

## Properties of Exchange Bias Coupling Field and Coercivity Using the Micron-size Holes Formation Inside GMR-SV Film

Munkhbat Bolormaa<sup>1†</sup>, Purevdorj Khajidmaa<sup>2†</sup>, Do-Guwn Hwang<sup>1,2</sup>, and Sang-Suk Lee<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Oriental Biomedical Engineering, Sangji University, Wonju 220-702, Korea

<sup>2</sup>Department of Oriental-western Biomedical Engineering, Sangji University, Wonju 220-702, Korea

Won-Hyung Lee

Department of Physics, Penn State University, University Park, Pennsylvania 16802, USA

Jang-Roh Rhee

Department of Nanophysics, Sookmyung Women's University, Seoul 140-742, Korea

(Received 5 June 2015, Received in final form 18 June 2015, Accepted 18 June 2015)

The holes with a diameter of 35  $\mu\text{m}$  inside the GMR-SV (giant magnetoresistance-spin valve) film were patterned by using the photolithography process and ECR (electron cyclotron resonance) Ar-ion milling. From the magnetoresistance curves of the GMR-SV film with holes measuring by 4-electrode method, the  $MR$  (magnetoresistance ratio) and  $MS$  (magnetic sensitivity) are almost same as the values of initial states. On other side hand, the  $H_{ex}$  (exchange bias coupling field) and  $H_c$  (coercivity) dominantly increased from 120 Oe and 10 Oe to 190 Oe and 41 Oe as increment of the number of holes inside GMR-SV film respectively. These results were shown to be attributed to major effect of EMD (easy magnetic domain) having a region positioned between two holes perpendicular to the sensing current. On the basis of this study, the fabrication of GMR-SV applying to the hole formation improved the magnetoresistance properties having the thermal stability and durability of bio-device.

**Keywords** : Electron cyclotron resonance (ECR), ion milling, hole, exchange bias coupling field, coercivity, easy magnetic domain (EMD)

## GMR-SV 박막내 마이크론 크기의 홀 형성을 이용한 교환결합세기와 보자력 특성연구

벌러르마<sup>1†</sup> · 카지드마<sup>2†</sup> · 황도근<sup>1,2</sup> · 이상석<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup>상지대학교 보건과학대학 한방의료공학과, 강원 원주시 우산동 660, 220-702

<sup>2</sup>상지대학교 대학원 동서의료공학과, 강원 원주시 우산동 660, 220-702

이원형

펜실베이아 주립대학교 물리학과, University Park, Pennsylvania 16802, 미국

이장로

숙명여자대학교 나노물리학과, 서울 용산구 청파동 53-12, 140-742

(2015년 6월 5일 받음, 2015년 6월 18일 최종수정본 받음, 2015년 6월 18일 게재확정)

고감도 바이오센서용 거대자기저항-스핀밸브(Giant magnetoresistance-spin valve; GMR-SV) 박막소자의 미세패턴 공정으로 인한 교환결합력과 보자력 약화 문제를 해결하고자 전자사이클로트론 공명(Electron Cyclotron Resonance) Ar-이온 밀링을 이용하여 GMR-SV 박막에 지름 35  $\mu\text{m}$ 인 원형 모양의 홀(Hole)을 패턴닝 하였다. GMR-SV를 4-단자법으로 측정된 자기저항 곡선으로부터 홀 개수가 많아질수록 자기저항비와 자장감응도는 홀이 없을 때 측정된 초기값과 같은 값을 유지하였고, 교환결합세기와 보자력은 120 Oe에서 190 Oe, 10 Oe에서 41 Oe로 크게 향상되었다. 이러한 현상은 GMR-SV 박막내의 자화용이축과 같은 방향을 띄고 센싱 전류의 방향과 수직인 공간에 위치하는 용이 자기영역(Easy magnetic domain; EMD)의 역할에 기인하는 결과를 보여 주었다. GMR-SV 바이오 소자 제작시 폭을 넓게 하고 소자내부에 홀의 개수를 증가시켜 발생하는 EMD 효과가 자기저항특성을 향상시킬 수 있었다.

