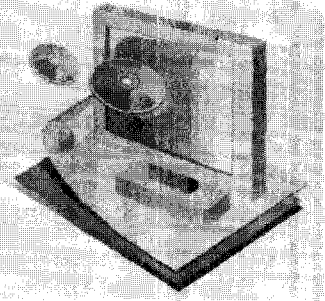


전이금속기반 스핀트로닉스 분야의 최근 연구동향



김태희 교수 (이화여대 물리학과)

1. 서론

미국의 프리스케일 반도체회사 (Freescale Semiconductor Inc.)는 최근 자사의 4 Mb 자기저항형 비휘발성 메모리(MRAM, Magneto-resistance Random Access Memory) (그림1)를 Angstrom Aerospace社의 자력계 서브시스템에 채용하고 이 서브시스템이 일본에서 쏘아 올릴 예정인 연구위성에 탑재될 것이라고 밝혔다[1]. 프리스케일社의 MRAM은 작동온도 범위의 확대, 무한 내구성, 전력 손실 시의 장기간 데이터 보존능력 등이 뛰어나기 때문에 일본의 연구위성인 SpriteSat의 Tohoku-AAC MEMS Unit (TAMU)이라고 불리는 자력계 서브시스템에 프리스케일社의 MRAM을 사용하게 된 것이다.

자기저항형 비휘발성 메모리는 종래의 실리콘 소자와 자기저항 소자를 조합하는 방식으로 SRAM에 필적하는 동작속도와 플래시 메모리가 갖는 비휘발성 메모리의 기능을 통합한 차세대 비휘발성 메모리의 일종이다. 2000년 초반부터 본격적인 연구개발이 시작되었으며 개발 초기에는 단시간에 기존 메모리를 대체할 것으로 예상되었다. 이후 개발과정에서 나타난 몇가지 치명적 문제 때문에 본격적인 상용화가 지연되다가 2006년부터 프리스케일社에 의해 MRAM의 상업적 양산이 시작되어, MRAM 실용화가 추진되고 있다[2]. 특히 고온 등의 극한 환경에서 사용 가능한 비휘발성 메모리라는 점을 강조한 응용

제품 시장 창출 노력은 지속되었고, 그 결과 프리스케일社의 MRAM이 우주에서 사용하는 위성에 탑재된 것이다. 이는 소자 작동온도 범위를 확장한 MRAM이 방위산업 및 우주항공산업 등 고 신뢰성을 요구하는 응용분야에 사용 가능하다는 것을 시사하는 것으로 산업시장의 확대에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다.

MRAM 개발 연구의 시초는 두말할 나위 없이 자성재료분야의 연구 및 응용에 있어 새로운 전기를 마련한 Albert Fert [3, 4]와 Peter Gr enberg [5]에 의해 발견된 거대자기저항 현상이라 말할 수 있다. 프랑스의 Fert와 독일의 Gruenberg에 의해 독자적으로 각각 발표된 두 강자성층 (Ferromagnet, FM)이 반강자성층 (Antiferromagnet, AFM)에 의해 분리된 샌드위치 형태의 층상구조에서 거대자기저항 (Giant Magneto-Resistance, GMR) 현상에 대한 연구는 지난해 노벨 물리학상의 영광을 두 과학자에게 안겨주었다. 스웨덴 왕립과학원 (The Royal Swedish Academy of Sciences)에 의해 GMR 기술이 하드디스크의 성능과 집적도를 비약적으로 향상시키고, 스핀편극전자의 흐름 (Spin-dependent Current) 등 양자역학적 현상을 기반으로 한 오늘날의 나노기술을 초래한 공로가 동등하게 인정되어 과학기술분야에서 최고의 영예를 함께 누리게 된 것이다.

본래 자기저항이라는 현상은 자기장 안에서 전기저항의 변화율로 정의되며, 일반적으로 상온에서 1% 미만의 자기저항 효과는 벌크 (Bulk)에서도 관찰



