

## Tuning of Magnetic Properties through Ru Spacer Thickness in CoFeB/Ru/NiFe Trilayer Structures

Hojeong Oh, Jaeyun Choi, and Tae-Hwan Kim

Department of Physics and Chemistry, DGIST, Daegu 42988, Korea

Jaehun Cho and June-Seo Kim\*

Division of Nanotechnology, Institute of Convergence, DGIST, Daegu 42988, Republic of Korea

(Received 5 December 2025, Received in final form 16 December 2025, Accepted 17 December 2025)

We investigated the magnetic properties of a  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Ru}/\text{Co}_{20}\text{Fe}_{60}\text{B}_{20}$  magnetic multilayers designed as a free layer for in-plane tunnel magnetoresistance sensors. Films with the stack  $\text{Ta}/\text{Ru}/\text{Ta}/\text{Ru}/\text{Ta}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  (70 nm)/Ru ( $t_{\text{Ru}}$ )/ $\text{Co}_{20}\text{Fe}_{60}\text{B}_{20}$  (3 nm) is deposited by DC magnetron sputtering. Magnetic hysteresis loops were recorded by longitudinal magneto-optical Kerr effect (MOKE) while rotating the in-plane azimuth for  $t_{\text{Ru}} = 0.3$  and 0.9 nm. To map the Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida (RKKY) interlayer coupling versus spacer thickness, additional MOKE measurements were performed over  $t_{\text{Ru}} = 0.3\sim 2.6$  nm. The first antiferromagnetic coupling maximum appeared at  $t_{\text{Ru}} \approx 0.9$  nm, and the second half-period near  $t_{\text{Ru}} \approx 2.0$  nm. We also carried out a single field-anneal and confirmed a rotation of the in-plane magnetic anisotropy axis induced by annealing.

**Keywords** : RKKY, uniaxial inplane anisotropy, Magneto-optic Kerr effect

## CoFeB/Ru/NiFe 구조에서의 Ru 두께 변화에 따른 자성특성에 관한 연구

오호정 · 최재윤 · 김태환

대구경북과학기술원 화학물리학과, 대구시 달성군 현풍읍 테크노중앙대로 333, 42988

조재훈 · 김준서\*

대구경북과학기술원 나노기술연구부, 대구시 달성군 현풍읍 테크노중앙대로 333, 42988

(2025년 12월 5일 받음, 2025년 12월 16일 최종수정본 받음, 2025년 12월 17일 게재확정)

본 연구에서는 inplane 터널링 자기저항 센서의 자유층으로 연구되고 있는  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Ru}/\text{Co}_{20}\text{Fe}_{60}\text{B}_{20}$  구조에 대한 자성특성에 대하여 연구하였다. DC 마그네트론 스퍼터링 시스템을 이용하여 Ta/Ru/Ta/Ru/Ta 버퍼층 위에  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  (70 nm)/Ru ( $t_{\text{Ru}}$  nm)/ $\text{Co}_{20}\text{Fe}_{60}\text{B}_{20}$  (3 nm) 구조의 자성박막을 제작하였다.  $t_{\text{Ru}} = 0.3, 0.9$  nm에서 방위각을 바꾸어 가면서 광자기커효과(Magneto-optical Kerr effect, MOKE) 실험을 통하여 자기이력곡선을 확인하였고,  $t_{\text{Ru}}$ 는 0.3~2.6 nm 범위에서 MOKE 실험을 수행하여 Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida 상호작용의 특성을 확인하였다. 첫번째 반강자성특성이 나타나는 Ru의 두께는 0.9 nm이고, 두 번째 반주기는 2.0 nm이다. 또한 외부 자기장을 인가하면서 열처리를 하여 열처리에 따른 자기 이방성 축의 변화를 확인하였다.

**주제어** : RKKY, 면내 일축 이방성, 광자기커효과

### I. 서 론

자기저항 센서는 감지 원리에 따라 비등방성 자기저항 (anisotropic magnetoresistance, AMR), 평면 홀 자기저항

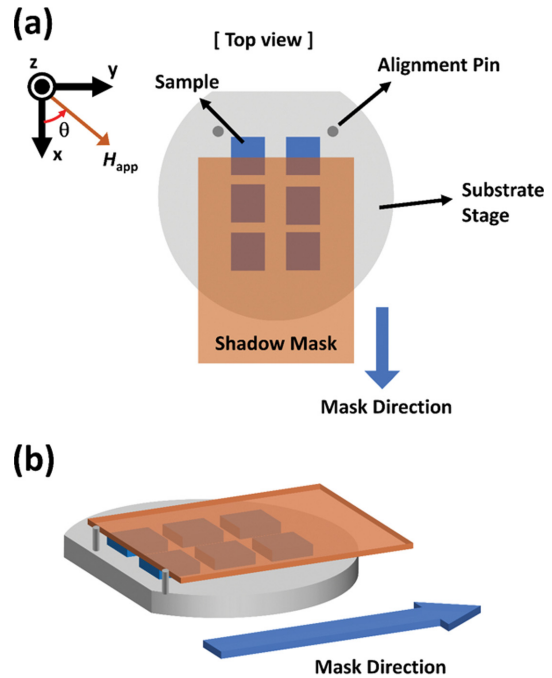
(planar hall magnetoresistance, PHMR), 거대자기저항(giant magnetoresistance, GMR), 터널링 자기저항(tunneling magnetoresistance, TMR) 센서로 구분할 수 있다[1-4]. 이들 중 TMR 센서는 매우 높은 감도와 낮은 소비전력, 미세한

