에서 스핀파 주파수를 측정하면 분산 곡선의 형태로부터 A_{ex}를 추출할 수 있다. 이러한 원리에 기반한 브릴루앙 빛 산란(Brillouin light scattering, BLS) 측정은 수 nm 두께의 자성 박막에서 교환강성을 분석하는 데 널리 활용될 수 있다. 한편 더 두꺼운 자성층에서는 두께 방향으로 양자화된 수직 정재 스핀파(perpendicular standing spin wave, PSSW) 모드가 형성될 수 있으며, 자기 공명 측정을 통해 이러한 모드 간격을 분석함으로써 교환강성을 결정할 수 있다.

이처럼 교환강성은 하나의 보편적인 방법으로 직접 측정되는 물성이 아니라, 자성층의 두께 영역과 시료 특성에 따라 적절한 측정 전략을 선택해야 하는 물성이다. 본 해설논문은 자성 박막의 두께 영역에 따라 교환강성 측정법이 어떻게 달라지는지를 정리하는 것을 목적으로 한다. 2절에서는 1 nm 미만의 초박막 영역에서 자구벽을 이용한 교환강성 측정 전략을 설명한다. 3절에서는 수 nm 두께의 박막에서 BLS를 이용한 스핀파 분산 측정법을 논의한다. 4절에서는 상대적으로 두꺼운 자성층에서 수직 정재 스핀파 모드를 이용한 방법을 소개한다.

II. 초박막 영역(t < 1 nm): 자구벽 기반 교환강성 측정법

자성층의 두께가 1 nm 미만인 초박막 영역에서는 자성체의 물성이 벌크와 크게 달라진다. 계면 자기 이방성, 계면 DMI, dead layer, 거칠기, 층간 혼합 등이 중요한 역할을 하며, 자성층 전체가 사실상 계면의 영향을 강하게 받는 준이차원적 시스템이 된다. 이 영역에서는 두께 방향으로 형성되는 수직 정재 스핀파 모드를 관측하기 어렵고, 스핀파 신호 자체가 매우 약할 수 있다. 반면 자구와 자구벽은 광학 현미경 또는 Kerr 현미경으로 비교적 직접 관찰할 수 있으므로, 자구벽 기반 방법이 강력한 대안이 될 수 있다.

1. 자구벽 장력 분석을 통한 측정

자구벽은 유한한 자구벽 에너지를 가지므로, 그 길이를 줄이려는 장력과 유사한 효과를 나타낸다. 수직 자기 이방성을 갖는 박막에서 원형 자구가 형성되면, 자구벽 장력은 원형 자구를 수축시키는 방향으로 작용한다. 따라서 원형 자구의 팽창 또는 수축 동역학을 분석하면 자구벽 에너지 σ_{DW}를 추정할 수 있고, 이를 통해 교환강성 A_{ex}에 접근할 수 있다[1].

이 방법의 핵심은 원형 자구의 반지름 r에 따른 자구벽 속도 변화를 측정하는 것이다. 외부 수직 자기장이 일정하더라도, 작은 반지름 영역에서는 자구벽 장력에 의한 유효장이 추가로 작용하여 자구벽 속도가 r에 의존할 수 있다. 자구벽 속도가 creep regime에 있다고 가정하면, 측정된 속도 $v(r)$를 creep scaling을 이용해 총 유효장 $H_{tot}(r)$으로 환산할 수 있으며, 여기서 외부 자기장 H_{ext}를 빼면 자구벽 장력에 의한 국소 유효장 $H_{eff}(r)$을 얻을 수 있다.

