

초고밀도 MRAM용 전류구동형 자화스위칭 소자의 특성 향상 기술

신 경 호*

한국과학기술연구원 미래기술연구본부 나노기술연구센터

Improvement of Current Induced Magnetization Switching Devices for Ultra-High Density Magnetoresistive Random Access Memory

Kyung-Ho Shin*

Nano Device Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 130-650, Korea

The current induced magnetization switching effect at room temperature in various type of structure has been systematically investigated. We report that the effect can be enhanced by an insertion of a copper layer between the free cobalt and the gold capping layer, by the deposition of a ruthenium layer onto a substrate as a buffer layer, by the use of an exchange biased spin valve structure, and by a formation of a nano oxide layer in the middle of a thick cobalt pinned layer. The critical switching current of the nano-sized junction device measures as small as 7.5×10^6 A/cm² and the magnetoresistance as large as 2.5 % even in an exchange biased spin valve structure.

Keywords: CIMS(current induced magnetization switching), spin valve, exchange biased, critical switching current, magnetoresistance

1. 서 론

‘하던 작업을 보조기억장치인 하드디스크 드라이브에 굳이 저장하지 않고 그 상태로 전원을 꺼 두었다가, 필요할 때 컴퓨터를 켜자마자 그 작업을 계속할 수 있다면 얼마나 좋을까?’ 이러한 상상이 가까운 장래에 현실화될 것이라고 기대해도 좋다. 소위 ‘차세대 메모리’가 실용화 단계에 접어들었기 때문이다. ‘차세대 메모리’는 정부차원에서 차세대 성장동력산업으로 선정된 ‘차세대 반도체’ 산업 중 하나의 제품군으로서 외부전원이 차단된 상태에서도 정보를 유지하는 ‘비휘발성 RAM(Random Access Memory)’으로 대표된다. 정보를 유지하기 위해서는 외부전원에 의존하여 동작상태에 있어야만 하는 DRAM이나 SRAM과 같은 휘발성 기억소자의 단점을 극복하고자 개발 중인 메모리이다.

정보의 저장과 처리를 직접 담당하고 정보의 표시와 통신을 간접적으로 지원하는 메모리에 있어서 ‘비휘발성’이라는 특성이 21세기에 접어들어 가장 중요한 화두가 되었

다. ‘언제 어디서나 하고 싶은 일을 할 수 있는’ 유비쿼터스 환경에서 사용할 수 있도록, 가능한 많은 정보관련 기능을 하나의 모바일 기기로서 구현하고자 하는, 소위 디지털 컨버전스(digital convergence) 현상이 빠른 속도로 진행되고 있기 때문이다. 보다 구체적으로 풀어 말하면, 모바일 디지털 컨버전스형 정보기기에 적합한 정보 저장과 처리를 동시에 구현할 수 있는 유니버설 메모리 혹은 통합솔루션이 그 어느 때보다 필요하게 되었기 때문이다. ‘비휘발성’ 유니버설 메모리는 작고, 가벼우며, 전력소모가 작을 뿐 아니라 정보를 저장하고 처리하는 속도까지 빠를 수 있어서 휴대성과 고성능을 필요로 하는 유비쿼터스 기기용 메모리로서 제격이라고 할 수 있다. 한편, 비휘발성 메모리 반도체로서 플래쉬 메모리가 최근 각광을 받고 있지만, 차세대 메모리로서는 분류하지 않는다. 그 이유는 플래쉬 메모리에 데이터를 저장하는 데 걸리는 시간이 매우 길어서 휘발성인 D램이나 S램에 비하여 1000배 혹은 그 이상인 탓에 데이터에로의 임의접근성이 현저히 떨어지기 때문이다. 그래서 플래쉬 메모리는 RAM(Random Access Memory)으로 구분하지 않고 ROM(Read Only Memory)으로 분류되며

*Corresponding author: kshin@kist.re.kr

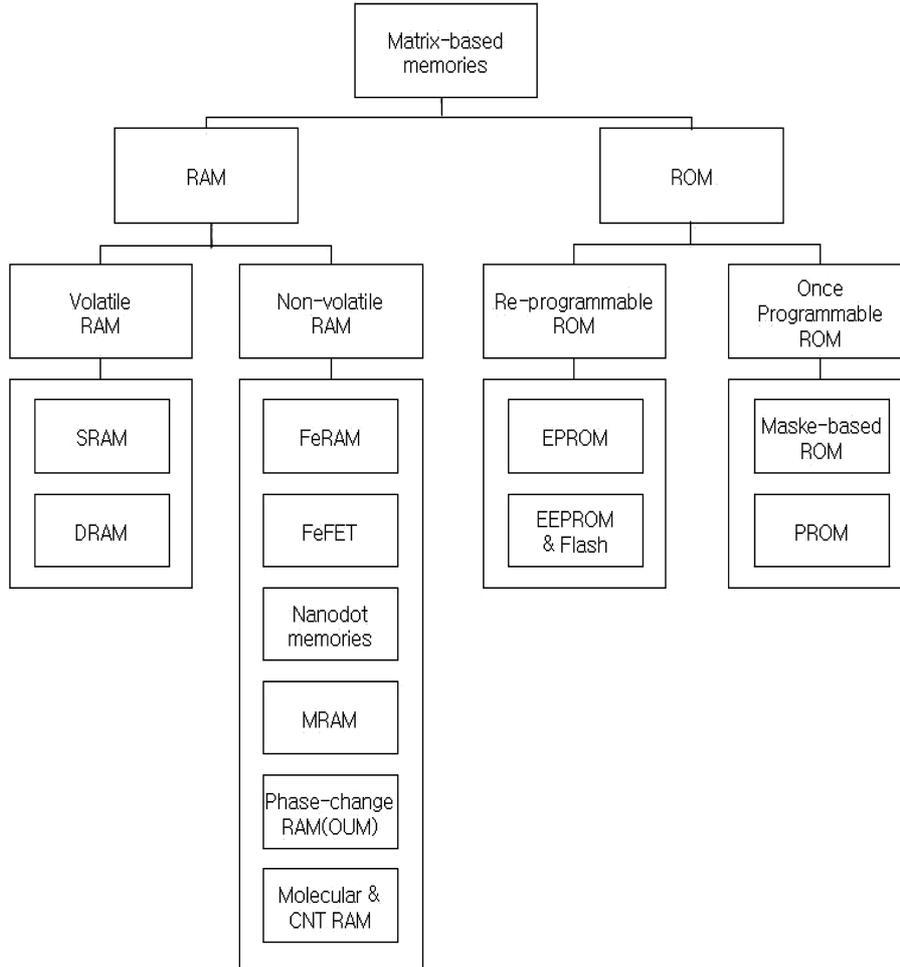


Fig. 1. Classification of memories^[1].

(그림 1)^[1], 인터랙티브(interactive) 기능이 절대적으로 필요한 유니버설 메모리로는 사용할 수 없다.

‘비휘발성’이라는 특성을 가지면서도, 기존의 반도체 메모리인 DRAM과 SRAM에 버금가는 메모리 성능을 가지는 차세대 메모리로서는 대표주자격인 FeRAM(Ferroelectric RAM), MRAM(Magnetoresistive RAM), Phase-Change RAM과 메모리 소자로서 개념정립 단계에 있는 PoRAM (Polymer RAM), SET-RAM(Single Electron Transistor-RAM), CNT-RAM(Carbon Nano Tube-RAM), Molecular RAM 등이 있다(그림 1)^[1]. FeRAM은 플래쉬 메모리에 비하여 메모리특성이 우수한 특성을 가진 비휘발성 메모리이지만 파괴적인 읽기방식과 제한된 기록/재생 수명 그리고 복잡한 제조공정 등의 단점을 가지고 있다. Phase-Change RAM은 고밀도화의 가능성이 높고 제조공정이 상대적으로 간단하여 각광을 받고 있으나, 정보 기록 속도와 데이터 신뢰성의 문제를 해결할 수 있는 획기적인 재료를 개발하여야만 진정한 유니버설 메모리의 반열에 들어설 수 있다. 이들에 비해, MRAM은 비휘발성, 내구성, 정보 기록/재생 속

도와 수명, 정보저장 밀도 등 여러 면에서 월등하게 우수한 성능을 보이고 있다. 웨이퍼레벨에서 절연막의 두께를 얼마나 균일하게 조절할 수 있는냐가 MRAM 상용화 가능성을 좌우한다고 할 수 있는데, Motorola로부터 최근 독립한 Freescale semiconductor사의 개발담당자에 의하면, 4 Mb급 MRAM의 경우 8인치웨이퍼에서의 저항분포 표준편차가 5% 이하이며 전체공정의 수율이 매우 높아서 지금 당장 양산할 수 있는 수준이라고 한다. 기존의 메모리가 서로의 단점을 보완하기 위하여 여러 종류의 메모리를 함께 써야 하는 점을 고려할 때, MRAM은 보조 메모리 없이도 혼자서 충분히 쓸 수 있어서 진정한 유니버설 메모리로서 자리매김할 가능성이 높다.

메모리 발전 방향의 가장 큰 축이 바로 ‘고밀도화’이다. ‘고밀도화’는 메모리의 비트당 가격을 낮추어 가격경쟁력을 확보하는 결정적인 장점 외에, 소형화, 대용량화, 저소비 전력화 등 부수적인 장점을 제공한다. MRAM의 경우, ‘고밀도화’를 위해서 넘어서야 할 기술적 장벽이 여러 가지가 있겠지만, 그 중에서도 고밀도화에 따른 ‘고보자력(high

coercivity) 문제', '비트 선택도(bit selectivity) 문제' 등이 중 단기적으로 해결하여야 할 문제들이다. 이들 문제 외에도, 장기적이고도 근본적인 문제로서, 수십 테라비트(Tb)급의 초고밀도에 접근할 때 자기적으로 기록된 정보가 숙명적으로 가지게 되는 '초상자성 한계'를 극복하여야 하는데, 이는 '고보자력 문제'와 직접적인 관계가 있다.