**주제어** : 전자사이클로트론 공명(ECR), 이온 밀링, 홀, 교환결합세기, 보자력, 용이 자기영역(EMD)

### I. 서 론

분자수준의 자기생체신호를 검출하기 위해 개발된 GMR-SV(Giant magnetoresistance-spin valve) 소자를 이용한 바이오센서는 특이 종을 선택하거나 생체분자에 붙은 미세크기의 자성비드의 자성신호를 측정하여 생물학적 또는 화학적 분자의 운동과 농도 및 항체와 항원 결합 반응을 쉽게 관찰할 수 있는 장점이 있다[1]. 최근에는 물리학을 기반한 나노공학 및 생명공학 학제간 융합연구가 발전하여 GMR-SV 소자를 DNA(deoxy nuclei acid) 분자 칩(chip)이나 고감도 생체센서로 활용하기까지 이르렀다[2, 3]. 또한 GMR-SV 자기센서를 이용한 DNA 식별 꼬리표(tag)를 적용하는 연구와 수십 개미만의 분자를 식별할 수 있는 의료용 바이오칩 센서(bio-chip sensor)가 국내외 여러 연구팀에서 개발되고 있다[3, 4].

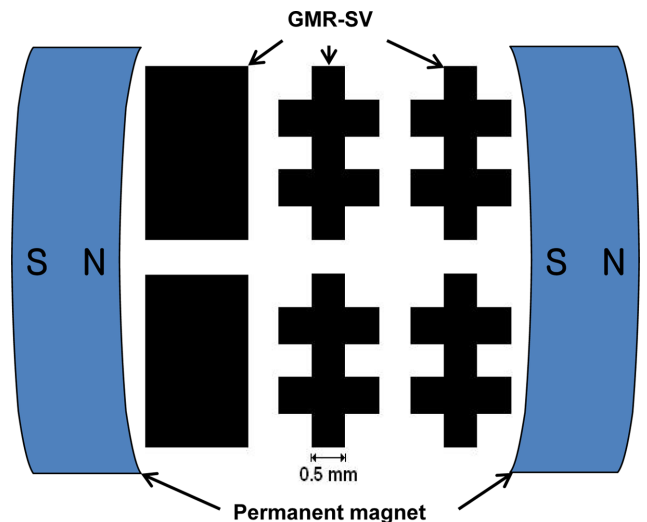
GMR-SV를 보다 나은 자장감응도를 향상시키기 위해 초연 자성체로 자유층을 구성한 다층박막의 최적 제작 조건과 맞춤형 마스크 GMR-SV 소자를 개발하는 것이 필요하다[5, 6]. 나노 생체소자로 응용할 고감도 자성 특성을 갖는 대표적인 반강자성체인 IrMn 기저에 연자성체인 NiFe을 적층한 다층박막 구조에서 고정층과 자유층에 직교면상으로 자기장이 인가된 융합구조형 이중 GMR-SV 소자에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[7, 8].

고감도 바이오센서용 GMR-SV 박막소자 제작시 미세패턴 공정으로 인한 소자의 길이방향 곤란축과 폭방향 용이축 이방성이 생성되어 본래의 자기저항특성인 교환결합력과 보자력을 약화시키는 문제가 대두된다[9]. 이런 현상은 자장감응도의 감소를 초래시킨다[10]. 본 연구에서는 마이크로 수준의 바이오 소자 제작과 달리 mm 폭의 GMR-SV 박막 내에 형성되는 원형 모양의 홀(Hole) 패턴을 인위적으로 가공하여 자기저항 특성을 향상시키고자 하였다. 즉, 기존의 거대자기저항효과 스핀밸브 소자의 면상에 기하학적(geometric) 패턴을 가공하여 교환결합 층의 자기적 거동의 안정성을 향상시키는 목적으로 연구하였다. GMR-SV 박막의 1차 패턴은 증착시 금속마스크를 사용하며, 2차 패턴은 광리소그래피와 건식식각(Dry etching) 방법으로 직경이 수십  $\mu\text{m}$ 인 홀을 형성시켰

다. GMR-SV 내 형성된 홀의 수를 조절하여 교환결합력과 보자력을 향상시키는 조건을 조사하였다. 자기저항특성 향상에 대한 분석과 더불어 미래의 바이오센서 개발에 고려할 착안점을 제시하였다.