자기장에도 감지가 가능하여 전기자동차에 배터리 시스템, 조향각 측정, ABS의 센서 등에 응용이 가능하다[5-9]. 또한 TMR 센서는 높은 MR 비와 낮은 구동 자장을 동시에 요구하며, 이를 위해 고정층과 자유층의 역할이 명확히 구분된 자기터널접합(magnetic tunnel junction; MTJ) 구조가 널리 사용되고 있다. CoFeB는 MgO 장벽과의 결정학적 정합에 의해 매우 큰 스핀 분극을 제공하여 실온에서 200% 이상의 높은 TMR 비를 구현하는 대표적 하드 자성 재료이며, 열처리(annealing) 과정에서 CoFe로 결정화되면서  $\Delta I$  대칭 전도채널을 형성하여 센서의 기본 감도와 신호대잡음비를 결정한다[10-12]. 반면 자유층에는 외부 자기장에 민감하게 반응해야 하므로 coercivity가 낮고 이방성이 작은 NiFe가 가장 널리 사용되며, 이는 선형 관측 범위를 확보하고 저주파 영역에서의 노이즈를 억제하는 데 중요한 역할을 한다[12-14]. 또한 CoFeB 층과 NiFe 층이 Ru 중간층으로 결합한 구조를 가지는 자유층은 높은 MR 비와 안정적인 연자성 반응을 동시에 만족시킬 수 있어 고감도 TMR 센서 개발에서 핵심 구조로 여겨지며, 자유층의 이방성 자기장( $H_k$ )과 교환결합 특성은 최종 감도(TMR -ratio/ $2H_k$ )를 결정하는 주요 공정 변수가 된다[15].

본 연구에서는 DC 마그네트론 스퍼터링 방법으로 제작된 TMR센서에서 자유층으로 사용되는 NiFe/Ru/CoFeB 자성박막의 자성특성을 연구하기 위하여 Ta (5 nm)/Ru (5 nm)/(Ta 10 nm)/Ru (10 nm)/Ta (5 nm)의 버퍼층 위에  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  (70 nm)/Ru ( $t_{\text{Ru}}$  nm)/ $\text{Co}_{20}\text{Fe}_{60}\text{B}_{20}$  (3 nm)을 증착하여 광자기 커 효과 장치로 방위각 변화에 따른 자성특성 변화와 Ru 층의 두께 변화에 대한 자기이력곡선을 측정하여 자성특성을 확인하였다. 또한 시료의 면방향으로 자기장을 인가하면서 열처리하여 열처리가 자성박막에 끼치는 영향도 알아보았다.

## II. 실험 방법

본 연구에서 사용된 시료들은 스퍼터링 챔버 내에서 12 mm × 12 mm 크기의  $\text{SiO}_2$ 를 열적으로 100 nm 산화시킨 Si 기판 위에 DC 마그네트론 스퍼터링방식으로 제작되었다. 챔버 내부의 진공도는 극저온 펌프(cryo pump)를 이용하여  $5 \times 10^{-9}$  Torr 수준의 초기 진공도를 형성하였으며 고순도 아르곤(Ar) 가스를 주입하여  $2 \times 10^{-3}$  Torr 수준의 작업 압력을 형성한 후 증착을 진행하였다. Fig. 1(a)에 나타나듯 기판은 지름 101.6 mm 크기의 원형 샘플 스테이지 중심에 위치해 있으며 샘플 스테이지와 스퍼터링 건은 서로 면 대 면 방향으로 위치하였다. 증착 초기에 alignment pin에 shadow mask를 위치시키고, 시간 경과에 따라서 shadow mask의 위치를 이동시켜 시료의 증착 두께를 조절할 수 있다. 본 연구에서는 Ru 층을 증착할 때 shadow mask의 위치를 조절함에 따라서



**Fig. 1.** (Color online) (a) Top view of the face-to-face DC magnetron sputtering geometry with the sample at the center of a 101.6 mm stage and an alignment pin guiding the shadow-mask travel. (b) Schematic of the shadow-mask translation used to tune the Ru spacer thickness during deposition.