'고보자력 문제'는 자성박막의 크기가 작아질수록 보자력이 커져서 기록에 필요한 자기장이 커지고 이에 따라 도선에 흘려주어야 할 전류의 양이 커져야 하므로 메모리 작동에 어려움을 더하게 한다. 한편, 자기적으로 기록된 정보는 상온에서 열적으로 불안정해 질 수 있는데, 자기기록정보의 열적 안정성은 소위 relaxation time, τ 에 의하여 정량적으로 주어진다. 즉,

$$\tau = \exp(KuV/k_B)/f_0 \quad (1)$$

의 식으로 표현되는데, 이때, Ku 는 자기이방성 에너지, V 는 자기셀의 부피(magnetic cell volume)이며, f_0 는 시도주파수로서 약 10^9 Hz의 값을 가진다. MRAM이 고밀도화 되면서 셀의 크기가 작아짐에 따라 자기셀의 부피가 작아지게 되고 식 (1)에 주어진 바처럼 relaxation time은 급격히 감소하게 된다. 자기셀의 부피가 동일할 경우, 자기이방성 에너지가 큰 자성물질을 사용함으로써 열적 안정성을 확보할 수도 있다. 그러나, 자기이방성 에너지는 보자력을 증가시키는 역할을 하기 때문에 고밀도화에 따른 '고보자력화 문제'를 더욱 가중시키게 된다. '비트 선택도 문제'는 한편으로는 셀의 크기가 작아질수록 제조공정상 자기셀의 보자력을 균일하게 만들기가 점점 더 어려워지기 때문에, 다른 한편으로는 셀과 셀 간의 거리가 가까워짐에 따라 원하는 자기셀 뿐 아니라 인접 자기셀도 스윙칭되는, 소위 cross-talk 현상을 야기하기 때문에 발생한다.

MRAM의 고밀도화에 따른 상기의 문제들은 현재의 MRAM 기록방식이 바뀌지 않는 한, 획기적으로 극복하기 힘들어서 기가비트(Gb)급 메모리를 실현하기에도 여간 어렵지 않을 전망이다. 현재 MRAM에서는 서로 수직인 두 개의 도선인 워드라인과 비트라인에 필요한 만큼의 전류를 각각 인가하여 두 도선의 교차점에 있는 자기셀(magnetic cell) 내의 자유층(free layer)의 자화방향을 스윙칭함으로써 원하는 정보를 기록하고 있다. 도선에 전류를 흘리면 도선의 주위에 원형의 자기장이 유도된다는 원리, 그리고 임계값 이상의 전류를 도선에 흘려 자성박막의 보자력보다 큰 자기장을 셀 근처에 형성할 때 도선에 흐르는 전류의 방향에 따라 자성박막으로 이루어진 자유층의 자화방향을 결정할 수 있다는 원리를 활용한 것이다. 이때, 두 개의 수직인 도선에 전류를 인가하는 이유는, 교차점에 있는 자성층의 자화방향을 스윙칭하는 데 필요한 전류의 임계값이 하나의 도

선에 전류를 흘려 스윙칭하는데 필요한 임계값에 비하여 절반 정도로 작기 때문에 원하는 비트만을 선택하여 스윙칭할 수 있기 때문이다. 여기서 우리는 MRAM이 고밀도화함에 따라 기술적 어려움이 배가되는 원인이 바로 MRAM에서 현재 채택하고 있는 기록방식의 원리에 기인한다는 것을 알 수 있다. 메모리가 고밀도화 됨에 따라 셀과 셀 사이의 거리가 짧아지는데, 셀을 스윙칭하여 정보를 기록하기 위하여 도선으로부터 발생하는 자기장을 이용하는 한, 근본적으로 cross-talk 현상으로부터 자유로워질 수 없다. 도선 주위의 자기장은 하나의 셀에 한정되어 작용할 수 없는 탓이다. 자기장은 거리에 반비례하여 약해지는데 셀과 셀 사이의 거리가 짧아질수록, 즉 고밀도화 되면 될수록 cross-talk 현상은 점점 더 심해질 것이므로 MRAM의 고밀도화에 어려움을 가중하고 있다. 도선을 투자율이 높은 연자성 물질로 감싸서 자기장을 주어진 셀에 국한시키거나, toggle 스윙칭^[2]이라는 독특한 기록방식을 채택하는 등 매우 기발한 아이디어를 고안하여 MRAM의 고밀도화 가능성을 한층 높였으나, 근본적으로 문제를 해결한 것은 아니다.

도선에 전류를 흘려서 발생하는 자기장으로 자기셀을 스윙칭하는 현재의 MRAM 기록방식과는 전혀 다른 기록방식이 제안되어 현재 연구개발 중이다. 전류구동형 자화스윙칭(이하, CIMS; Current Induced Magnetization Switching)^[3-6], Precessional 스윙칭^[7], 열보조 스윙칭^[8,9] 등이 그것인데, 이들 모두 기존 방식에 비하여 '비트 선택도 문제'를 현저하게 개선하였다. 이 중에서도 CIMS 방식이 성공 가능성이 가장 높은 것으로 평가되는데, 1996년도에 그 기본원리가 제안되어^[3,4] 1999년과 2000년도에 실험적으로 입증된 바 있다^[5,6]. 자기셀의 크기가 작아질수록 CIMS에 의한 정보기록이 보다 용이해지기 때문에 MRAM의 기록밀도를 테라비트(Tb)급 이상으로 높일 수 있을 것으로 기대되고 있다. CIMS 방식에 있어서 가장 큰 어려움으로는 정보를 기록할 때 필요로 하는 임계전류밀도가 10^7 A/cm²로 너무 크다는 점^[3]과 기록 정보를 재생할 때 신호(이 경우엔, 자기저항값)가 1% 내외로 너무 작다는 점 등이 있는데, 이 소자를 실용화하는데 반드시 극복하여야 하는 문제이다. 본 논문에서는 CIMS 소자를 스윙칭하는 데 필요한 임계전류밀도값을 낮춤과 동시에 자기저항값을 크게 할 수 있는 방법을 제안하여 실험적으로 입증하고자 한다.

2. 전류구동형 자화스윙칭의 이론적 배경 및 소자 설계

2.1. 이론적 배경

MRAM의 기록/재생원리는 자기저항(이하, MR; Magneto-Resistance)이라는 물리적 현상에 그 기반을 두고 있다. 자기저항에는 Ordinary MR, 이방성(Anisotropic) MR, Colossal

MR, 거대(Giant) MR[이하, GMR], 터널링(Tunneling) MR[이하, TMR], Anomalous MR, Ballistic MR 등이 있다^[10]. 이 중에서 신호의 크기와 기록에 필요한 임계외부자기장의 크기를 고려하여, GMR 및 TMR 현상이 하드디스크 드라이브 재생헤드의 작동원리로서 현재 실용화되어 있고, MRAM 소자로서는 TMR 접합소자가 활용되고 있다. 실용화된 GMR과 TMR의 경우에도 소위 스핀밸브(spin valve)라는 구조를 가지고 있는데, 두 개의 자성층 중에서 한 개의 자성층의 자화방향이 외부자기장의 크기와 무관하게 고정되어 있는데 반하여 다른 한 개의 자성층은 외부자기장의 방향에 따라 비교적 자유롭게 자화반전이 될 수 있게 고안한 것이다. 고정층(pinned layer 혹은 fixed layer)은 반강자성체(antiferromagnet)에 의하여 교환결합 바이어스(exchange biased) 시키거나, 자유층(free layer)에 비하여 보자력이 큰 물질 혹은 구조를 가지게 하여 구현한다. 스핀밸브 구조를 가지는 GMR 혹은 TMR 소자의 경우 두 개의 강자성체 사이에 한 층의 비자성체가 끼워져 있는 기본구조를 가지는데, GMR의 경우엔 구리(Cu)와 같은 전도성 비자성체가, TMR의 경우엔 알루미늄나(AIOx) 혹은 산화마그네슘(MgO)과 같은 절연체가 끼워져 있다. 이들 GMR 및 TMR 소자를 이용하여 신호를 재생할 때는 하나의 비자성체를 사이에 둔 두 개의 자성체 박막의 자화상태가 서로 평행한가 아니면 서로 반평행한가에 따라 저항의 크기 혹은 전류의 크기가 달라지는 원리를 이용한다.

CIMS 소자는 스핀전달 토크(이하, STT; Spin Transfer Torque)라고 불리는 새로운 물리현상을 이용하는데, GMR 혹은 TMR 현상과 동일한 원리에 의거하되 입력과 출력을 반대로 하여 적용한 것이라고 할 수 있다. 즉, GMR 혹은 TMR의 경우 스핀에 의해서 전류의 흐름을 제어하는 반면, CIMS의 경우엔 전류에 의해서 스핀의 거동을 제어한다. CIMS에 대한 이론은 coherent spin-torque 모델이 1996년도에 가장 먼저 제안되었고^[3,4], 이 모델로서는 설명되지 않는 실험결과를 해석하기 위하여 effective magnetic temperature 모델이 2002년도에 새롭게 제안되었다^[11]. 각 모델은 스핀분극된 전류(spin-polarized current)가 어떤 물리적 기구를 통하여 스핀 각운동(spin angular moment)을 국부 자성체(local magnet)에 전달하는가에 대하여 서로 다른 관점으로 해석하고 있다. 최근에 발표된 수치계산 연구에 의하면, 이들 두 모델이 서로 상충되는 것이 아니라, 측정하는 전류범위가 어디냐에 따라 적용될 수 있다고 한다^[12]. 본 논문에서는 응용 가능성이 높은 전류영역인 coherent 모드를 잘 설명할 수 있는 coherent spin-torque 모델에 대하여 좀더 자세하게 언급하도록 하겠다.