자구벽 장력에 의한 유효장은 대략 $1/r$에 비례하므로, $H_{eff}(r)$를 $1/r$에 대해 나타냈을 때의 기울기로부터 자구벽 에너지 σ_{DW}를 추정할 수 있다(Fig. 1). DMI를 무시할 수 있

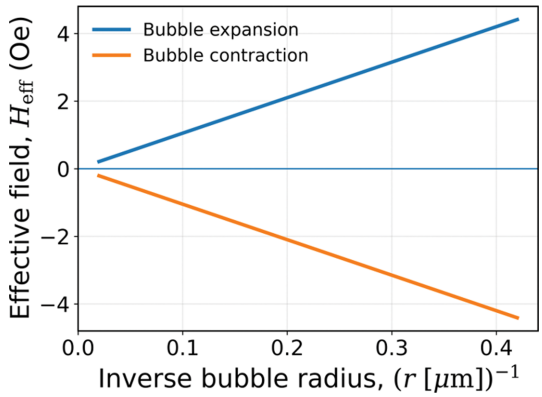

Fig. 1. (Color online) Schematic illustration of domain-wall-tension-based exchange-stiffness extraction. The effective field induced by domain-wall tension varies approximately linearly with the inverse bubble-domain radius, $1/r$. From the slope of H_{eff} versus $1/r$, the domain-wall energy σ_{DW} can be estimated, allowing the exchange stiffness A_{ex} to be extracted when the effective magnetic anisotropy is known.

는 경우, Bloch형 자구벽 에너지는 다음과 같이 주어진다.

$$\sigma_{DW} = 4\sqrt{A_{ex}K_{eff.}} \quad (2)$$

따라서 자구벽 장력 분석으로 σ_{DW}를 얻고, hard-axis 자기 이력 곡선 등으로부터 유효 자기 이방성 에너지 $K_{eff.}$를 알면 최종적으로 A_{ex}를 추출할 수 있다.

이 방법은 실제 자구벽 동역학에서 작용하는 자구벽 에너지를 반영한다는 장점이 있다. 반면 creep scaling의 적용 가능성, 자구벽 pinning, 원형 자구의 형상 안정성, 자기쌍극자 상호작용 등이 분석에 영향을 줄 수 있으므로 주의가 필요하다.

2. 자구벽의 카이럴 구조 전이 분석을 통한 측정

수직 자기 이방성을 갖는 박막에서 자구벽은 Bloch형 또는 Neel형의 카이럴 구조를 가질 수 있으며, Bloch형과 Neel형 사이의 카이럴 구조 전이에 필요한 수평 방향 자기장의 세기 H_S를 실험을 통해 구해낼 수 있다(Fig. 2). H_S는 다음과 같이 자구벽 두께 λ_{DW}와 밀접하게 관련되어 있으며, 초박막 조건에서 근사적으로 다음과 같이 표현될 수 있다. $\lambda_{DW} = \frac{2\ln 2}{\pi^2} M_S t (H_S)^{-1}$. 따라서 실험적으로 H_S, M_S(포화자화), t(자성층 두께)를 구하면 λ_{DW}의 정량적인 값을 얻어낼 수 있다. 자구벽 두께 λ_{DW}는 교환강성과 유효 자기 이방성의 경쟁으로 결정되며, 다음과 같이 표현된다.

$$\lambda_{DW} = \sqrt{A_{ex} / K_{eff.}} \quad (3)$$

따라서 실험적으로 구해낸 λ_{DW} 값을 이용하여, 최종적으로 교환강성의 정량적인 값을 추출해 낼 수 있다[2].

이 방법의 장점은 MOKE 기반 자구벽 측정을 활용하므로 수 원자층 두께의 초박막 자성층에도 적용 가능하다는 점이다. 또한 자구벽 내부 구조의 전이를 이용해 자구벽 두께를 추정하므로, 초박막에서 기존 BLS나 FMR 방법의 신호가 약한 경우 유용한 대안이 될 수 있다.

III. 박막 영역: 스핀파 기반 교환강성 측정법

자성층 두께가 대략 1~10 nm 수준이 되면, 자구벽 기반 방법뿐 아니라 스핀파 분산을 이용한 교환강성 측정이 가능해진다. BLS는 입사광과 열적으로 여기된 스핀파 사이의 비탄성 산란을 이용하여 스핀파의 주파수를 측정하는 방법이다. 입사광과 산란광의 각도를 조절하면 특정 파수 k를 갖는 스핀파를 선택적으로 측정할 수 있으므로, 여러 k 값에서 스핀파 주파수 $f(k)$를 얻고 이를 분산식에 맞추어 A_{ex}를 추출할 수 있다[3-5].