Ru층의 두께를 변화시켰다. Shadow mask의 동작은 Fig. 1(b)에 모식화하였다. Ru 두께에 의한 자성특성을 연구하기 위하여 Ta (5 nm)/Ru (5 nm)/(Ta 10 nm)/Ru (10 nm)/Ta (5 nm)의 버퍼층 위에  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  (70 nm)/Ru ( $t_{\text{Ru}}$  nm)/ $\text{Co}_{20}\text{Fe}_{60}\text{B}_{20}$  (3 nm)을 증착 후 산화를 방지하기 위하여 4 nm 두께의 Ta를 증착하였다. 이때  $t_{\text{Ru}}$ 은 0.3~2.6 nm이다. 증착된 박막들의 자기적 성질은 광자기 커 효과 장비(Magneto-Optical Kerr Effect, MOKE)를 통해 확인하였다. MOKE는 Quantum design사의 nanomoke3을 이용하여, 시료의 면방향과 평행하게 자기장을 인가하는 Longitudinal MOKE를 측정하였다. 측정시 인가된 최대 자기장의 크기는  $\pm 10$  mT이며 시편 중심에서 지름 약 10  $\mu\text{m}$ 의 원형 영역에서의 자기이력곡선을 측정하였다. 측정 시에는 레이저 입사광의 방향을 고정한 채 시료를 회전시켜, 모든 각도에서 longitudinal geometry를 유지한 상태로 MOKE 신호를 획득하였다. 또한, 열처리에 의한 자기적 성질의 변화를 확인하기 위해 300 mT의 외부 자기장,  $H_{\text{ext}}^{\text{annealing}}$ 을 시료의 면방향으로 인가하며 250°C 온도에서 2시간 동안 열처리를 진행하였다. 전기적으로 온도 조절이 가능한 열 판(hot plate) 위에 시편을 고정시킨 상태에서 15°C/min 속도로 온도를 상승시켰으며 열처리 후 hot plate의 전원 공급을 멈춘 상태로 30분에 걸쳐 상온까지 온도를 하강시켰다. 모든 열처리 공정은 원통형 챔버 내

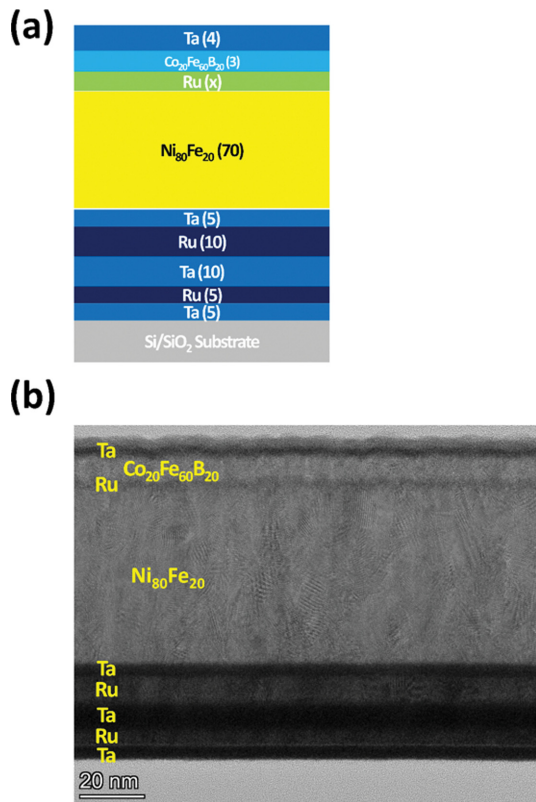
부에서 로터리 펌프(rotary pump)를 사용해 형성한  $10^{-4}$  Torr 수준의 진공도에서 진행되었다.