Coherent spin-torque 모델은 IBM의 J. C. Slonczewski^[3]와 Carnegie Mellon 대학의 L. Berger^[4]가 1996년도에 독립적으

로 제안한 이론에 기초한다. 자기 동역학(magnetic dynamics)을 기술하는 가장 기본적인 운동방정식인 Landau-Lifshitz-Gilbert(LLG) 방정식의 두 번째 항인 damping 항에 스핀전달토크(spin-transfer torque, 이하 STT)라고 불리는 새로운 토크항을 같이 고려하여 자기적 거동을 예측하고자 했던 것이다. LLG 방정식은 아래의 식 (2)와 같이 주어진다.

$$\frac{d\hat{m}}{dt} = -\frac{\gamma}{1+\alpha^2}[\hat{m} \times \vec{H} + \alpha \hat{m} \times (\hat{m} \times \vec{H})] \quad (2)$$

식 (2)에서 γ 는 gyromagnetic비(ratio; $= -1.76 \times 10^7 / \text{Oe} \cdot \text{sec}$), α 는 damping 상수, M_s 는 포화자화값, \vec{H} 는 유효 자기장, \hat{m} 은 자기모멘트의 방향을 나타낸다. [...] 안의 첫 번째 항 ($\hat{m} \times \vec{H}$)는 유효 자기장, H 의 주변을 m 이 세차운동하는 거동을 기술하며, 두 번째 항 ($\alpha \hat{m} \times \hat{m} \times \vec{H}$)는 m 이 유효 자기장, H 방향으로 정렬하게 하는 ‘damping motion’을 기술한다. 식 (2)의 두 번째 항인 damping 항에 추가로 고려해야 할, 인가전류에 의한 새로운 토크항인 STT는 아래의 식 (3)과 같이 주어진다.

$$(\partial M / \partial t)^{STT} = \gamma \cdot a_J / M_s \cdot M \times (M \times p) \quad (3)$$

위 식에서 a_J 는 spin-torque의 크기를 의미하는데 물질에 따라 다르지만 대략 50~100 Oe(10^7 A/cm^2 의 전류밀도에 해당)의 값을 가지며, M_s 는 포화자화값, p 는 전자 분극(polarization)의 방향을 나타낸다. 분극의 방향이 자화용이축과 평행한 경우, 이 새로운 토크항은 전류의 방향에 따라 Gilbert damping을 증가시키거나 혹은 반대방향으로 작용하는 anti-damping 항으로 작용하게 된다. 전류의 방향에 의해 STT가 anti-damping 항으로 작용하는 경우, Gilbert damping과 STT에 의한 anti-damping 항이 완벽하게 평형을 이루는 조건은 다음의 식 (4)와 같다^[3].

$$a_{JC} = \alpha(2\pi M_s \pm H_{ext} + H_k) \sim 2\pi \alpha M_s \quad (4)$$

위 식 (4)에서 H_{ext} 는 외부 인가 자장이며, H_k 는 자화용이축의 이방성 field이다. 전형적인 자성 물질 상수인 α 값은 약 0.01, 포화자화값 M_s 를 1400 emu/cm^3 이라고 가정하여 계산해 보면, a_{JC} 는 대략 100 Oe 정도로 10^7 A/cm^2 의 전류밀도에 상응한다. 전류의 방향에 의해 STT가 anti-damping 항으로 작용하는 경우, 전류밀도가 이 임계값보다 크게 되면 anti-damping 효과가 지배적으로 작용하게 됨으로써 자화방향이 자화용이축으로부터 점점 멀어지게 되어 궁극적으로는 전류방향에 상응하는 방향으로 자화반전을 하게 된다.

이상에서 기술한 Coherent spin-torque 모델은 자성층이 단자구(single domain)라는 가정하에 스핀분극된 전류에 의해서 자기적 여기(magnetic excitation) 현상이 유기될 수 있

음을 예측하였다. CIMS 현상을 관찰하기 위해서는 일정한 값, 예컨대 10^7 A/cm²의 전류밀도 이상의 전류를 인가하여야 하기 때문에 현실적으로 전류가 통과하는 소자의 단면적이 100 nm×100 nm 정도로 매우 작아질 것이고, 따라서 이 정도의 나노접합소자의 자성박막은 자연스럽게 단자구로 거동할 것이어서 모델을 제시하기 위하여 전개하였던 가정이 비교적 현실적이라고 할 수 있다.

2.2. 소자 설계

CIMS 소자에 대한 연구에서 추구하고자 하는 바는 서론에서 언급한 바와 같이, ‘스윙칭하는 데 필요한 임계전류밀도값을 낮춤과 동시에 자기저항값을 크게 할 수 있는 방법

을 제안하여 실험적으로 입증하는 것’이다. 이론으로 제시된 CIMS 효과를 처음으로 입증했던 1999년^[5]과 2000년^[6]의 연구에서 사용했던 Co/Cu/Co의 간단한 스핀밸브 적층구조를 다층박막의 기본구조로 하여 물질과 적층구조를 변화시키면서 CIMS 효과를 개선하고자 하였다. 참조 삼아 채택한 첫 번째 타입의 적층구조는 Cu(50 nm)/Co(11 nm)/Cu(6 nm)/Co(2 nm)/Au(5 nm)이었다(그림 2(a) 참조).

통상의 경우, 패터닝 공정 등 추후에 계속되는 공정 중에 다층박막을 보호하기 위하여 나노필라 상층부에 Au 박막과 같은 캡핑층(capping layer)을 증착하는데, 이 경우 Co 자유층과 Au 캡핑층과의 격자상수 차이가 커서 Co 자유층에 국부적인 스트레인이 적지 않게 유지되는 것으로 알려져 있

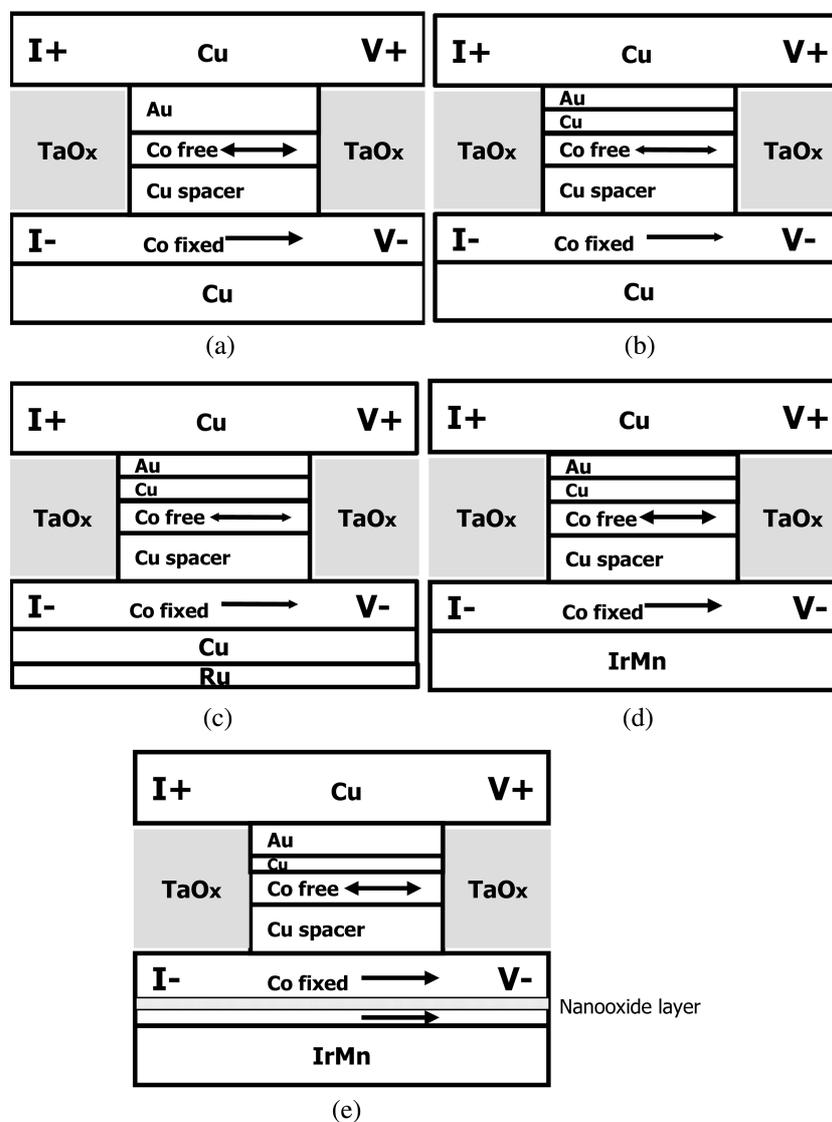


Fig. 2. Schematics of cross-sectional view of the nano sized CIMS(Current Induced Magnetization Switching) junctions. (a) a simple spin valve, (b) a simple spin valve with a Cu interlayer between a gold(Au) capping layer and a thin Co free layer, (c) a simple spin valve with a ruthenium(Ru) buffer layer and a Cu interlayer, (d) an exchange biased spin valve by an antiferromagnetic IrMn layer, and (e) an exchange biased spin valve with a nano oxide layer.

다^[13]. 본 연구에서는 기본구조에서 Co 자유층에 유기되는 국부적인 스트레인을 최소화하기 위하여, Co 자유층과 Au 캡핑층 사이에 Cu 사잇층을 삽입하였다. 두 번째 타입은 Cu(50 nm) / Co(11 nm) / Cu(6 nm) / Co(2 nm) / Cu(2 nm) / Au(5 nm)이었다(그림 2(b) 참조).

두꺼운 Co 고정층의 결정성장을 조절함으로써 CIMS 효과를 증대하기 위해서 세 번째 타입에서는 Ru 버퍼층을 Cu 박막을 기판에 증착하기 전에 성막하였다. 세 번째 타입은 Ru(10 nm) / Cu(50 nm) / Co(11 nm) / Cu(6 nm) / Co(2 nm) / Cu(2 nm) / Au(5 nm)의 적층구조를 가졌다(그림 2(c) 참조).