되어 왔으나, Fert그룹에 의해 최초로 보고된 Fe/Cr의 강자성과 반강자성층으로 구성된 다층박막의 저온(4.2 K)에서 44% 이상 상온에선 ~20%의 큰 저항의 변화율은 실로 획기적인 현상으로 거대자기저항(GMR)이라 일컬어지며 학계와 산업계에 비상한 관심을 받았다[3]. 기존의 벌크보다 100배 이상 큰 다층박막에서 GMR현상의 발견은 다층 박막의 계면에서 발생하는 스핀 의존산란 또는 전류 (Spin-dependent Scattering or Current)에 의해 발견되는 현상이라는 것이 보고된 이후 기존의 전하만을 이용하던 소자에 전자의 스핀을 함께 이용하는 소자 응용의 폭을 넓혀 주어 스핀트로닉스 (Spintronics)라는 물리와 전자공학분야가 융합된 새로운 기술 분야를 탄생시키는 계기가 되었다. 이것은 또한 최근 10여년간 눈부시게 성장한 나노 기술 등, 21세기의 신과학 기술혁명의 기초를 마련하였고 과거 학문분야간 분명했던 경계를 초월하여 물리, 화학, 생물, 공학분야가 함께 긴밀히 연계하는 융합학문의 새로운 학풍을 일으키는 중심점이 되었다 [4-6].

나노스핀트로닉스 소자재료의 기본구조는 FM/spacer (사이층)/FM으로 이루어진 다층박막구조로 사이 층이 도체나 부도체냐에 따라 GMR과 터널자기저항 (Tunneling Magnetoresistance, TMR)로 구분된다. 부도체를 사용한 TMR 접합소자에서의 스핀터널링 현상은 이미 1970년 초반부터 알려져 왔으나 비정질 산화막 AlOx를 사용하여 상온에서의 신호를 크게 증폭시킨 성과 (~20%)가 MIT의 Moodera가 이끄는 연구진에 의해 보고된 이후 현재까지 폭발적으로 끊임없이 연구되고 있다. 앞서 언급한 프리스케일의 상용화된 MRAM도 이러한 TMR 터널접합을 기반으로 한 메모리 소자이다.

오늘날 원자크기 수준의 평탄도 제어기술을 기초로 한 나노크기의 저차원 구조체의 제작 기술 발달은, 벌크차원에서 시작하여 2차원의 층상 그리고 1차원의 나노두께의 선 및 주형구조와 그 배열에 이르기까지, 양자역학적 현상의 크기 의존성에 대한 연구를 가능하게 하였다. 이러한 기술은 테라급 고집적도의 정보저장기록매체의 개발을 선도하는 중요한 기반 기술로 활용되고 있다. 현재 산업계에서 MRAM 양산에 있어서 걸림돌이 되고 있는 최대 문

제점들을 극복하기 위한 해결 방안을 박막의 표면에 수직방향으로 흐르는 전류를 측정하는 CPP (Current Perpendicular to Plane)-GMR의 층상 구조와 나노 주형구조에 대한 연구결과들을 토대로한 기술개발에서 찾고 있다. 특히 MRAM양산에 있어서 최대 문제는 기존 MRAM소자의 경우, 소자의 크기를 작게 할수록 기록에 필요한 전류밀도의 값이 증가하여 저소비전력 특성을 실현하기 어렵다는 것인데 이를 극복하기 위해 각 업체들은 기존 방식과는 다소 다른 형태의 소자구조를 사용하여 소자의 크기를 줄이면서도 기록 전류를 낮출 수 있는 방안을 연

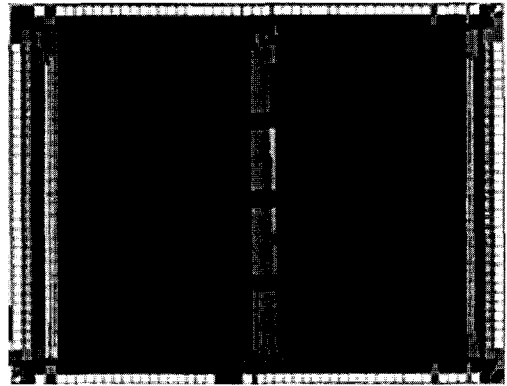


그림 1. 프리스케일 세미컨덕터사 (Freescale Semiconductor Inc.)에서 개발한 4 Mbit MRAM (MR2A16A)[2].

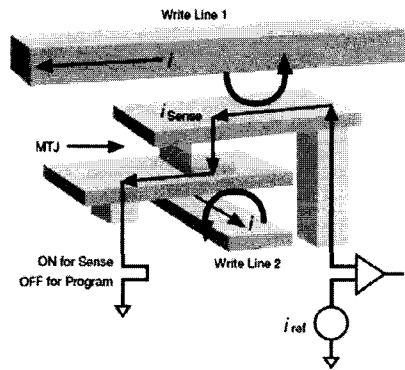


그림 2. 강자성터널접합소자를 기반으로 한 MRAM의 개략도 [1].