이러한 BLS 기반 방법에서 교환강성은 스핀파 분산식의 k^2 항에 주로 반영된다. 이는 파수 k를 갖는 스핀파에서 자화 방향이 공간적으로 변하면서 교환 에너지가 증가하고, 이 교환 에너지가 자화 동역학에서 유효 자기장처럼 작용하기 때문이다. 이때 교환 에너지에 의해 발생하는 교환 유효장 H_{ex}은 단순화하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$H_{ex}(k) = [2A_{ex} / \mu_0 M_S] k^2 \quad (4)$$

따라서 여러 k에서 측정한 스핀파 주파수의 분산 형태, 특히 k^2에 비례하는 교환 기여를 분석하면 A_{ex}를 추출할 수 있다 (Fig. 3).

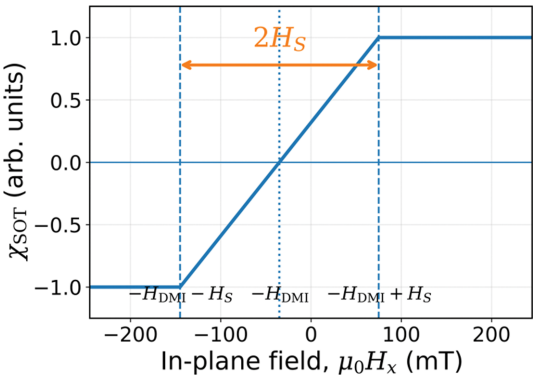

Fig. 2. (Color online) Schematic illustration of domain-wall-chirality-transition-based exchange-stiffness extraction. The spin-orbit-torque efficiency χ_{SOT} changes as the domain-wall internal magnetization evolves between opposite Neel configurations through a Bloch-like state under an in-plane magnetic field. The center of the transition is shifted by the DMI effective field, $-H_{DMI}$, while the transition width is determined by $2H_S$. The characteristic field H_S can be used to estimate the domain-wall width λ_{DW}, and hence the exchange stiffness A_{ex}.

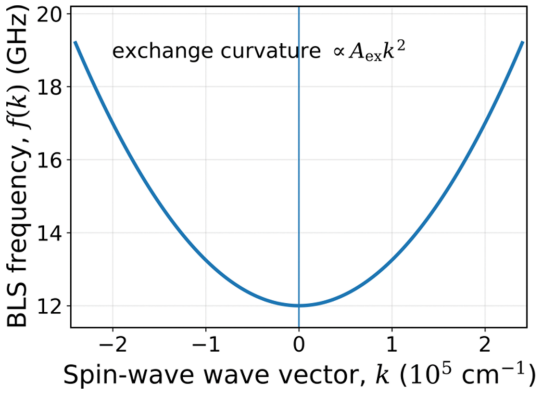

Fig. 3. (Color online) Schematic illustration of spin-wave-dispersion-based exchange-stiffness extraction using Brillouin light scattering. The spin-wave frequency $f(k)$ varies with the wave vector k, and the curvature of the dispersion reflects the exchange contribution proportional to $A_{ex}k^2$. Fitting the measured spin-wave dispersion therefore provides a route to determine A_{ex}.

이 방법은 자구벽과 같은 비선형 자기 구조체를 만들 필요 없이 균일 자화 상태의 스핀파를 측정한다는 장점이 있다. 또한 DMI가 존재하는 계면 박막에서는 $+k$와 $-k$ 방향 스핀파의 비상반성 주파수 차이가 나타날 수 있으므로, BLS를 이용하면 DMI와 교환강성을 동시에 분석할 수도 있다.

그러나 BLS 기반 측정에는 몇 가지 주의점이 있다. 첫째, 매우 얇은 자성층에서는 산란 신호가 약할 수 있으며, capping layer나 seed layer의 광학적 특성에 따라 측정 감도가 달라진다. 둘째, 계면 자기 이방성, DMI, 표면 거칠기, 두께 불균일성 등이 분산식 피팅에 영향을 줄 수 있다. 셋째, BLS가 측정하는 파수 영역은 실험 기하학에 의해 제한되므로, 추출된 A_{ex}가 모든 길이 척도에서 동일한 값으로 해석될 수 있는지 검토해야 한다.