### II. 실험방법

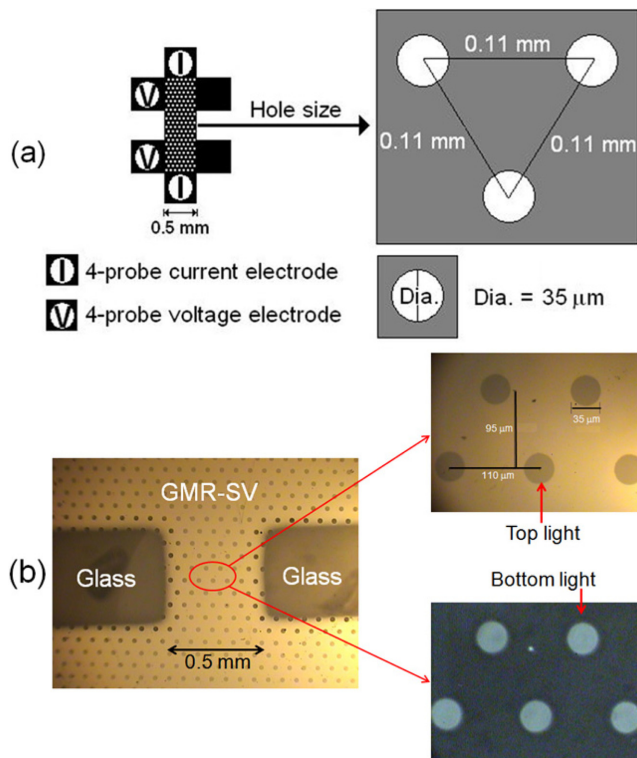
진공도가  $3 \times 10^{-6}$  Torr인 증착 시스템을 이용하여 유리(Corning 7059) 기판 위에 마그네트론 스퍼터링 방법으로 상온에서 Ta(bottom)/NiFe/Cu/NiFe/IrMn/Ta(top) 다층구조인 GMR-SV 박막을 제작하였다. 영구자석을 이용하여 Fig. 1에 보여준 GMR-SV 박막 시료를 제작할 때 인가되는 균일한 자기장의 크기는 350 Oe이었다. DC 스퍼터링시 직경 3인치 크기 Ta, NiFe, Cu, IrMn 4개의 각 타겟들에서 형성된 플라즈마의 상호간섭이나 타겟 성분들 간의 혼재를 막기 위해 스테인레스 판으로 만든 분리막을 사용하였다[10, 11]. Ta, NiFe, Cu, IrMn의 박막에 대한 증착률은 각각 0.1 nm/s, 0.15 nm/s, 0.12 nm/s, 0.1 nm/s이었다. GMR-SV 다층박막



**Fig. 1.** (Color online) The permanent magnet and the patterning GMR-SV multilayer patterning samples having a width of 0.5 mm and a length of 2.5 mm by using a shadow metal mask.

구조에서 바닥층 Ta, 자유층 NiFe, 고정층 NiFe, 반강자성층 IrMn, 보호층 Ta의 두께를 각각 5 nm, 8 nm, 4 nm, 8 nm, 5 nm으로 고정하였다. IrMn 반강자성체와 교환결합한 강자성체 NiFe 고정층과 Cu층에 의해 분리된 강자성체 NiFe 자유층 간의 상호교환결합력을 최소화하고 자장감응도를 높이기 위해 사이층 Cu의 두께를 3.0 nm로 고정하였다.

Fig. 1에서 보여주듯이 두께 0.1 mm인 황동판 금속 그림자 마스크(shadow mask)를 이용하여 증착한 GMR-SV 다층박막 시료가 폭 0.5 mm와 길이 5 mm 크기가 되게 하였다. 또한 Fig. 2(a)처럼 4단자와 홀크기 및 홀사이의 간격을 도시한 GMR-SV 박막 내에 직경 크기를 35  $\mu\text{m}$ 의 원형 모양 홀(Hole)를 형성하기 위하여 먼저 상온에서 광 리소그래피 공정으로 PR(Photoresistance) 영역에서 남도록 하였다. PR이 없는 홀을 전자사이클로트론공명(Electron Cyclotron Resonance; ECR) 장치를 이용한 Ar<sup>+</sup> 이온 밀링으로 식각하였다[12, 13]. Fig. 2(b)는 GMR-SV 박막내 35  $\mu\text{m}$  홀이 만들어진 후 실제 사진이며 상부와 하부에서 각각 빛을 비추고 광학현미경 관



**Fig. 2.** (Color online) (a) Schematic of the GMR-SV films with 4-probe electrodes and holes patterned by a shadow metal mask and a photolithography process. (b) Photographs of the patterned GMR-SV with holes of a diameter 35  $\mu\text{m}$ . The sample has a width and a length of 0.5 mm and 0.4 mm, respectively. The GMR-SV multilayer structure was Ta(5 nm)/NiFe(8 nm)/Cu(3.0 nm)/NiFe(4 nm)/IrMn(8 nm)/Ta(5 nm). Real photograph of the typical holes with a size of dia. = 50  $\mu\text{m}$  inside GMR-SV film patterned by photolithography and ECR Ar-ion milling.