### III. 실험 결과 및 논의

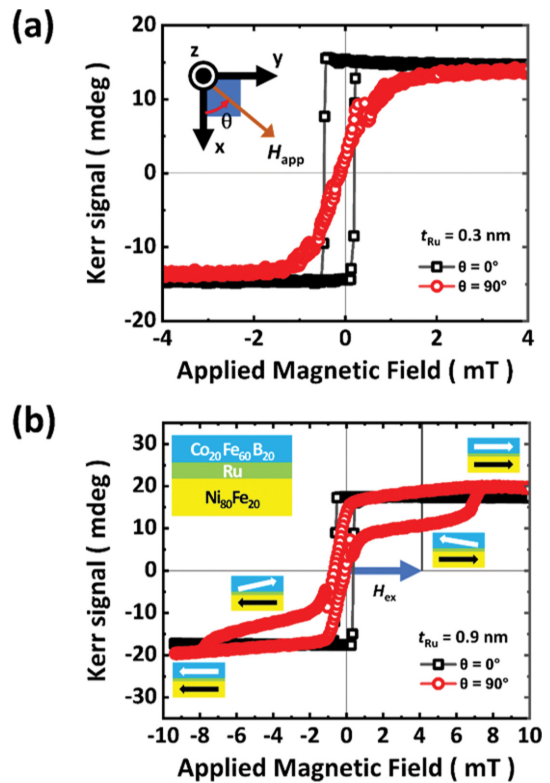
Fig. 2(a)에는 본 연구를 위하여 제작된 시료를 도식하였다. 시료의 구조는 TMR 센서의 자유층 구조에서 주로 사용되는  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  (70 nm)/Ru ( $t_{\text{Ru}}$  nm)/ $\text{Co}_{20}\text{Fe}_{60}\text{B}_{20}$  (3 nm) 구조로 제작하였고, Ru 층의 두께 변화에 따른 Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida(RKKY) 상호작용 현상을 확인하기 위해 Ru 두께는 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.1, 1.3, 1.5, 1.8, 2.0, 2.2, 2.4, 2.6 nm로 제작하여 강자성(synthetic ferromagnet, SF)-반강자성(synthetic antiferromagnet, SAF) 결합의 주기성을 확인하고자 하였다. Fig. 2(b)에는 본 연구에 사용한 시료의 단면 고해상도 transmission electron microscope(TEM) 이미지를 전시하였다. 상부로부터 Ta,  $\text{Co}_{20}\text{Fe}_{60}\text{B}_{20}$ , Ru,  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  층이 순서대로 위치하며, 명암차이를 이용하여 각층을 구분할 수 있다. 전체적으로 각 계면은 명확하고, 거칠기가 작아 보여 박막 내에서의 결합을 관측되지 않았다.  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  층은 다결

정 조직의 결정성 방향을 보여주고 있으며,  $\text{Co}_{20}\text{Fe}_{60}\text{B}_{20}$  층은 비교적 균일한 명암비를 보여주고 있다.

Ru 층이 0.3 nm와 0.9 nm인 시료에 대한 자화 용이축(magnetic easy axis)과 자화 곤란 축(magnetic hard axis)에 대한 자기이력곡선의 결과를 Fig. 3(a)와 (b)에 전시하였다. MOKE의 측정은 Fig. 3(a)의 inset에 표현한 것처럼 시료의 방향을 바꿔가며 자기장( $H_{\text{app}}$ )을 인가하여 longitudinal MOKE를 측정하였다. Fig. 3(a)에서 전시한 Ru 층이 0.3 nm 시료에서  $\theta = 0^\circ$ 의 경우(검정색 사각형)에 포화자화( $M_s$ )와 잔류자화( $M_r$ )가 거의 비슷하여 squareness가 1에 가까운 모습을 보여주고 있으나,  $\theta = 90^\circ$ 의 경우(빨간색 원형)에는 원점 부근에서 선형적인 기울기와 낮은 squareness를 보여주고 있다. 측정된 자기이력 곡선의 모양을 통하여 자화 용이축과 자화 곤란축을 결정하였고, 각각  $\theta = 0^\circ$  또는  $90^\circ$ 로 결정하였다. 또한 Ru 층이 0.3 nm 시료에서는 자기이방성의 수평방향으로의 이동은 관찰되지 않아 교환자기장( $H_{\text{ex}}$ )가 거의 없고, SAF 결합이 아닌 SF 결합임을 알 수 있다. Ru 층이 0.9 nm 시료(Fig. 3(b))에서  $\theta = 0^\circ$ 의 경우(검정색 사각형)는 Ru 층이 0.3 nm인 경우와 동일하게 squareness가 1에 가까운 모습을 보이고 있어  $\theta = 0^\circ$ 는 자화 용이축으로



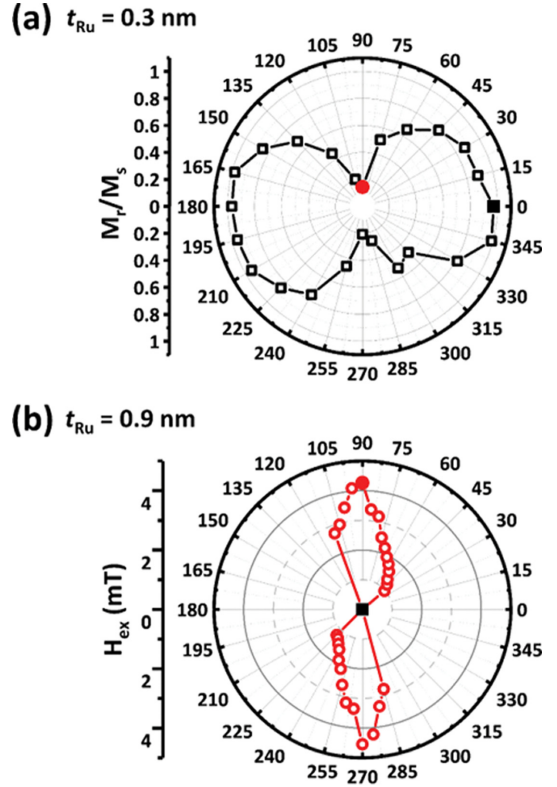
**Fig. 2.** (Color online) (a) Schematic stack of the sample,  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  (70 nm)/Ru ( $t_{\text{Ru}}$  nm)/ $\text{Co}_{20}\text{Fe}_{60}\text{B}_{20}$  (3 nm), designed for in-plane tunnel magnetoresistance sensors. (b) Cross-sectional TEM image highlighting smooth, well-defined interfaces among.