구하고 있다. 그 중 대표적인 기술이 스핀주입형 MRAM 기술이다. 따라서 본 논문에서는 초기 GMR 현상의 기본 구조인 다층 박막으로부터 다양한 나노 구조체에 이르는 근 20년 동안 발표된 스핀의존산란 현상에 대한 주요 연구업적들과 함께 최근 초미의 관심사인 스핀주입형 MRAM에 대해 간략히 정리해 보고자 한다.

2. 다층박막 구조에 대한 CIP-GMR

그림 3의 개략도가 보여주듯이 GMR은 Cr이나 Cu 등의 비자성체 층을 사이에 둔 두 강자성체의 자화방향에 따라 자기저항이 변화하는 현상을 말한다. 이들 강자성과 비자성 층들은 약 1 nm 정도의 두께로 교대로 쌓은 다층박막의 형태로 적층되고 이때 거대자기저항 현상은 전자가 이웃한 자성층을 통과할 때 두 자성층의 자화배열이 평행 (P) 또는 반평행 (AP)인가에 따라 박막의 저항값이 변화하는 것에 기인하는 것으로 스핀의존산란 (Spin-dependent Scattering)으로 설명이 가능하다 [3, 4].

그 원리는 RKKY 모델을 기반으로 한 두 인접한 자성층 간에 작용하는 교환결합 (Exchange

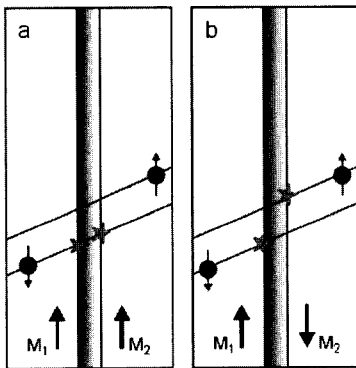


그림 3. 스핀의존산란의 개념도. M1과 M2는 두 강자성층의 자기모멘트를 나타냄. a와 b는 각각 두 자기모멘트가 평행 또는 반평행인 경우의 스핀의존산란에 의한 전도도의 높고 낮게 되는 원리를 보여줌 [7].

Coupling)에 의한 것으로 학계에 널리 알려져 있다 [4,7]. R^{AP} 와 R^P 는 각각 자화배열이 평행 그리고 반평행인 경우의 저항값을 의미할 때, $GMR = (R^{AP} - R^P) / R^P$ 로 정의되는 GMR은 두 자성층을 가르는 반강자성 Cr의 두께의 의존성을 보이는데 두께가 감소하여 9 Å에 이르러서는 4 K의 온도에서 무려 80% 그리고 상온 (300 K)에서는 20%의 GMR 효과가 측정되었다 (그림 4). 가장 기록적인 GMR은 MBE 증착장비로 MgO (001) 기판 위에 에피택시한 Fe(4.5 Å) / Cr(12 Å) 다층박막구조에서 1.5 K에서 측정된 220%로 Schad 등에 의해 보고되었다[8].

Fert와 Grünberg의 선도적인 연구 이후, 다양한 금속 강자성체와 비자성체 조합에서 GMR 현상이 연구되었는데, 미국 IBM의 Parkin이 이끄는 연구진은 이 현상에 대해 자성 층간의 반강자성적 (Antiferromagnetic) 교환결합의 비자성층 두께 의존성을 체계적으로 연구하여 GMR Head로 응용되는 스핀밸브 (Spin Valve) 구조 개발에 매우 큰 공헌을 하였다 [9]. 이후 다층박막계가 아닌 CoAg 미세입상박막 (Granular Film) 구조에서도 미국 Johns Hopkins 대학의 Chien 등에 의해 GMR 현상이 발견되었는데 당시 GMR 현상의 변수로 계면뿐만 아니라 벌크에 의한 스핀 산란효과 또한 고려해야 함을 보이는 중요한 연구결과였다 [10].

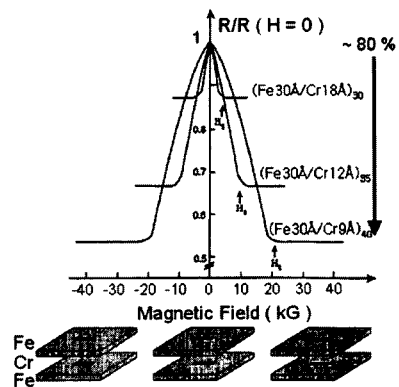


그림 4. Fe/Cr 다층박막에서 저온(4K)에서 측정된 거대 자기저항 현상 [3].