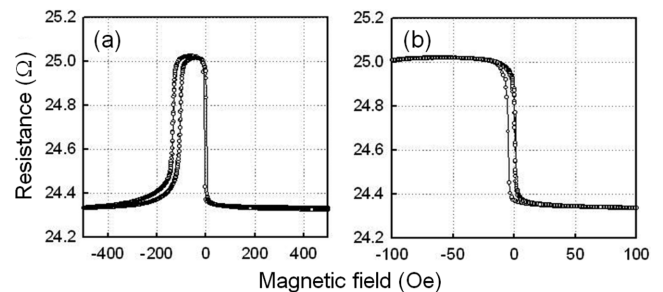
찰한 사진으로 밀링된 후 완전하게 박막이 없어진 모습을 볼 수 있다.

매 차례 리소그래피 공정과 ECR Ar-이온 밀링과정을 거쳐서 홀 개수가 증가되게 하였다. 그때마다 제조공정에서 밀링 후 아세톤으로 PR을 제거하였으며, 홀 생성 후 바로 자기저항 측정 시스템을 이용하여 +600 Oe와 -600 Oe 사이에서 측정된 Major loop와 +100 Oe와 -100 Oe 사이에서 측정된 Minor loop 곡선을 얻었다. GMR-SV 박막시료의 홀 제작 공정과정에서 생긴 산화막 및 표면오염으로 인한 자기저항 특성의 변화를 최소화하기 위해 ex-situ 방법으로 인듐(Indium)을 눌러서 바로 전극을 형성시켰다. 반복하여 만든 단위면적당 홀의 수가 증가됨에 따라 소자의 박막 면에 수평 방향으로 외부 자기장을 인가하여 4단자법으로 전류와 전압을 측정하여 폭 방향으로 정한 자화용이축으로 얻은 자기저항곡선을 통해 GMR-SV 박막 시료의 교환결합세기, 보자력, 자기저항비, 자장감응도, 상호교환결합력을 각각 조사하였다[14].

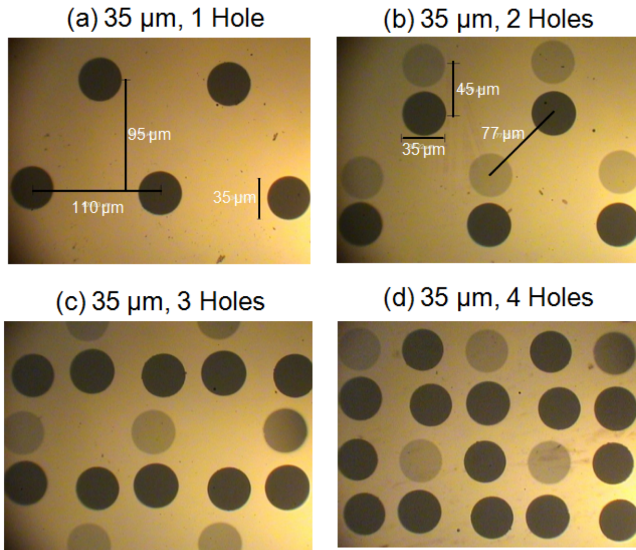
#### IV. 실험결과 및 토의

GMR-SV 다층박막에 대한 Major loop와 Minor loop의 자기저항곡선들을 Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)에 각각 나타내었다. GMR-SV 다층박막 구조에서 IrMn층의 두께가 8 nm일 때, 서로 샌드위치(sandwich) 구조를 이루고 있는 두께가 3.0 nm인 비자성체 Cu층을 사이에 둔 두 강자성체의 NiFe층간 상호교환결합력은 약 1.2 Oe이었다. 반강자성체 IrMn층에 고정된 NiFe층의 보자력과 교환결합력 세기는 각각 10 Oe, 120 Oe인 특성을 보였다. 반면에 자유층 NiFe의 보자력은 5.0 Oe를 유지하였으며, 4단자에서 표면저항, 자기저항비, 자장감응도는 각각 24.35  $\Omega$ , 3.0%, 1.0%/Oe이었다.