한편, 나노접합소자 내 두 개의 자성층이 모두 단자구 (single domain)를 가지고 있을 때, CIMS 효과를 극대화할 수 있다고 전술한 바 있다. 얇은 자유 자성층의 경우, 필요한 만큼의 형상이방성을 주고 나노급 사이즈로 패터닝함으로써 어렵지 않게 단자구로 만들 수 있으나, 두꺼운 고정 자성층의 경우엔 단자구로 만들기가 용이하지 않다. 또한 외부자장에 의해서거나 혹은 전류인가에 의해서 두 개의 강자성 박막에서의 자화방향을 서로 평행하거나 반평행하게 조작할 때, 두 가지의 자화상태가 보다 확실하게 분리되어 있어야 MR 효과 혹은 CIMS 효과를 크게 얻을 수 있다. 상

기의 두 가지 이유, 즉 단자구 형성과 자화상태 분리도 증대를 동시에 구현하기 위해서 하부의 두꺼운 고정 자성층을 반강자성체(antiferromagnet)로 교환결합 바이어스 시켰다. Ru(10 nm) / Py(6 nm) / IrMn(8 nm) / Co(11 nm) / Cu(6 nm) / Co(2 nm) / Cu(2 nm) / Au(5 nm)의 적층구조를 가지는 것이 네 번째 타입이다(그림 2(d) 참조). 단자구 형성과 자화상태 분리도 증대를 동시에 구현하기 위해서라기는 하지만, 두꺼운 고정 자성층을 반강자성체로 교환결합 바이어스 시켰을 경우, 도체인 반강자성체로도 전자가 흐르게 된다. 이때, 두꺼운 Co 고정층을 지나면서 한 쪽 방향으로 스핀분극된 전자가 반강자성체를 통과하면서는 스핀정보를 잃어버리는 소위, ‘depolarization’ 현상을 겪게 된다. 본 연구에서는 반강자성체 박막을 패터닝하지 않음으로써 하부전극을 흐르는 전자가 부분적으로만 ‘depolarization’ 현상을 경험하도록 하여 CIMS 효과가 급격하게 감소하는 것을 방지하였다.

마지막으로 상기의 ‘depolarization’ 현상을 근본적으로 차단하기 위하여 두꺼운 Co 고정층 내에 나노 산화층(NOL; nano oxide layer)을 삽입하였다. 하부전극을 흐르는 전자가 반강자성체를 통과하면서 ‘depolarization’ 현상을 경험하지 못하도록 하기 위해서이다. 이 나노 산화층은 스핀분극된 전

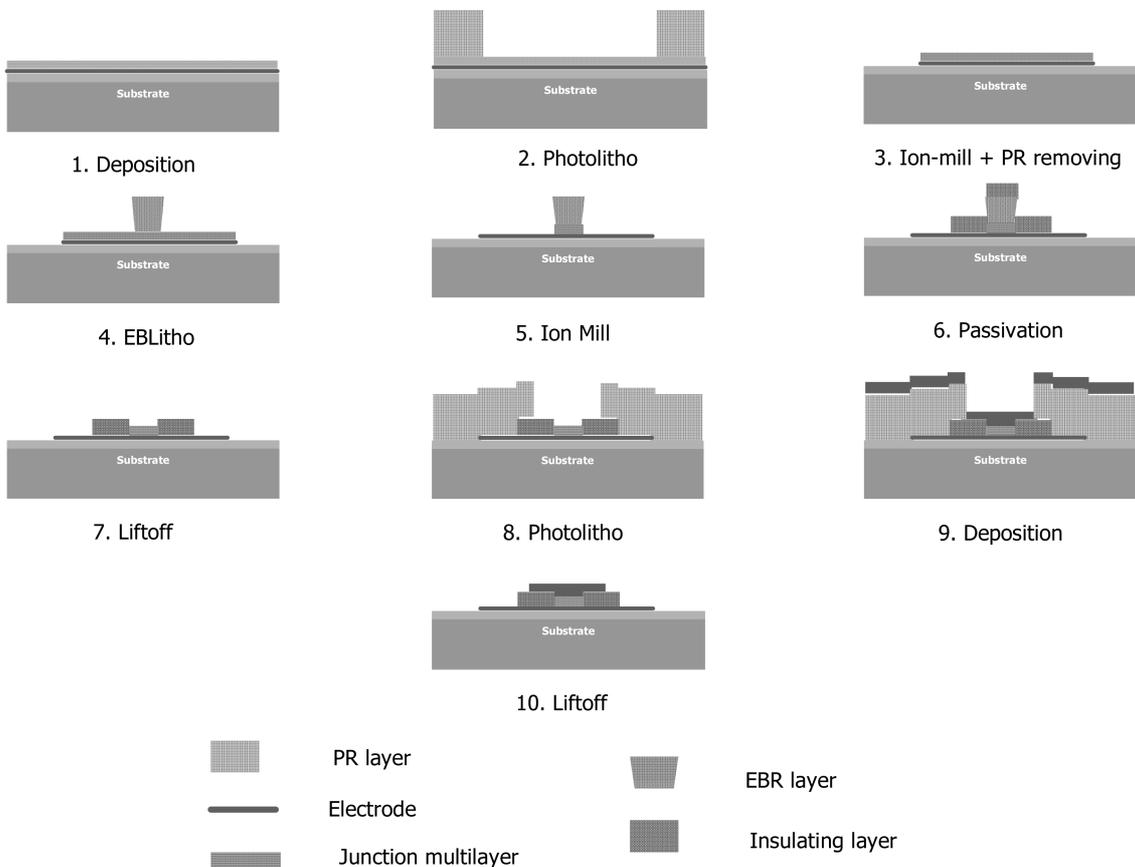


Fig. 3. Main steps of the device fabrication process.

도전자가 자성층과 나노 산화층과의 경계면에서 ‘경면반사 (specular reflection)’하면서 스핀정보를 지속적으로 개선하는 것으로 알려져 있어서 CIMS 효과를 더욱 증대할 것으로 기대하였다. 다섯 번째 타입은 네 번째 것인 Ru(10 nm)/Py(6 nm)/IrMn(8 nm)/Co(11 nm)/Cu(6 nm)/Co(2 nm)/Cu(2 nm)/Au(5 nm)의 적층구조를 가지되, 반강성체에 의해서 교환결합 바이어스된 두꺼운 Co 고정층 내에 수 Å 내외의 나노 산화층을 삽입한 적층구조를 가지도록 설계하였다(그림 2(e) 참조).

3. 실험 방법

그림 3은 CIMS 소자를 제작하기 위한 여러 가지 제조공정 중, 주요 스텝들을 도식화하여 그린 것이다. 가장 먼저, 2.2에서와 같이 설계된 소자의 적층구조를 가지는 다층박막을 DC 마그네트론 스퍼터링 방법으로 증착하였다. 증착 중에 자성박막에 일축이방성을 부여하기 위하여 200 Oe 가량의 외부자장을 인가하였으며, 사용한 기판은 300 nm의 자연산화막을 가지는 n형 실리콘이었다. 그림 2에서는 나 타내 보이지 않았으나, 다층박막을 성막하기 전에 적층구조 각각의 경우 최적의 특성을 구현할 수 있도록 적층구조에 따라 Ru이나 퍼멀로이를 버퍼층으로 먼저 증착하였다. 그림 2의 (d)의 경우에는 나노산화층(이하, NOL)을 Co 고정층 중간에 삽입하기 위하여, Co 고정층의 하부층을 증착한 후, 샘플을 메인 챔버에서 로드록(load lock) 챔버로 꺼낸 다음, 산소분압과 산화시간의 곱이 10^{-4} 토르·초(torr·sec)가 되는 조건에서 산화시켰다. NOL을 Co층 위에 형성시킨 후 샘플을 다시 메인 챔버에 넣어 설계에 따라 다층박막을 성막하였다. 다음 공정은 Au 캡핑층까지 성막된 다층박막을 광학적으로 리소그래피하고 이온 밀링 방법으로 식각하여 하부전극의 틀을 형성하는 것이다. 아령 모양으로 패터닝된 다층박막의 중앙 부위에 95 nm×150 nm 크기의 나노접합을 제작하는 것이 CIMS 소자를 제작하는 데에 있

어서 가장 중요하고도 어려운 작업이다. 나노사이즈로 리소그래피하기 위해서 이빔리소 장비를 이용하여 패턴을 네가티브형 이빔레지스트 위에 그린 다음 현상하여 이빔레지스트 자체를 밀링 마스크로 삼아 이온 밀링 방법으로 식각하였다. 표 1과 같이 이빔레지스트를 밀링 마스크로 이용하여 CIMS 나노접합을 제작하기 위하여 수많은 실험을 행하였다. 이온밀링 중에 물리적 식각속도가 작아서 마스크로서 역할을 하는가 하는 것과 얼마나 손쉽게 lift-off 할 수 있는가 하는 두 가지 선택기준으로 볼 때, ZEP-520A가 가장 우수하였으나, ‘네가티브형’ 이빔레지스트를 사용하였을 때의 장점이 많아서 본 연구에서는 네가티브형 이빔레지스트인 ma-N2403을 사용하였다. 식각공정은 Co 고정층의 윗면이 드러날 때 즉시 정지하였는데, Cu 사잇층이 연속적으로 남으면 shunt 현상에 의하여 MR의 신호음이 작아지고 Co 고정층이 식각되기 시작하면 과도 식각된 Co 고정층으로부터 누설자계(stray field)에 의한 자기장이 형성되어 Co 자유층의 자화과정에 영향을 주기 때문에 식각공정의 정지시점을 매우 정확하게 맞추어야 한다. 그림 3의 5 번째 공정스텝을 마친 나노접합의 전형적인 SEM 사진을

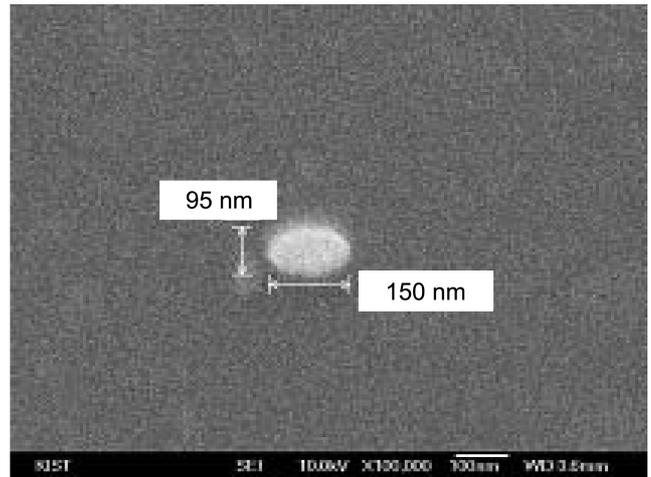


Fig. 4. SEM image of a nano-sized junction.