**Fig. 3.** (Color online) Longitudinal MOKE hysteresis loops measured along the magnetic easy and hard axes for (a)  $t_{\text{Ru}} = 0.3$  nm (synthetic ferromagnetic coupling) and (b)  $t_{\text{Ru}} = 0.9$  nm (synthetic antiferromagnetic coupling).

결정하였다. 반면에  $\theta = 90^\circ$ 의 경우(빨간색 원형)는 자기이력 곡선의 보자력이 원점을 기준으로 이동한 형태를 보이며, 이는 Ru를 매개로  $\text{Co}_{20}\text{Fe}_{60}\text{B}_{20}$ 과  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  층 간에 RKKY 기반의 SAF 결합에 의한 교환자기장이 나타남을 의미한다. 자기이력곡선에서  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  층은 두꺼운 두께로 인해 큰 자기 모멘트를 가져 작은 자기장 영역에서 반전되고,  $\text{Co}_{20}\text{Fe}_{60}\text{B}_{20}$  층은 포화 자화 값은 높으나 얇은 두께로 인해 작은 자기 모멘트를 가지며 큰 자기장 영역에서 반전된다. 따라서 자기이력 곡선에서 모멘트 변화가 작은 영역은  $\text{Co}_{20}\text{Fe}_{60}\text{B}_{20}$  층의 자화 반전을 나타낸다.  $H_{\text{ex}}$ 는 Fig. 3(b)에 나타냈듯이  $\text{Co}_{20}\text{Fe}_{60}\text{B}_{20}$  층의 오프셋으로 정의하여 자기장이 (-)에서 (+)으로 방향으로의 switching field( $H_{\text{sw}}^{(-) \rightarrow (+)}$ )와 자기장이 (+)에서 (-)으로 방향으로의 switching field( $H_{\text{sw}}^{(+ \rightarrow (-)}$ )의 평균으로 구하였다. 그리고 그 크기를 화살표로 나타내었다. 자기이력곡선의 계형 또한 원점 부근에서 선형적인 기울기와 낮은 squareness를 보여주고 있어,  $\theta = 90^\circ$  방향의 경우 자화 곤란 축으로 결정하였다. RKKY 상호작용 교환 결합의 진동주기는 결정학적으로 성장방향이 바뀌면 진동주기와 위상이 달라질 수 있으므로[16-18], 본 연구에서처럼 특정 조건에서 교환자기장이 나타나는 것은 타당하다고 생각된다.

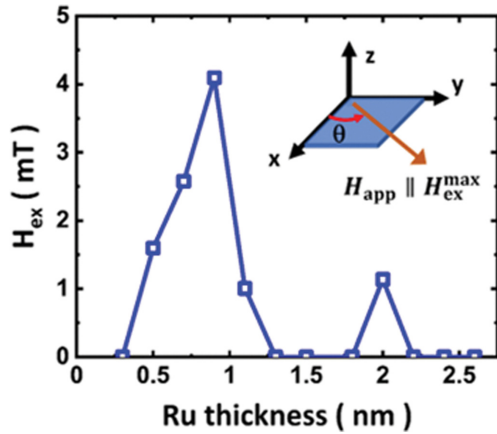
Fig. 3(a), (b)에서 제작된 시료의 면방향의 자기 이방성이 관측되었기 때문에, 시편의 면내 기준축과 자기장의 상대각,  $\theta$  변화에 따른 자기이력곡선을 측정하여 Fig. 4(a), (b)에 전시하였다. 측정은  $\theta$ 를 순서대로 각각  $15^\circ$ 와  $5^\circ$  간격으로 회전시키며 수행하였다. Fig. 4(a)는  $t_{\text{Ru}} = 0.3 \text{ nm}$ 인 시료에서의  $M_r/M_s$ 를 전시하였다.  $t_{\text{Ru}} = 0.3 \text{ nm}$ 인 시료에서는  $0^\circ$ 와  $180^\circ$  부근의 squareness가 1에 가까운 자화 용이축을 보이고,  $90^\circ$ 와  $270^\circ$  부근에서는 squareness가 0에 가까운 자화 곤란축의 모습으로 면방향으로 일축 이방성(uniaxial anisotropy)의 보인다. 이러한 자기 이방성이 나타난 이유는 증착 공정의 특성에 기인한 것으로 판단된다. 일반적인 스퍼터링 공정에서는 균일한 증착을 위해 샘플을 회전시키지만, 본 연구에서는 샘플 스테이지를 스퍼터링 건과 면 대 면 방향으로 평행하게 고정된 채 회전 없이 증착하였다. 이러한 증착 방식으로 인해 자기 결정 이방성(magnetocrystalline anisotropy)이 유발된 것으로 보인다.  $t_{\text{Ru}} = 0.9 \text{ nm}$ 인 시료에서는  $\theta$ 를 변화시키면서 측정된  $H_{\text{ex}}$ 를 Fig. 4(b)에 전시하였다.  $t_{\text{Ru}} = 0.9 \text{ nm}$ 인 시료에서도  $0^\circ$ 와  $180^\circ$  부근의  $H_{\text{ex}}$ 는 거의 없고,  $90^\circ$ 와  $270^\circ$  부근에서는 최대값을 가지고 있는 결과를 얻었다.  $H_{\text{ex}}$  값을 통하여 일축 이방성을 가지고 있음을 확인하였다. 이러한 교환 자기장과 자기 이방성 축간의 관계에 대한 명확한 메커니즘은 추후 연구가 필요하다. 이때에 Fig. 3(a), (b)의 자화 용이축(검은색 사각형), 자화 곤란축(빨간색 원형)의 결과를 Fig. 4(a), (b)에 전시하였다. Ru 층의 두께 변화에 따