따라서 1~10 nm 두께 영역에서는 BLS를 주된 측정법으로 사용하되, 가능한 경우 자구벽 기반 방법이나 자기 공명 결과와 비교하는 것이 바람직하다. 특히 1~3 nm 수준의 얇은 박막에서는 BLS 신호와 모델 의존성이 문제가 될 수 있으므로, 자구벽 기반 방법과의 상호 검증이 중요하다. 반면 5~10 nm 수준으로 두꺼워질수록 BLS 스핀파 분산 분석의 신뢰도는 상대적으로 높아질 수 있다.

IV. 두꺼운 자성층: PSSW 기반 교환강성 측정법

자성층이 수십 nm 이상으로 두꺼워지면 두께 방향의 자화 동역학을 이용한 교환강성 측정이 가능해진다. 이 두께 영역에서는 자성층 내부에서 두께 방향으로 정재파 형태의 스핀파 모드가 형성될 수 있으며, 이를 수직 정재 스핀파(PSSW) 모드라고 한다. PSSW 모드는 두께 방향으로 양자화된 스핀파 모드이므로, 각 모드의 공명 조건이 자성층 두께와 교환강성에 의해 결정된다.

PSSW 기반 교환강성 측정의 기본 절차는 다음과 같이 정리할 수 있다. 먼저 broadband ferromagnetic resonance, cavity FMR, 또는 vector network analyzer 기반 microwave spectroscopy를 이용하여 자성 박막의 공명 스펙트럼을 측정한다. 이때 가장 낮은 주파수의 uniform mode와 함께 고차 PSSW 모드가 관측될 수 있다. 이후 각 모드의 공명 주파수 또는 공명 자기장을 mode index n에 따라 분석하고, 이론적인 PSSW 공명 조건에 피팅하여 교환강성 A_{ex}를 추출한다[6-8].

PSSW 모드의 두께 방향 파수는 이상적인 경우 다음과 같이 쓸 수 있다. $k_n = n\pi/t$. 이 모드의 교환 에너지는 $(k_n)^2$에 비례하므로, 고차 모드로 갈수록 교환 에너지의 기여가 커진다. 자화 동역학에서 이 교환 에너지는 교환 유효장 형태로 작용하며, n번째 PSSW 모드에 대한 교환 유효장은 다음과 같이 표현될 수 있다.

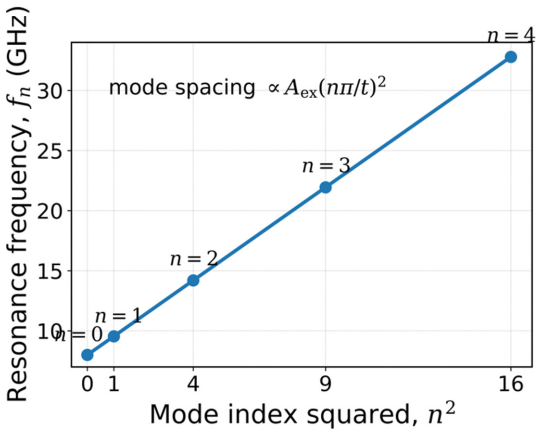

Fig. 4. (Color online) Schematic illustration of exchange-stiffness extraction from perpendicular standing spin-wave modes. In thicker magnetic films, the spin-wave wave vector is quantized along the film thickness, $k_n = n\pi/t$. The resonance frequency of each mode increases with n^2 through the exchange contribution proportional to $A_{ex}(n\pi/t)^2$. Thus, the mode spacing provides a quantitative measure of the exchange stiffness.

$$H_{ex}^{(n)} = \left(2A_{ex} / \mu_0 M_S\right)\left(n\pi / t\right)^2 \tag{5}$$

따라서 uniform mode와 고차 PSSW 모드 사이의 공명 주파수 또는 공명 자기장 차이는 A_{ex}에 의해 결정된다. 여러 PSSW 모드가 관측되는 경우, mode index에 따른 공명 조건을 함께 피팅함으로써 A_{ex}를 보다 체계적으로 추출할 수 있다(Fig. 4).