Table 1. E-beam lithography done with various resists for CIMS junctions at nanoscale

ER	Tone	Milling resistance	Smallest junction size got electrical contact	Problem to solve	Remark
ma-N2403	Negative	Mill-rate: 2.66 Å/s	200 nm	No undercut structure for lift-off for many cases	Need more careful control
PMMA*	Positive	very weak	200 nm	After milling: - sticking strongly to substrate - shrinking junction size	Very difficult to control the lift-off process and junction size
ZEP**	Positive	Mill-rate: 0.84 Å/s~0.96 Å/s	200 nm	- Getting smaller and controllable junction sizes	Promising if ‘positive’ one is applicable

*Small and noisy CPP-GMR signals were obtained.

**CPP-GMR signals were obtained.

그림 4에 나타내 보였다. 다음 공정으로는 반응(reactive) 스퍼터링 방법으로 산화탄탈륨(TaO_2) 박막을 나노접합 주위에 나노접합의 두께보다 두껍게 입힘으로써 나노접합을 제외한 부분에서는 하부전극과 상부전극이 전기적으로 절연되도록 소위 ‘passivation’ 공정을 행하였다. 이빔레지스트를 lift-off 방법으로 제거하여 접합 부위에 전기적 접촉을 노출시킨 뒤, 광학리소그래피 방법으로 상부전극의 모양을 설정하였다. DC 스퍼터링 방법으로 Cu를 증착하여 나노접합 위에 상부전극을 형성한 후에, 광학레지스트를 제거함으로써 CIMS 나노접합소자 제작을 완성하였다.

CIMS 소자용 패터닝 공정을 행하기 전에, 여러 가지 적층 구조를 가지는 다층박막에 대하여 외부자장의 크기에 따른 자성특성 변화[M(H)]를 VSM(Vibrating Sample Magnetometer)으로 측정하였다. 패터닝을 마친 CIMS 소자가 외부자장에 따라 접합소자의 전기저항이 어떻게 변화하는지를 볼 수 있는 MR 측정[이하, R(H)], 그리고 DC 전류를 나노접합에 직접 인가함으로써 저항이 어떻게 변화하는지를 볼 수 있는 CIMS 측정[이하, R(I)] 등 두 가지 전하-자기 수송특성 측정은 4단자(four point probe)법으로 측정하였다(그림 5). R(H) 측정 및 R(I) 측정 모두 상온에서 실행하였으며, DC 전류가 기판면에 수직한 방향으로 나노접합을 통과하는, 소위 ‘CPP(Current Perpendicular to the Plane)’ 구조의 소자에 대하여 측정하였다. 소자의 자기저항을 측정하는 R(H) 측정에서는 수십 μA 의 전류를 인가한 반면, CIMS 효과를 측정하기 위해서는 $\pm 10 mA$ 혹은 그 이상의 전류를 인가하였다. CIMS 측정시 나노접합에 인가한 전류의 인가속도는 $75 \mu A/sec$ 이었다. 인가전류의 부호는 나노접합에서의 전류의 방향으로 정의하였는데, 전류가 얇은 Co층(자유층)에서 두꺼운 Co층(고정층)으로 흐를 때, 즉 상부전극에서 하부전극으로 흐를 때 ‘양(positive)’, 그 반대방향으로 흐를 때 ‘음(negative)’으로 정하였다.

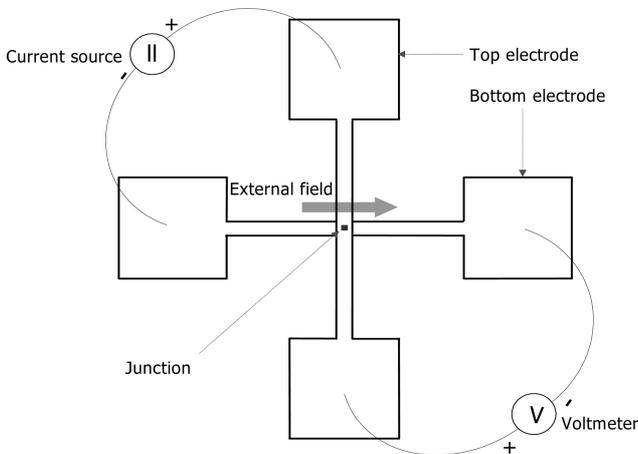


Fig. 5. Measurement diagram for R(H) and R(I) curves in a CPP(Current Perpendicular to the Plane) structure.

4. 결과 및 고찰

1.1. 사이트층과 버퍼(buffer)층을 이용한 CIMS 소자의 특성 향상

2.2에서의 설계방안에 따라 Cu 사이트층과 Ru 버퍼층의 효과를 확인하기 위하여 세 종류의 스피넬브형 CIMS 소자를 ‘3. 실험 방법’에서 기술한 바와 같은 방법으로 제작하였다. 첫 번째 타입은 가장 간단한 스피넬브형으로, Cu(50 nm) / Co(11 nm) / Cu(6 nm) / Co(2 nm) / Au(5 nm)(그림 2(a) 참조), 두 번째 타입은 Cu 사이트층이 상부의 얇은 Co층과 Au 캡핑층 사이에 삽입된 것으로, Cu(50 nm) / Co(11 nm) / Cu(6 nm) / Co(2 nm) / Cu(2 nm) / Au(5 nm)(그림 2(b) 참조), 마지막으로 세 번째 타입은 사이트층과 버퍼층이 모두 사용된 것으로, Ru(10 nm) / Cu(50 nm) / Co(11 nm) / Cu(6 nm) / Co(2 nm) / Au(5 nm)(그림 2(c) 참조) 등의 적층구조를 가진다.

첫 번째 타입의 간단한 스피넬브형 CIMS 소자에서는 그림 6(a)에서 보는 바와 같이, R(H) 곡선 상에서 $50 m\Omega$ 정도의 저항이 주어진 외부자장의 크기에서 갑자기 바뀌는 자기저항 효과가 뚜렷하게 관찰되에도 불구하고 R(I) 곡선 상에서는 인가전류의 크기와 방향에 따라 뚜렷한 저항변화가 없어서 CIMS 효과를 관찰하기 어려웠다. 달리 말하면, 자유층인 얇은 Co층의 자화방향이 외부자기장에 의해서는 확실하게 바뀌지만, 인가전류에 의해서는 그렇지 않다는 것을 알 수 있다. CIMS 효과가 이 타입의 나노접합소자에서 잘 보기 어려운 원인은 Co 자유층과 Au 캡핑층 사이에 격자상수의 차이가 커서 Co 자유층에 국부적인 스트레인이 적지 않게 유기된다¹³⁾는 사실과 유관한 것으로 보여진다.

Co 자유층과 Au 캡핑층 사이에 격자상수의 차이가 커서 생기는 국부적인 스트레인에 의해서 CIMS 효과가 작아진다면 Co 자유층과 격자상수가 비슷한 Cu층을 Au 캡핑층 증착 전에 Co 자유층에 증착해 보자는 아이디어를 가지고 두 번째 타입의 스피넬브형 CIMS 소자를 제작하였다. 기대하였던 바대로 이 타입의 나노접합소자에서는 자기저항 효과 뿐 아니라 CIMS 효과도 뚜렷하게 관찰할 수 있었다(그림 6(b)). 그림 6(b)의 오른쪽 그림인 R(I) 곡선을 자세히 살펴보면, 인가전류의 부호가 ‘양’에서 ‘음’으로 바뀌고 나서 주어진 임계전류값에서 급작스럽게 소자의 전기저항이 증가함을 알 수 있다. 여기서 소자의 전기저항 증가는 CIMS 소자의 필라(pillar)에 있는 Co 자유층의 자화방향이 Co 자성층의 자화방향과 서로 반평행 상태로 되었기 때문이다. 앞서 언급한 바와 같이, CIMS 소자에서는 소자를 스위칭시키는 임계전류값의 크기를 작게 하는 것이 매우 중요하며, 이 값을 측정하고 비교하는 것이 중요한 일이다. 본 논문에서는 나노접합소자에서의 두 개의 자성층의 자화방향을 서로 평행한 상태에서 반평행 상태로 바뀌게 하는 전류값, ‘P-AP 임계전류값’을 I_C^- 로, 서로 반평행한 상태에서 평행 상