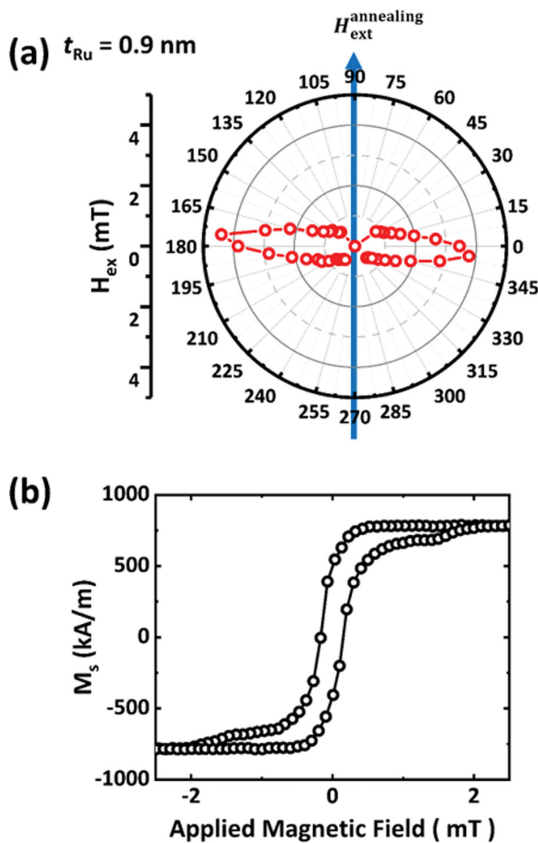
**Fig. 4.** (Color online) (a) Azimuthal angle dependence  $M_r/M_s$  for  $t_{\text{Ru}} = 0.3 \text{ nm}$  showing clear in-plane uniaxial anisotropy with maxima at  $0^\circ$  and  $180^\circ$  and minima near  $90^\circ$  and  $270^\circ$ . (b) Azimuthal dependence of  $H_{\text{ex}}$  for  $t_{\text{Ru}} = 0.9$ , peaking along the hard axis and vanishing along the easy axis, consistent with coherent SAF rotation.

른 RKKY 현상을 확인하기 위하여  $t_{\text{Ru}}$ 을 변화시켜가면서  $\theta = 90^\circ$ 에서의  $H_{\text{ex}}$ 를 측정한 결과를 Fig. 5에 전시하였다. 이때  $\theta$ 는  $t_{\text{Ru}} = 0.9 \text{ nm}$ 에서  $H_{\text{ex}}$ 의 최대값을 갖는 각도로 결정하였다.  $t_{\text{Ru}}$ 을 변화시켜가면서  $H_{\text{ex}}$ 를 측정한 결과  $t_{\text{Ru}}$ 가  $0.5 \text{ nm}$  부근에서 갑자기 커지기 시작하여,  $t_{\text{Ru}}$ 가  $0.9 \text{ nm}$  부근에서 가장 큰  $H_{\text{ex}}$  값이 관찰되었고, 이는 RKKY 현상을 매개화하는 SAF 결합의 첫번째 반주기에 해당한다고 볼 수 있다. 두께가 증가함에 따라서  $t_{\text{Ru}}$ 가  $1.3 \text{ nm}$ 에서  $1.6 \text{ nm}$  부근에서 거의 0에 도달한 뒤,  $t_{\text{Ru}}$ 가  $2.0 \text{ nm}$  부근에서 다시  $H_{\text{ex}}$  값이 상승하여 SAF의 두번째 반주기로 생각할 수 있다. 또한  $t_{\text{Ru}} > 2.3 \text{ nm}$  영역에서는  $H_{\text{ex}}$ 가 측정되지 않아, 이 두께 이상에서는 두 자성층 간의 교환결합이 약해지고 결정 이방성이 지배적임을 시사한다. 이것은  $t_{\text{Ru}}$ 에 따른  $H_{\text{ex}}$ 의 값이 진동하면서 작아지는 RKKY 현상의 특성에 잘 부합한다.