FMR/PSSW 기반 방법의 장점은 비교적 명확한 공명 스펙트럼을 이용한다는 점이다. 특히 두꺼운 자성층에서는 여러 PSSW 모드를 동시에 관측할 수 있으므로, 단일 모드가 아니라 모드 간 간격을 이용한 분석이 가능하다. 또한 FMR은 감도가 높고 실험적으로 널리 사용되는 방법이므로, 금속 박막, 산화물 박막, 다층 박막 등 다양한 물질계에 적용할 수 있다.

그러나 이 방법은 표면 및 계면 경계조건에 민감하다. 위 식에서는 PSSW 모드의 파수가 단순히 $n\pi/t$으로 주어진다고 가정하지만, 실제 시료에서는 표면 pinning, 계면 이방성, capping layer, dead layer, 두께 불균일성 등에 의해 경계조건이 달라질 수 있다. 이러한 효과를 고려하지 않으면 추출된 A_{ex}가 두께나 모드 번호에 따라 비물리적으로 달라질 수 있다. 따라서 FMR/PSSW 방법을 사용할 때에는 단순한 rigid pinning 가정에만 의존하기보다, 시료의 표면 상태와 경계조건을 함께 고려하는 것이 중요하다.

V. 결 론

본 해설논문에서는 자성층 두께 영역에 따른 교환강성 측정 전략을 정리하였다. 교환강성은 자구벽 두께, 자구벽 에너

지, 스핀파 분산, 스커미온 안정성 및 자화 동역학을 결정하는 핵심 물성이지만, 박막 자성체에서는 계면 효과와 두께 의존성이 강하게 작용하므로 단일한 측정법으로 보편적으로 결정하기 어렵다.

1 nm 미만의 초박막 영역에서는 자구벽 기반 방법이 중요한 역할을 한다. 자구벽 장력 및 자구벽 카이럴 구조 전이 분석을 통해 교환강성에 접근할 수 있으며, 특히 계면 DMI가 강한 박막에서 유용하다. 1~10 nm 두께의 박막 영역에서는 BLS를 이용한 스핀파 분산 측정이 효과적이며, k^2 교환 항으로부터 A_{ex}를 추출할 수 있다. 더 두꺼운 자성층에서는 자기 공명 및 PSSW 모드 분석이 적합하며, 두께 방향으로 양자화된 스핀파 모드 간격을 이용해 교환강성을 결정할 수 있다.

References

[1] K.-W. Moon, J.-C. Lee, S.-G. Je, K.-S. Lee, K.-H. Shin, and S.-B. Choe, Appl. Phys. Express **4**, 043004 (2011).

[2] Y.-S. Nam, D.-Y. Kim, Y.-K. Park, J.-S. Yu, S.-H. Lee, D.-H. Kim, B.-C. Min, and S.-B. Choe, Appl. Phys. Lett. **121**, 072403 (2022).

[3] X. Liu, M. M. Steiner, and R. Sooryakumar, Phys. Rev. B **53**, 12166 (1996).

[4] J. Hamrle, O. Gaier, S.-G. Min, B. Hillebrands, Y. Sakuraba, and Y. Ando, J. Phys. D: Appl. Phys. **42**, 084005 (2009).

[5] J. Cho, J. Jung, S.-Y. Cho, and C.-Y. You, J. Magn. Magn. Mater. **395**, 18 (2015).

[6] C. Kittel, Phys. Rev. **110**, 1295 (1958).

[7] G. T. Rado and J. R. Weertman, J. Phys. Chem. Solids **11**, 315 (1959).

[8] H. J. Waring, Y. Li, N. A. B. Johansson, C. Moutafis, I. J. Vera-Marun, and T. Thomson, J. Appl. Phys. **133**, 063901 (2023).