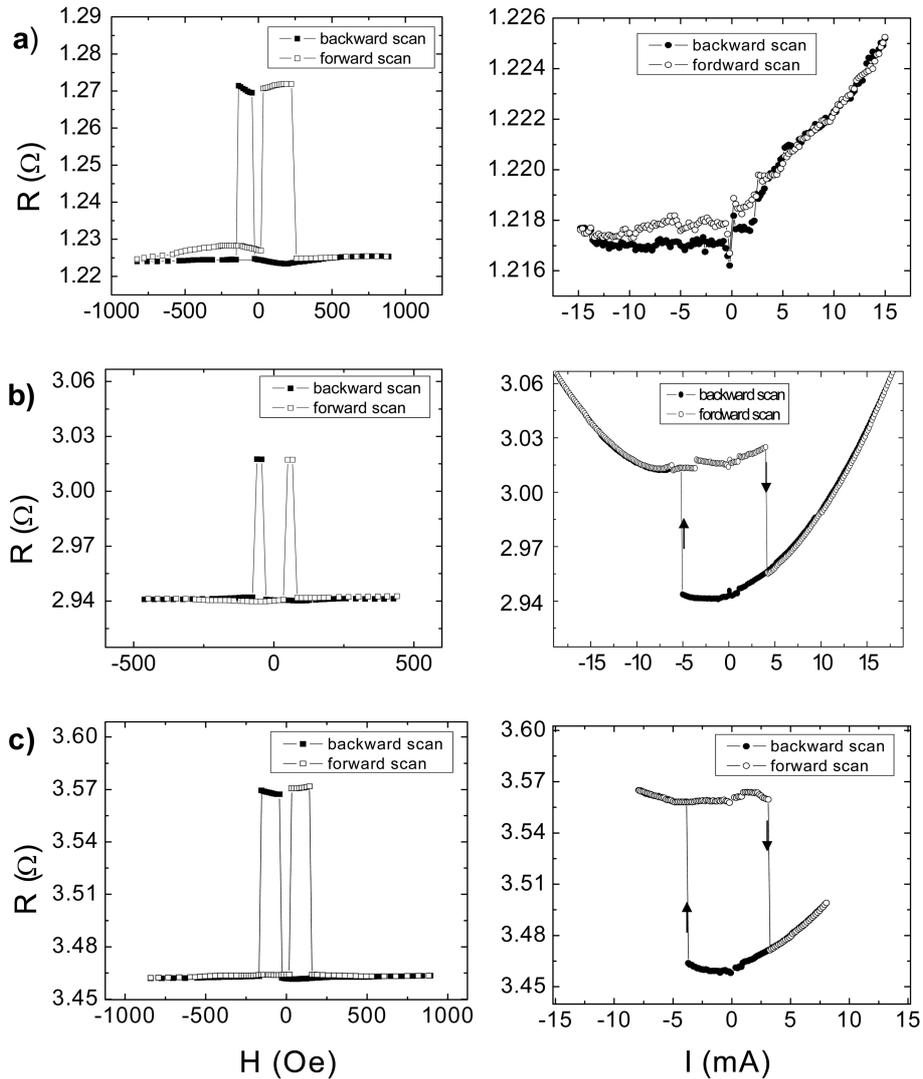


Fig. 6. Variation of MR and CIMS signals with an interlayer and/or a buffer layer. (a) a simple spin valve, (b) a simple spin valve with a Cu interlayer between a gold(Au) capping layer and a thin Co free layer, and (c) a simple spin valve with a ruthenium(Ru) buffer layer and a Cu interlayer; $R(H)$ is represented by open and solid squares and $R(I)$ by open and solid circles.

테로 바뀌게 하는 전류값, ‘AP-P 임계전류값’을 I_C^+ 로 표시하였다. 두 번째 타입에서의 I_C^- 과 I_C^+ 은 각각 -5.05 mA와 +4.00 mA로 측정되었다. 여기서, $R(I)$ 곡선의 임계전류값들(I_C^- 및 I_C^+)에서 바뀐 저항 변화의 크기가 70 mΩ으로 $R(H)$ 곡선에서의 저항 변화의 크기와 동일하다는 것에 유의하여 보자. 자기저항 효과와 CIMS 효과에 의하여 각각 얻은 전기저항 변화의 크기가 동일하다는 것은 인가전류에 의해서 나노접합소자 내 Co 자유층의 자화반전이 외부자장을 인가하였을 때와 다름없이 충분히 이루어지고 있음을 증명하는 것이다.

세 번째 타입의 스핀밸브는 Cu 사잇층은 물론, 기판 위에 Cu층을 증착하기 전에 Ru 버퍼층을 먼저 증착하여 두 번째 타입의 스핀밸브보다 CIMS 특성을 개선할 수 있는가를 살

펴보고자 설계 · 제작하였다. Ru 버퍼층을 열산화 시킨 Si 기판 위에 먼저 증착함으로써 Co 고정층의 자기이방성을 보다 확실하게 조절할 수 있었는데, 두 가지 타입의 스핀밸브 적층구조에 대하여 $M(H)$ 곡선을 서로 비교함으로써 이를 확인하였다. 그림 7에서 볼 수 있는 바와 같이, Ru 버퍼층이 없는 경우에는 보자력에 해당하는 외부자기장을 인가하였을 때, 확실하게 자화반전하지 않아 소위 ‘tail’을 보였는데, 이는 두꺼운 Co층에서의 일축이방성이 충분히 발달하지 않은 것에 기인한다. 반면, Ru 버퍼층이 있는 경우엔, 보자력 부근에서 자화반전을 확실하게 함으로써 두꺼운 Co층에서의 일축이방성이 충분히 발달하였음을 간접적으로 알 수 있다. 완전한 자화반전에 힘입어 자기저항값이 증가하였으며, 동일한 이유로 CIMS 효과도 증대되었다(그림

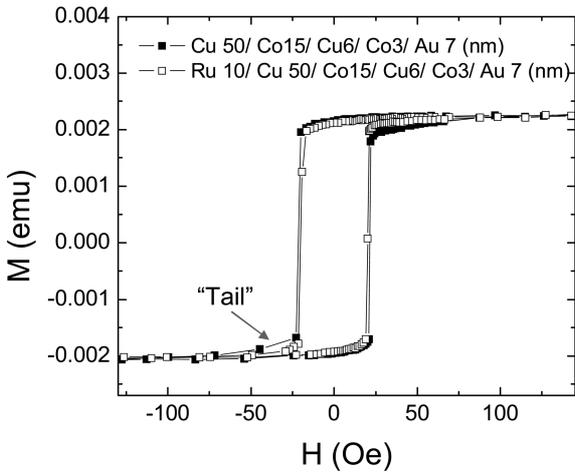


Fig. 7. $M(H)$ curves of spin valves with (open squares) and without (solid squares) a Ru buffer layer.

6(c)). 두 번째 타입의 경우와 마찬가지로, 자기저항 효과와 CIMS 효과에 의하여 각각 얻은 전기저항 변화의 크기가 동일하다는 것을 관찰하였으며, 인가전류에 의해서 나노접합 소자 내 Co 자유층의 자화반전이 외부자장을 인가하였을 때와 다름없이 충분히 이루어지고 있음을 재확인하였다.

두 개의 임계전류값들(I_c^- 및 I_c^+)을 산술평균한 후 단위 면적당의 전류밀도로 환산하여 얻은 값을 평균 임계스윕칭 전류, J_c 라고 할 때, 즉

$$\langle J_c \rangle = \frac{|I_c^+| + |I_c^-|}{2 \times \text{junction area}} \quad (5)$$

라고 할 때, 세 번째 타입의 경우 $2.4 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ 으로 $3.5 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ 인 두 번째 타입에 비하여 30% 가량 낮은 임계스윕칭전류값, J_c 를 가진다. 또한, J_c 에서의 전기저항의 변화값에 있어서도 세 번째 타입의 경우 $95 \text{ m}\Omega$ 으로서, 두 번째 타입에 비하여 35% 가량 높은 값을 보여 CIMS 특성이 우수함을 알 수 있다.

4.2. 교환결합 바이어스된 CIMS 소자의 임계전류값 저감

2.2에서 설계한 바와 같이, 단자구 형성과 자화상태 분리도 증대를 동시에 구현하기 위해서 하부의 두꺼운 고정 자성층을 반강자성체(antiferromagnet)로 교환결합 바이어스시킨 Ru(10 nm)/Py(6 nm)/IrMn(8 nm)/Co(11 nm)/Cu(6 nm)/Co(2 nm)/Cu(2 nm)/Au(5 nm)의 다층박막을 성막하였다(그림 2(d) 참조). 준비된 다층박막을 '3. 실험 방법'에서 기술한 바와 같은 방법으로 패터닝함으로써, 교환결합 바이어스 스핀밸브(이하, EBSV; Exchange-biased spin valve)형 CIMS 소자를 제작하였다.

두꺼운 Co 고정층이 반강자성체인 IrMn에 의해서 교환결합 바이어스된 스핀밸브(EBSV) 다층박막의 자기이력곡선

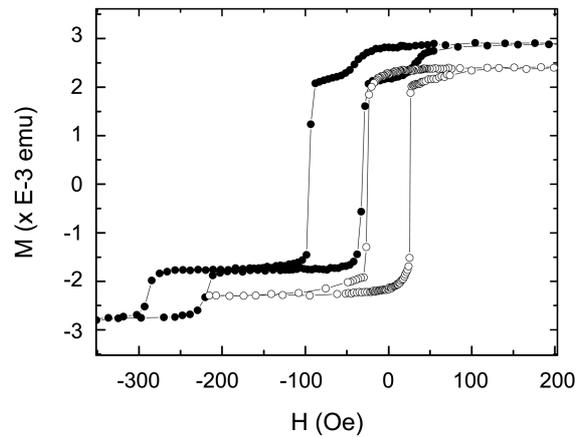


Fig. 8. $M(H)$ curves of the exchange biased spin valve multilayer (solid circles) and the simple spin valve multilayer (open circles).

을 두 번째 타입의 단순 스핀밸브 다층박막의 자기이력곡선과 비교하여 나타내 보였다(그림 8). 참고로, 두 번째 타입의 적층구조는 Cu(50 nm)/Co(11 nm)/Cu(6 nm)/Co(2 nm)/Cu(2 nm)/Au(5 nm)이다. 그림 8에서 볼 수 있듯이, EBSV의 경우 원점($H=0 \text{ Oe}$)으로부터 음의 방향으로 약 65 Oe 만큼 이동되어져 있다. 즉, 두꺼운 Co 고정층이 반강자성체인 IrMn에 의해서 교환결합 바이어스되어 있음을 보이는 것으로 65 Oe의 pinning field를 가지고 있다고 표현한다. 이러한 바이어스 field는 그림 9의 왼편 그림인 EBSV 소자의 MR 곡선에서도 거의 동일한 값을 나타내고 있어서 다층박막에서의 바이어스 효과를 나노접합소자화 되었을 때도 그대로 유지하고 있음을 알 수 있다. 나노접합소자에서도 바이어스 특성이 열화되지 않은 것은 두꺼운 Co 고정층과 함께 반강자성체인 IrMn 박막이 부분적으로만 패터닝됨으로써 가능한 일이다^[14].

EBSV 소자의 MR 특성과 CIMS 특성을 측정하여 그림 9에 나타내었다. 그림 9의 오른편 그림인 $R(I)$ 곡선을 자세히 살펴보면, 인가전류의 부호가 '양'에서 '음'으로 바뀌고 나서 음의 임계전류값에서 급작스럽게 소자의 전기저항이 증가함을 알 수 있으며, '음'에서 '양'으로 부호가 바뀌고 나서 양의 임계전류값에서 급작스럽게 전기저항이 감소함을 알 수 있다. 그림 6(b)와 6(c)에서와 마찬가지로 $R(I)$ 곡선의 임계전류값들('P-AP 임계전류값', I_c^- 및 'AP-P 임계전류값', I_c^+)에서 바뀐 저항 변화의 크기가 $R(H)$ 곡선에서의 저항 변화의 크기와 동일하다는 것을 알 수 있다. 다시 말하지만, 자기저항 효과와 CIMS 효과에 의하여 각각 얻은 전기저항 변화의 크기가 동일하다는 것은 인가전류에 의해서 나노접합소자내 Co 자유층의 자화반전이 외부자장을 인가하였을 때와 다름없이 충분히 이루어지고 있음을 증명하는 것이다.