TMR 센서의 선형 응답을 확보하기 위하여 두 번의 열처리 과정이 사용된다[15,19,20]. 첫번째 열처리는 자유층의 MgO 터널링 층 상·하부의 CoFeB의 결정화를 통하여 TMR 비율의 최대화와, 동시에 자기 이방성 축을 만들어 주는 역할을 한다. 두 번째 열처리는 고정층과 자유층의 자기이방성



**Fig. 5.** (Color online) Exchange field,  $H_{ex}$  versus Ru spacer thickness,  $t_{Ru}$  measured at the hard-axis orientation, revealing an oscillatory RKKY interlayer coupling. The first antiferromagnetic maximum appears near  $t_{Ru} \approx 0.9$  nm and the second half-period near  $\sim 2.0$  nm, with coupling strength decaying at increasing  $t_{Ru}$ .



**Fig. 6.** (Color online) Effect of field annealing on in-plane anisotropy (a) polar plot of  $H_{ex}$  for  $t_{Ru} = 0.9$  nm showing rotation of the uniaxial easy axis to align with the annealing field. (b) Typical hysteresis loops measured by VSM.

축을 직교하도록 정렬하여, 선형적 MR 응답을 얻기 위한 과정이 필요하다. 본 연구에서는  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Ru}/\text{Co}_{20}\text{Fe}_{60}\text{B}_{20}$  구조

에서의 열처리효과에 의한 자기 이방성의 변화를 확인하였다. Fig. 6(a)는  $t_{Ru}$ 가 0.9 nm 시료에 대해, 300 mT의 외부자기장을 시료의 면내  $90^\circ$  방향으로 인가하고 (Fig. 6(a)의 파란색 화살표 방향) 열처리한 시료에 대해서 MOKE를 이용하여 측정된 방위각 변화에 따른  $H_{ex}$ 을 나타낸다.  $H_{ex}$ 은  $175^\circ$ 에서 최대 값인 4.4 mT을  $90^\circ$ ,  $270^\circ$ 에서 0 mT인 최소값이 측정되었고,  $H_{ext}^{annealing}$ 를 대칭으로 일축 이방성이 확인되었다. 이는 열처리로 인하여  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Ru}/\text{Co}_{20}\text{Fe}_{60}\text{B}_{20}$ 의 자화 용이축이  $\theta = 90^\circ$ 로 정렬됨에 따라 그 수직방향에서 RKKY 결합이 만들어 내는  $H_{ex}$ 가 가장 크게 관측된 것으로 생각된다. 이는  $H_{ex}$ 은  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Ru}/\text{Co}_{20}\text{Fe}_{60}\text{B}_{20}$  층의 자화 회전이 가장 어려운 방향에서 최대가 되는 것으로 생각된다. 또한 TMR 센서의 응용을 위하여 자유층의 선형성을 확인하기 위해 열처리한  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Ru}/\text{Co}_{20}\text{Fe}_{60}\text{B}_{20}$  구조의 시료를  $\theta = 0^\circ$  상태에서의 자기이력곡선을 진동 자력계(Vibrating Sample Magnetometer; VSM)로 측정한 결과를 Fig. 6(b)에 전시하였다. 측정된 시료의  $M_s$  값은 770 kA/m이었고, 보자력은 0.16 mT로 매우 작게 측정되었다. 또한, 약 3.4 mT 정도의  $H_{ex}$ 가 측정되었다. 이는 RKKY 결합에 의해 자기이력곡선이 열처리시 인가한 자기장 방향으로 편향된 것으로 생각된다. 이를 통하여 TMR 센서의 자유층은 외부자기장을 인가하면서 열처리할 때에 쉽게 자기이방성을 조작할 수 있고, 이를 통하여 TMR 센서의 제조 공정상의 자성특성 변화에 대해 이해도를 높을 수 있을 것으로 기대한다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 DC 마그네트론 스퍼터링 방법으로 제작된 TMR 센서에서 자유층으로 사용되는  $\text{NiFe}/\text{Ru}/\text{CoFeB}$  자성박막의 자성특성을 연구하였다. Ta (5 nm)/Ru (5 nm)/(Ta 10 nm)/Ru (10 nm)/Ta (5 nm)의 버퍼층위에  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  (70 nm)/Ru ( $t_{Ru}$  nm)/ $\text{Co}_{20}\text{Fe}_{60}\text{B}_{20}$  (3 nm)을 증착하였다. 광자기 커 효과 장치로 방위각 변화에 따른 자성특성 변화와 Ru 층의 두께 변화에 대한 자기이력곡선을 측정하여 자성특성을 확인하였다. Ru 층의 두께가 0.3 nm일 때에는 SF 결합, Ru 층의 두께가 0.9 nm일 때에는 SAF 결합으로 확인되었으며, 방위각을 바꾸어 가면서 MOKE 실험을 수행하였을 때에 일축 이방성을 가지고 있음이 확인되었다. 또한 Ru 두께 변화에 따른 RKKY 현상을 관찰하였고, 외부에서 자기장을 인가하여 열처리하였을 때에는 자기 이방성 축의 변화를 관측하였다.