Fig. 4(a)에서 보여주듯이 GMR-SV인 다층박막에 일정한 직경 35  $\mu\text{m}$  크기로 ECR Ar-이온 밀링을 거친 후 생성된



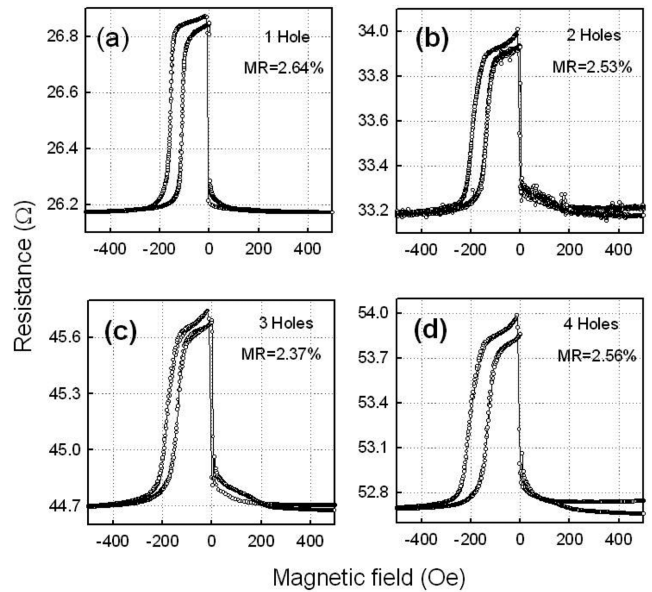
**Fig. 3.** (a) Major loop and (b) major loop of MR curves for the original glass/Ta(5 nm)/NiFe(8 nm)/Cu(3.0 nm)/NiFe(4 nm)/IrMn(8 nm)/Ta(5 nm) GMR-SV multilayer with  $H_c = 10$  Oe,  $H_{cx} = 120$  Oe,  $MR = 3.0\%$ , and  $MS = 1.0\%/Oe$  without holes patterned by photolithography and ECR Ar-ion milling.



**Fig. 4.** (Color online) Photograph for the several holes inside GMR-SV film patterned by photolithography and ECR Ar-ion milling; (a) 1 hole, (b) 2 holes, (c) 3 holes, and (d) 4 holes with a size of dia. = 35 μm. per area of 95 μm × 95 μm.

두 개의 홀의 중심 사이 간격  $d$ 는 110 μm이었다. 밀링된 홀의 수가 증가되어 2개일 때 Fig. 4(b)에서  $d$ 가 45 μm 이거나 75 μm이었고, 3개일 때 Fig. 4(c), 4개일 때 Fig. 4(d)에서  $d$ 가 거의 45 μm로 균일하게 나타났다. 자기저항곡선 측정 시 인가하는 외부자기장 방향을 자화용이축으로 했을 때, 95 μm × 95 μm 면적당 1개에서 4개의 홀 수를 갖는 GMR-SV 박막에 대한 Major loop 자기저항곡선을 Fig. 5에 각각 나타내었다.

Fig. 5(a), 5(b), 5(c), 5(d)에 나타난 4개의 Major loop 자기저항 곡선들을 살펴보았을 때, 4단자에서 표면저항값이 크게 증가하였음에도 불구하고 자기저항비(MR)의 감소율은 매우 작았으나, 반강자성체 IrMn층에 고정된 NiFe층의 교환 결합력 세기와 보자력 변화가 뚜렷이 나타났다. 특히 홀의 개수가 2개 이상일 때는 교환결합력은 거의 일정하였으나, 보

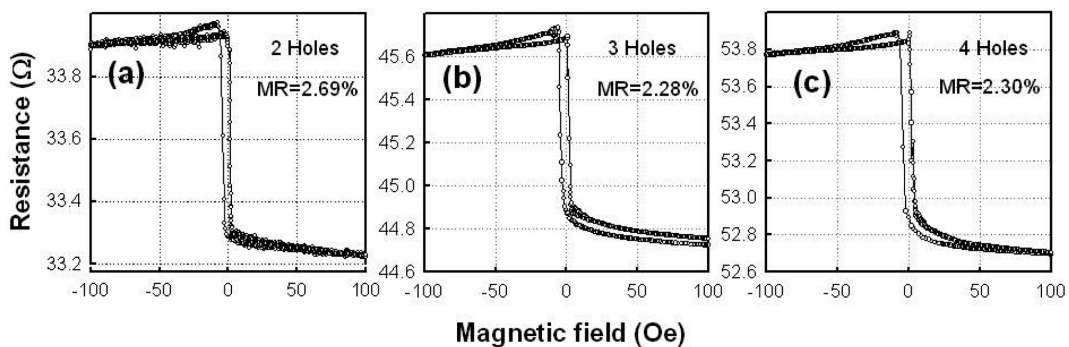


**Fig. 5.** Major MR curves for the IrMn based GMR-SV films having (a) 1 hole, (b) 2 holes, (c) 3 holes, and (d) 4 holes with a size of dia. = 35 μm.