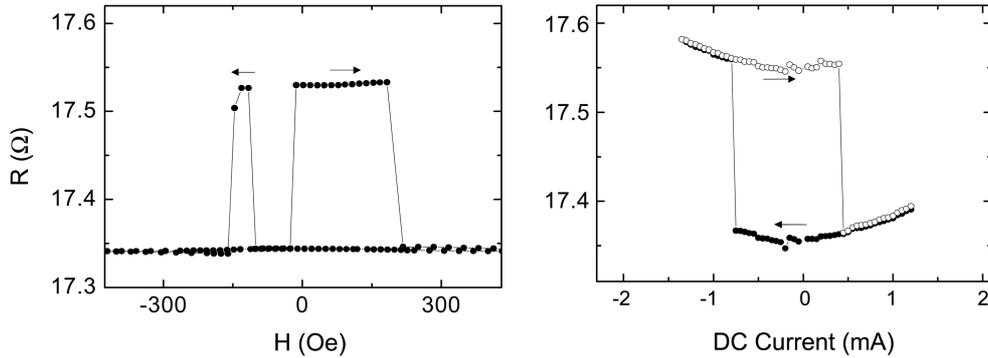


Fig. 9. MR and CIMS signals of the exchange biased spin valve.

식 (5)에 의하여 정의된 평균 임계스위칭전류, J_C 값이 EBSV 소자의 경우, 7.5×10^6 A/cm²로서 3.5×10^7 A/cm²인 두 번째 타입의 단순 스핀밸브 소자에 비하여 현저하게 낮았다. EBSV 소자가 단순 스핀밸브 소자에 비하여 J_C 가 1/4~1/5 수준으로 매우 낮은 것은 IrMn를 반강자성체로 사용하여 두꺼운 Co 고정층을 교환결합 바이어스하였을 때, 스핀 전달효율(spin transfer efficiency)이 높아 졌기 때문이라고 해석할 수 있다. 그림 8과 그림 9의 왼편 MR 곡선에서 뚜렷하게 볼 수 있었던 바와 같이, 약 65 Oe 정도의 pinning field가 존재해서 두꺼운 Co 고정층을 바이어스함으로써 이 고정층이 일방향 이방성(unidirectional anisotropy)을 가지고 있음을 알 수 있다. 이러한 일방향 이방성은 자성박막을 증착할 때 자기장을 인가함으로써 얻을 수 있는 통상의 일축 이방성(uniaxial anisotropy)에 비하여 자기적 특성에 있어서의 열적 안정성이 훨씬 높다고 할 수 있다. S. Urazhdin 등은 CIMS 소자에 매우 높은 전류밀도의 전류를 인가할 때, 자성박막층에서의 유효 자기온도(effective magnetic temperature)가 증가할 수 있다고 보고하였다^[15]. 일방향 이방성을 가지는 EBSV의 Co 고정층이 고밀도 전류에 의한 고온 효과에도 불구하고 자화모멘트가 한 쪽 방향으로 단단하게 고정되어 있음으로 해서 얇은 Co 자유층과 스핀정보를 가지고 있는 전자를 주고받는 스핀전달과정에서 효율이 높을 것으로 판단한다. 한편, 소자의 설계방안에서 다소 염려하였던 부분이 IrMn 반강자성체에 의한 ‘depolarization’ 현상이었는데 걱정하였던 것보다는 덜 심각하였다. 나노필라로 패턴하면 모든 전자가 예외없이 IrMn 반강자성체를 통과하게 되고 이에 따라 불가피하게 ‘depolarization’ 현상을 겪게 되는 것을 부분적으로나마 억제할 수 있으리라는 기대를 가지고 하부전극 ‘unpattern’ 방식을 적용하였었다^[14]. 그러나, IrMn도 금속전도체이기 때문에 전도전자들이 두꺼운 Co 고정층과 IrMn 반강자성체의 두 개 층을 모두 통과하면서 스핀정보를 얻었다가 잃었다가 하는 일을 반복함으로써 자유층으로 가거나 오는 전자의 스핀분극이 기대 이하로 저하

될 것으로 염려하였었다. ‘depolarization’ 현상이 예상보다 적게 영향을 준 가장 큰 이유는 IrMn 반강자성체 박막의 전기저항이 Co 박막에 비하여 10배 이상 크기 때문이었다. 4 단자법으로 측정된 이들 박막의 전기저항은 IrMn박막이 81.6×10^{-7} Ωm인데 비하여 Co박막의 경우 7.1×10^{-7} Ωm로 매우 작았다. 따라서 전도전자가 IrMn 반강자성층을 통과하면서 ‘depolarization’ 현상을 겪는다고보다는 Co 강자성체 박막층을 지나면서 스핀분극을 높일 확률이 훨씬 높을 것으로 기대할 만하다. EBSV 소자에 대한 본 연구에서 동북대학의 최신 연구^[16]에 비하여 훨씬 우수한 CIMS 특성을 보인 까닭이 여기에 있다. 반면에, J_C 에서의 전기저항의 변화값은 EBSV 소자의 경우 65 mΩ으로서, 두 번째 타입의 단순 스핀밸브의 70 mΩ와 유사하였다.

EBSV의 적층구조를 가짐으로써 CIMS 소자의 스핀전달 효율이 얼마나 많이 증대되었는지를 정량적으로 계산하여 보았다. 얇은 Co 자유층에서의 유효전류분극, η 를 이용하여 계산하되, J. C. Slonczewski^[3]의 스핀 토크 모델을 근거로 하였다. η 는 물질 내에서 뿐 아니라 Co/Cu 사이의 계면에서의 스핀의존 scattering에도 영향을 받는다. 계산을 조금 쉽게 하기 위하여 η 값이 스핀밸브 내에서의 두 개의 자성층이 서로 평행할 때와 서로 반평행할 때, 모두 동일한 값을 갖는다고 가정하자. Co 자유층에서의 자기적 변수들이 EBSV 및 단순 스핀밸브의 경우 공히 같은 값을 가진다고 할 때, 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{g^{EBS}}{g^{SS}} = \frac{J_C^{SS}}{J_C^{EBS}} \quad (6)$$

여기서, g^{EBS} 와 g^{SS} 는 자유층에 작용하는 스핀토크, $g(\Theta, \eta)$ 의 평균값이다. 이들 값은 고정 자성층과 자유층간의 배렬 혹은 각도(Θ)와 유효전류분극(η)에 의존한다. Θ 는 나노접합소자 내의 두 자성층이 서로 반평행할 때는 π , 서로 평행할 때는 ‘0’의 값을 가진다. g^{EBS} 와 g^{SS} 는 아래의 식과 같이 정의된다.

$$g^{EBS(SS)} = \frac{g^{EBS(SS)}(\pi, \eta) + g^{EBS(SS)}(0, \eta)}{2} \quad (7)$$

위 식 (7)에서,

$$g^{EBS(SS)}(\pi, \eta) = \frac{1}{-4 + [1 + \eta^{EBS(SS)}]^3 / 2[\eta^{EBS(SS)}]^{3/2}} \quad (8)$$

이고,

$$g^{EBS(SS)}(0, \eta) = \frac{1}{-4 + [1 + \eta^{EBS(SS)}]^3 / [\eta^{EBS(SS)}]^{3/2}} \quad (9)$$

이다.

식 (8)과 식 (9)를 식 (7)에 넣어 정리하면, 다음과 같은 식을 얻는다.

$$g^{EBS(SS)} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{-4 + [1 + \eta^{EBS(SS)}]^3 / 2[\eta^{EBS(SS)}]^{3/2}} + \frac{1}{-4 + [1 + \eta^{EBS(SS)}]^3 / [\eta^{EBS(SS)}]^{3/2}} \right] \quad (10)$$

EBSV 소자와 스핀밸브 소자에서 얻은 임계스위칭 전류값을 각각 넣으면,

$$\frac{g^{EBS}}{g^{SS}} = \frac{J_C^{SS}}{J_C^{EBS}} = 4.7 \quad (11)$$

식 (11)로부터 동일한 전류를 인가하였을 때, 자유층에 작용하는 스핀토크가 EBSV 소자의 경우 4.7배가 크다는 것을 알 수 있다. 단순 스핀밸브 소자에서의 유효전류스핀분극이 Co 단결정의 그것과 같다고 가정할 때, $\eta^{SS} = 0.35$ 이며, 이 값을 이용하여 식 (10)과 식 (11)에 넣어 풀면, $\eta^{EBS} \sim 0.71$ 이 나온다. 이 결과는 EBSV의 구조를 가짐으로써 Co 자유층의 유효스핀분극이 약 2배 정도로 증가한다는 것을 의미한다.

4.3. 나노산화층을 이용한 CIMS 소자의 특성 최적화

두꺼운 Co 고정층을 지나면서 한 쪽 방향으로 스핀분극된 전자가 반강자성체를 통과하면서는 스핀정보를 잃어버리는 소위, 'depolarization' 현상을 근본적으로 차단하기 위하여 다섯 번째 타입의 샘플을 제작하였다. 2.2에서 설계한

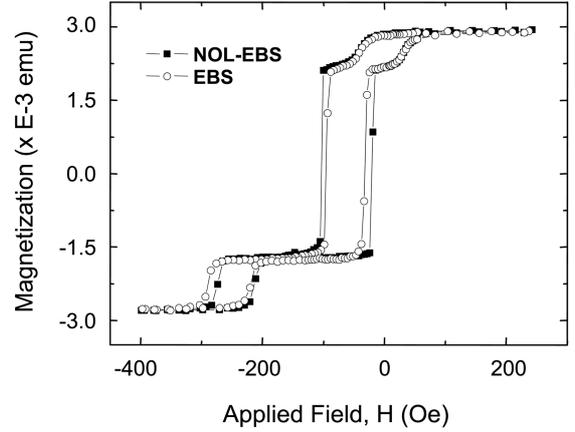


Fig. 10. M(H) curves of the exchange biased spin valve multilayer with a nano oxide layer (solid circles) and the exchange biased spin valve multilayer (open circles).