#### 감사의 글

이 논문은 교육부의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사

업(No. NRF-2021M3F3A2A01037526) 및 DGIST 기관고유 사업(25-ET-02, 25-SENS2-11)의 지원을 받아 수행되었습니다.

## References

- [1] J. Lenz and S. Edelstein, *IEEE Sens. J.* **6**, 631 (2006).
- [2] P. P. Freitas, R. Ferreira, S. Cardoso, and F. Cardoso, *J. Phys.: Condens. Matter* **19**, 165221 (2007).
- [3] M. A. Khan, J. Sun, B. Li, A. Przybysz, and J. L. Kosel, *Eng. Res. Express* **3**, 022005 (2022).
- [4] B. Lim, M. Mahfoud, P. T. Das, T. Jeon, C. Jeon, M. Kim, T.-K. Nguyen, Q.-H. Tran, F. Terki, and C. Kim, *APL Materials* **10**, 051108 (2022).
- [5] D. Mazumdar, W. Shen, X. Liu, B. D. Schrag, M. Carter, and G. Xiao, *J. Appl. Phys.* **103**, 113911 (2008).
- [6] J. T. Vaheeda and B. George, *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* **25**, 13721 (2022).
- [7] X. Liu and W. Han, *IEEE Sens. J.* **19**, 1683 (2019).
- [8] K. B. Nandapurkar, A. C. Sreekantan, and P. K. Dutta, *IEEE Trans. Inst. Meas.* **70**, 9505408 (2021).
- [9] C. Zheng, K. Zhu, S. Cardoso de Freitas, J.-Y. Chang, J. E. Davies, P. Eames, P. P. Freitas, O. Kazakova, C. Kim, C.-W. Leung, S.-H. Liou, A. Ognev, S. N. Piramanayagam, P. Ripka, A. Samardak, K.-H. Shin, S.-Y. Tong, M.-J. Tung, S. X. Wang, S. Xue, X. Yin, and P. W. T. Pong, *IEEE Trans. Magn.* **55**, 0800130 (2019).
- [10] S. S. P. Parkin, C. Kaiser, A. Panchula, P. M. Rice, B. Hughes, M. Samant, and S.-H. Yang, *Nat. Mater.* **3**, 862 (2004).
- [11] S. Yuasa, T. Nagahama, A. Fukushima, Y. Suzuki, and K. Ando, *Nat. Mater.* **3**, 868 (2004).
- [12] S. Maat and A. C. Marley, *Physics and design of hard disk drive magnetic recording read heads*, *Handbook of Spintronics*, Springer Dordrecht, (2015). pp. 988~991.
- [13] Y.-S. Choi and K. Tsunekawa, *Appl. Phys. Lett.* **91**, 172507 (2007).
- [14] R. Ferreira, E. Paz, P. P. Freitas, J. Wang, and S. Xue, *IEEE Trans. Magn.* **48**, 3719 (2012).
- [15] K. Fujiwara, M. Oogane, S. Yokota, T. Nishikawa, H. Naganuma, and Y. Ando, *J. Appl. Phys.* **111**, 07C710 (2012).
- [16] J. J. de Vries, *Doctoral dissertation, Interlayer exchange coupling in magnetic multilayers: a systematic experimental study*, Technische Universiteit Eindhoven, Netherland (1996).
- [17] P. Bruno, *J. Phys.: Condens. Matter* **11**, 9403 (1999).
- [18] M. D. Stiles, *J. Magn. Magn. Mater.* **200**, 322 (1999).
- [19] D. C. Leitao, A. V. Silva, R. Ferreira, E. Paz, F. L. Deepack, S. Cardoso, and P. P. Freitas, *J. Appl. Phys.* **1**, 17E526 (2014).
- [20] Z. H. Yuan, L. Huang, J. F. Feng, Z. C. Wen, D. L. Li, X. F. Han, T. Nakano, T. Yu, and H. Naganuma, *J. Appl. Phys.* **118**, 053904 (2015).