자력의 변화가 3개일 때 현저하게 줄었음을 알 수 있다.

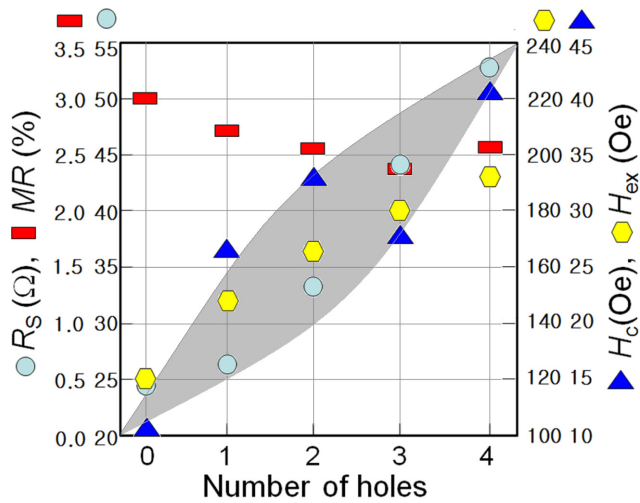
반면에 홀의 수가 각각 2개와 3개 4개일 때, Minor MR loop 자기저항곡선들을 Fig. 6(a), 6(b), 6(c)에 각각 나타내었다. 3개의 Minor loop 자기저항곡선들을 살펴보았을 때, 자유층 NiFe의 보자력 변화는 거의 미미하였으나, 상호교환결합력은 홀의 수가 증가함으로 줄어들어 zero가 됨을 보여주었다. 그리고 자장감응도는 거의 1.0%/Oe로 일정하였다.

Fig. 2처럼 폭 크기가 0.5 mm인 GMR-SV 박막 내에 형성된 직경 35 μm의 원형 홀에 대한 Major loop 자기저항 곡선들인 Fig. 5에 나타난 자기저항 특성을 종합해서 Fig. 7에 나타내었다. 먼저 4단자법으로 측정된 표면저항값( $R_s$ )은 홀이 없을 때 24.2 Ω에서 홀의 수가 증가함에 따라 저항 증가 간격이 2 Ω에서 10 Ω까지 증가하여 홀이 4개일 때 52.6 Ω이 되었다. 이것은 GMR-SV 박막의 유효면적의 감소로 인한 표



**Fig. 6.** Minor MR curves for the IrMn based GMR-SV films having (a) 2 holes, (b) 3 holes, and (c) 4 holes with a size of dia. = 35 μm.



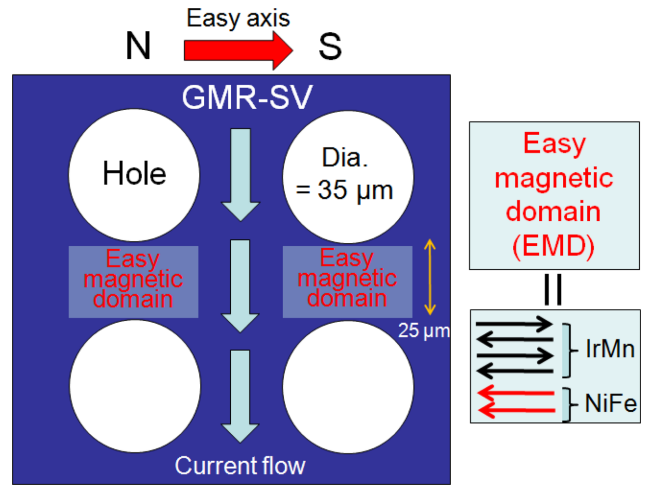


**Fig. 7.** (Color online) The surface resistance ( $R_s$ ), magnetoresistance ratio ( $MR$ ), coercivity ( $H_c$ ), and exchange bias coupling field ( $H_{ex}$ ) versus the number of holes patterned inside GMR-SV films. The gray color region is noticed to the dominant increment of  $R_s$ ,  $H_c$ , and  $H_{ex}$  except  $R_s$ , as increment of the number of holes.