바와 같이, 네 번째 타입인 Ru(10 nm) / Py(6 nm) / IrMn (8 nm) / Co(11 nm) / Cu(6 nm) / Co(2 nm) / Cu(2 nm) / Au(5 nm)의 적층구조를 가지되, 그림 2(e)와 같이 반강성체에 의해서 교환결합 바이어스된 두꺼운 Co 고정층 내에 수 Å 내외의 나노 산화층을 삽입한 다층박막을 성막하였다. 준비된 다층박막을 '3. 실험 방법'에서 기술한 바와 같은 방법으로 패터닝함으로써, 나노 산화층을 가지는 교환결합 바이어스 스핀밸브(이하, NOL-EBSV; Exchange-biased spin valve with a nano oxide layer)형 CIMS 소자를 제작하였다.

나노 산화층을 두꺼운 Co 고정층에 삽입하였음에도 불구하고 교환결합에 의하여 고정층이 바이어스된 정도, 즉 pinning field는 거의 동일하였다(그림 10 참조). 다시 말하면, 교환결합 바이어스를 통하여 확보된 자기적 특성이 열적으로 안정화되어 있는 정도가 나노 산화층의 삽입에 의하여 바뀌지 않았음을 의미한다. NOL-EBSV 소자에서도 EBSV 소자와 마찬가지로 일방향 이방성을 가짐으로써 NOL-EBSV의 Co 고정층이 고밀도 전류에 의한 고온효과에도 불구하고 자화모멘트가 한 쪽 방향으로 단단하게 고

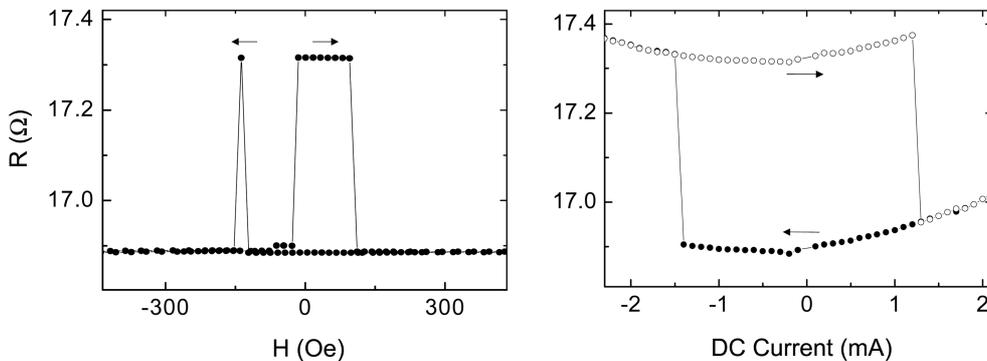


Fig. 11. MR and CIMS signals of the exchange biased spin valve with a nano oxide layer.

Table 2. Comparison of CIMS effects with those reported by two leading groups

Group junction Size	Simpler SV	SAF SV	EXB SV	
Cornell 70 × 130 nm ²	$\Delta R/R \sim 3.9\%$ $J_C \sim 3.2 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ (^[17] , PRL89, 2002)	$\Delta R/R \sim 1.5\%$ $J_C \sim 7 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ (APL84, 2004)	-	
Tohoku 90 × 280 nm ² (^[16] PRL92, 2004)	-	-	With Ru Cap $\Delta R/R \sim 0.36\%$ $J_C \sim 1.6 \times 10^8 \text{ A/cm}^2$	Without Ru Cap $\Delta R/R \sim 0.36\%$ $J_C \sim 2.2 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$
KIST 95 × 150 nm ²	$\Delta R/R \sim 2.5 - 2.7\%$ $J_C \sim 3.5 \Delta 2.4 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$	-	Without NOL $\Delta R/R \sim 0.75\%$ $J_C \sim 7.5 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$	With NOL $\Delta R/R \sim 2.5\%$ $J_C \sim 9.4 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$

정되어 있을 테이고, 따라서 얇은 Co 자유층과 스핀정보를 가지고 있는 전자를 주고받는 스핀전달과정에서 EBSV 소자에서와 같이 효율이 높게 나타날 것으로 기대되었다.

식 (5)에 의하여 정의된 평균 임계스위칭전류, J_C 값이 NOL-EBSV 소자의 경우, $9.6 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ 로서 EBSV 소자에 비해서는 다소 높지만, $3.5 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ 인 두 번째 타입의 단순 스핀밸브 소자에 비하여 현저하게 낮은 값을 보였다. 교환결합 바이어스에 의하여 스핀전달전류효율이 증대되었기 때문으로 판단된다. 특히, J_C 에서의 전기저항의 변화 값이 NOL-EBSV 소자의 경우, $425 \text{ m}\Omega$ 로서 EBSV 소자의 경우의 $65 \text{ m}\Omega$ 혹은 두 번째 타입의 단순 스핀밸브의 $70 \text{ m}\Omega$ 에 비하여 엄청나게 커서 무려 6배 이상이었다. 이는 나노 산화층이 전도전자의 흐름을 두꺼운 Co 고정층의 상부, 즉 나노 산화층의 위쪽으로 제한하여 지속적으로 한 쪽 방향의 스핀정보를 주는 한편, 이들 전자가 나노 산화층의 경계면에서 경면반사하게 함으로써 스핀분극을 극대화하였기 때문에 가능하였을 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 논문에서는 현재의 MRAM 기록방식이 가지고 있는 ‘비트 선택도 문제’를 근본적으로 개선할 수 있을 것으로 기대되는 전류구동형 자화스위칭(이하, CIMS; Current Induced Magnetization Switching) 소자 제작기술을 다루었다. 특히, CIMS 방식에 있어서 실용화하는 데 반드시 극복하여야 하는 문제인 1) CIMS 소자를 스위칭하는 데 필요한 임계전류 밀도값을 낮추는 방법, 2) 자기저항값을 크게 할 수 있는 방법 등에 대하여 집중적으로 연구하였다.

Cu 사잇층을 상부의 얇은 Co층과 Au 캡핑층 사이에 삽입함으로써 Co/Cu/Co의 기본구조에 비하여 보다 손쉽게 CIMS 효과를 얻을 수 있었다. 한편, Cu 박막을 기판에 증착하기 전에 Ru 버퍼층을 성막함으로써 Cu 사잇층을 사용한 경우보다 임계스위칭전류값(J_C)을 30% 가량 낮추고 동

시에 J_C 에서의 전기저항의 변화값에 있어서도 35% 가량 높은 값을 보여 보다 우수한 CIMS 특성을 가지는 소자 제작이 가능하였다. IrMn 반강자성체 박막으로 두꺼운 Co 고정층을 교환결합 바이어스 시킨 EBSV 소자와 Co 고정층에 나노 산화막을 삽입한 NOL-EBSV 소자의 경우, 낮은 임계전류밀도와 큰 자기저항값을 동시에 구현할 수 있었다. 본 연구에서 얻은 CIMS 소자에 대한 연구결과는 세계적인 최우수연구 그룹의 연구결과와 동등하거나 더 우수한 수준이며, 표 2에 요약 비교하였다.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the Korea Institute of Science and Technology Vision 21 Program, by the TND Frontier Project funded by KISTEP, and by the Ministry of Science and Technology of Korea through the Cavendish-KAIST Research Cooperation Center. The author thanks Hoang Yen Nguyen, Hyun Jung Yi, Wang Hyun Park, Sung Joong Joo, Myung Hwa Jung, and Kyung-Jin Lee for their technical support and insightful discussions.

REFERENCES

1. Rainer Waser (ed.), *Nanoelectronics and Information Technology*, p. 532, Wiley-Vch Verlag GmbH & Co., Weinheim (2003).
2. L. Savtcheko, B. N. Engel, N. D. Rizzo, M. F. Deherra, and J. A. Janesky, U.S. Patent 6,545,906, 8 April (2003).
3. J. C. Slonczewski, *J. Magn. Magn. Mater.* **159**, L1 (1996).
4. L. Berger, *Phys. Rev. B* **54**, 9353 (1996).
5. E. B. Myers, D. C. Ralph, J. A. Katine, R. N. Louie, and R. A. Buhrman, *Science* **285**, 867 (1999).
6. J. A. Katine, F. J. Albert, and R. A. Buhrman, *Phys. Rev. Lett.* **84** (2000) 3149; F. J. Alber, J. A. Katine, D. C. Ralph, and R. A. Buhrman, *Appl. Phys. Lett.* **77**, 3809 (2000).
7. H. W. Schumacher, *Phys. Rev. Lett.*, **90**, 017201 (2003); H. W.

- Schumacher, *Phys. Rev. Lett.* **90**, 017204 (2003).
8. J. M. Daughton, and A. V. Pohm, *J. Appl. Phys.* **93**, 7304 (2003).
9. I. L. Prejbeanu, *IEEE Trans. Magn.* **40**, 2625 (2004); R. C. Sousa, *J. Appl. Phys.* **95**, 6783 (2004).
10. Stuart Parkin, Xin Jiang, Christian Kaiser, Alex Panchula, Kevin Roche, and Mahesh Samant, *Proc. IEEE.* **91**, 661 (2003).
11. J.-E. Wegrowe, *J. Appl. Phys.* **91**, 6806 (2002).
12. K.-J. Lee, Alina Deac, Oliver Redon, Jean-Pierre Nozieres, and Bernard Dieny, *Nature Materials* **3**, 877 (2004).
13. W. F. Egelhoff, Jr., P. J. Chen, C. J. Powell, M. D. Stiles and R. D. McMichael, *J. Appl. Phys.* **80**, 5183 (1996).
14. S. Urazhdin, N. O. Birge, W. P. Pratt, Jr., and J. Bass, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 146803 (2003).
15. Y. Jiang, S. Abe, T. Ochiai, T. Nozaki, A. Hirohata, N. Tezuka, and K. Inomata, *Phys. Rev. Lett.* **92**, 167204 (2004).
16. F. J. Albert, N. C. Emley, E. B. Myers, D. C. Ralph, and R. A. Buhrman, *Phys. Rev. Lett.* **89**, 226802 (2004).