면저항 값의 증가로 볼 수 있다. 이에 반하여  $MR$  값은 2.7%에서 2.3%로 감소량이 0.4%에 불과하였다. 이러한 결과는 홀 개수의 증가로 인한 GMR-SV의 내부적인 자기적 저항 특성은 크게 변화가 없음을 알 수 있다.

Fig. 5에 보여준 자기저항곡선에서 홀 개수의 증가로 인한 뚜렷한 경향성은 고정 자성층 NiFe의 교환결합력과 보자력의 향상이다. 교환결합력( $H_{ex}$ )은 홀이 없을 때 120 Oe이었다가 홀의 수에 비례하여 10 Oe씩 증가하다가 홀이 4개일 때 190 Oe까지 되었다. 반면에 고정층 NiFe의 보자력( $H_c$ )은  $n=0$ 일 때 10 Oe,  $n=1$ 일 때 27 Oe,  $n=2$ 일 때 33 Oe,  $n=3$ 일 때 28 Oe,  $n=4$ 일 때 41 Oe으로  $n=3$ 일 때를 제외하고 7 Oe씩 증가하였다. 이로서 GMR-SV 박막내 원형 모양의 홀 수가 증가함으로 자기저항비와 자장감응도의 감소는 매우 작으나 교환결합력과 보자력은 상대적으로 크게 증가함을 알 수 있다.

GMR-SV 내에 형성하는 마이크론 크기 홀의 수가 일정한 간격으로 증가함에 반강자성체 IrMn과 교환결합하는 강자성체 NiFe 고정층의 교환결합세기와 보자력의 증가에 대한 이유는 Fig. 8을 이용하여 간단한 메커니즘으로 설명할 수 있다. Fig. 8에서 보여준 측정시 인가한 외부자기장 방향과 GMR-SV 박막 제조시 인가한 일축이방성 자화 용이축 방향이 서로 평행을 이루고 있다. 두 개의 홀의 둘레간의 거리가 약 25  $\mu\text{m}$  정도의 일정한 간격으로 벌어진 GMR-SV 박막 사이로 흐르는 센싱 전류는 일축이방성과 수직임을 알 수 있다. 반면에 Fig. 8에 표시된 용이 자기영역(Easy magnetic domain; EMD)이라고 불리는 영역이 센싱 전류의 방향과 수



**Fig. 8.** (Color online) Two rectangular regions so called EMD (easy magnetic domains) are represented the increasing reason of the coercivity ( $H_c$ ) and exchange bias coupling field ( $H_{ex}$ ) depending on the number of holes inside GMR-SV film. The EMD is positioned at one region between two holes perpendicular to the direction of current flow and is included of the configuration of two magnetic arrows corresponding to antiferromagnetic IrMn layer and ferromagnetic NiFe layer.

직인 공간에 위치하며 자기영역의 방향은 GMR-SV 박막내의 자화용이축과 같은 방향을 띄고 있다. 용이 자기영역(EMD)는 센싱전류의 영향을 받지 않는 곳에 위치한 박막면 내에 존재하는 독립적인 자기영역으로 정의되며 GMR-SV 박막 본래의 교환결합력과 보자력 보다 더 증대시킬 것으로 사료된다. 이러한 자기저항특성은 원형 모양보다 정사각형 모양의 패턴을 이룰 때 확연히 나타날 것으로 기대되며, 본연구진의 추후 연구분야이다. EMD의 역할은 IrMn의 반강자성체 계면위에 교환결합력으로 고정된 NiFe 강자성체의 효과가 센싱 전류와 독립적으로 자기저항특성을 반영시키는 결과를 가질 것으로 사료된다. EMD의 미세구조적 자화 거동현상 구명은 보다 추후 연구가 될 것이다.

GMR-SV 박막내의 수십 마이크론 크기의 원형모양의 홀로 인하여 존재하는 EMD 형성은 상호교환결합력과 자장감응도, 자기저항비 값들은 변화를 주지 않고 교환결합력과 보자력을 향상시키는 결과로 나타났다. GMR-SV 박막이 바이오 소자로서 안정된 자기저항특성을 가짐으로 그 활용이 높을 것으로 보인다. GMR-SV를 이용한 바이오 소자 제작 시 미세생체분자의 자성 검출능력을 높이기 위해 적합하도록 소자 폭 크기를 줄이게 된다. 이것은 자장감응도의 감소와 소자 가장자리에서 발생하는 불안정한 지그재그(Zigzag) 자기 거동으로 인해 교환결합력과 보자력의 감소하는 특성으로 단점을 가질 수 있다[15-17]. 이러한 결함을 피하기 위해 소자 폭을 넓게 하고 소자내부에 형성하는 홀로 인해 EMD 효과로 GMR-

SV 바이오 소자의 열적안정성과 자기저항특성의 내구성을 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

## V. 결 론

Dc 마그네트론 스퍼터링법으로 증착된 Glass/Ta/NiFe/Cu/NiFe/IrMn/Ta 다층구조 GMR-SV 박막에 직경이 수십  $\mu\text{m}$  되는 원형모양의 홀을 ECR Ar-ion 밀링시스템을 이용하여 형성하였다. GMR-SV 박막 내 형성된 홀의 수가 증가할수록 4단자 표면저항값은 24.2  $\Omega$ 에서 52.6  $\Omega$ 으로 크게 증가하였으나 자기저항비와 자장감응도는 매우 작게 감소하였다. 그 반면에 반강자성체 IrMn 층계면 바로 아래 있는 고정층 강자성체 NiFe층의 교환결합세기와 보자력은 120 Oe에서 190 Oe로 10 Oe에서 41 Oe로 크게 향상되었다. 또한 Cu층을 사이를 둔 자유층 강자성체 NiFe층의 상호교환결합과 보자력은 거의 일정하였다. 이러한 현상은 센싱 전류의 방향과 수직인 공간에 위치하며 자구영역의 방향은 GMR-SV 박막내의 자화용이축과 같은 방향을 띄고 있는 용이 자구영역(EMD)의 역할에 기인하는 결과를 나타내었다. 즉, IrMn의 반강자성체 계면 위에 교환결합력으로 고정된 NiFe 강자성체의 효과가 센싱전류와 독립적으로 자기저항특성을 반영시키는 결과로 나타내었다. 본 연구결과로부터 GMR-SV 바이오 소자 제작시 폭을 넓게 하고 소자내부에 홀로 형성된 EMD 효과로 열적안정성과 자기저항특성의 내구성을 향상시킬 수 있었다.

## References

[1] J. M. Daughton, *J. Magn. Mater.* **192**, 334 (1999).

- [2] H. Kim, V. Reddy, K. W. Kim, I. Jeong, X. H. Hu, and C. G. Kim, *J. Magn.* **19**, 10 (2014).
- [3] G. Li, S. Sun, R. J. Wilson, R. L. White, N. Pourmand, and S. X. Wang, *Sens. Actuators. A Phys.* **A126**, 98 (2006).
- [4] B. M. de Boer, J. A. H. M. Kahlman, T. P. G. H. Jansen, H. Duric, and J. Veen, *Biosens. Bioelectron.* **22**, 2366 (2006).
- [5] K. Yosida, *Phys. Rev.* **106**, 893 (1957).
- [6] D. K. Wood, K. K. Ni, D. R. Schmidt, and A. N. Cleland, *Sens. Actuators. A Phys.* **A120**, 1 (2005).
- [7] J. G. Choi, D. G. Hwang, J. R. Rhee, and S. S. Lee, *Thin Solid Films* **519**, 8394 (2011).
- [8] P. Khajidmaa and S. S. Lee, *J. Korean Magn. Soc.* **23**, 193 (2013).
- [9] Y. J. Nam, T. Y. Lee, and S. H. Lim, *J. Magn.* **19**, 232 (2014).
- [10] W. H. Lee, D. G. Hwang, and S. S. Lee, *J. Magn.* **14**, 18 (2009).
- [11] D. W. Kim, J. H. Lee, M. J. Kim, and S. S. Lee, *J. Magn.* **14**, 80 (2009).
- [12] S. H. Park, K. S. Soh, D. G. Hwang, J. R. Rhee, and S. S. Lee, *J. Magn.* **13**, 30 (2008).
- [13] J. G. Choi, D. G. Hwang, J. R. Rhee, and S. S. Lee, *J. Kor. Phys. Soc.* **6**, 1954 (2013).
- [14] J. G. Choi, K. J. Park, and S. S. Lee, *J. Magn.* **17**, 214 (2012).
- [15] M. A. Ruderman and C. Kittel, *Phys. Rev.* **96**, 99 (1954).
- [16] P. Bruno and C. Chappert, "Magnetism and Structure in Systems of Reduced Dimension", p389-p399, Edited by R. F. C. Farrow et al., Plenum Press, New York (1993).
- [17] S. S. Lee and D. G. Hwang, *J. Magn.* **15**, 17 (2010).