3. 층상구조에 대한 CPP-GMR

GMR현상은 박막구조에서 두가지 방법으로 측정되는데, 그 하나는 앞서 언급한 박막의 표면과 평행한 방향으로 측정하는 CIP (Current in Plane) 구조 측정법이고, 다른 하나는 박막의 표면에 수직인 방향으로 측정하는 CPP (Current Perpendicular to Plane) 구조 측정법이다. 이중 CPP구조는 그 저항값이 매우 작아 측정이 용이하지 않은 어려움이 있었으나 Pratt 등에 의해 CPP구조에서 자기저항 측정방법이 제시되었다 [11]. CPP-GMR이 측정됨으로써 자성층 내에서의 스핀전도전자의 스핀산란거리 (Spin Diffusion Scattering Length), 계면/부피 (Interface/bulk) 저항의 구분, 계면상태에 따른 변화 등에 대한 실험적 연구가 보다 심도 깊게 진행되었다.

Fert 그룹에 의한 CIP와 CPP구조에서 거대자기 현상에 대해 이론적 연구는 GMR에 대한 물리적 원리의 이해의 주요기반을 형성하였다 [12]. 계면산란에서의 스핀 비대칭성 산란 계수에 따라 거대자기저항 현상이 종래와는 반대로 나타나는 역거대자기저항 현상 (Inverse GMR)에 대한 결과가 처음으로 보고되었고, 계면과 부피산란에 의한 효과를 구분하여 비대칭성 산란을 규명하였으며, 자성층 간의 결합에

도 반평행 (AP)와 평행 (P) 결합만이 존재하는 것이 아니라 bi-quadratic 결합이 존재함을 밝혔다.

한편 미국 Michigan주립대의 Pratt그룹은 CIP와 CPP-GMR에서 각기 다른 scaling length를 제안하고, 스핀축적 (Spin-accumulation)에 의한 CIP구조에서 스핀 평균자유경로 (Mean Free Path)보다 10배 이상 긴 CPP구조에서의 스핀확산거리 (Spin Diffusion Length)로 인해, CPP구조에서 효과적인 스핀의존산란에 의한 GMR의 증가를 실험으로 확인하였다[11]. 그림 5는 이러한 계면 산란이 보다 효과적인 제어가 가능한 CPP구조에서 CIP구조보다 10배 정도 큰 GMR값이 측정됨을 보여준 Pratt그룹의 연구결과이다. 여기서 CIP와 CPP-GMR 모두 비자성층의 두께에 따라 감소 진동하는 양상이 뚜렷이 나타남을 알 수 있다.

4. 다층 나노선에 대한 CPP-GMR

기존의 진공장비에 비해 공정이 간편하고 저렴한 전기증착법에 의해 멤브란의 주형 구멍을 나노틀 (Nanotemplate)로 활용하여 Co/Cu 또는 Py/Cu 등 다층박막형태로 제작한 나노선의 CPP-GMR현상에 대한 연구 또한 진행되었다 [5, 12]. Co/Cu과 Py/Cu

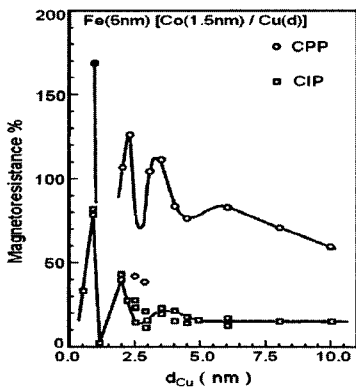


그림 5. 비자성 Cu 두께에 따른 CIP- 그리고 CPP-GMR [11].

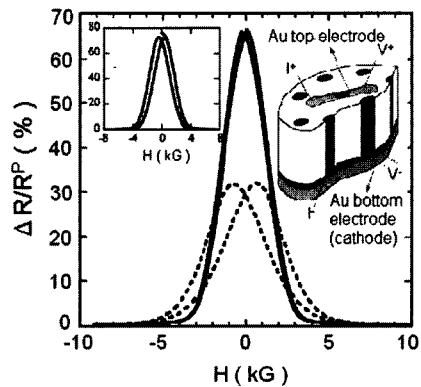


그림 6. Ni80Fe20(12 nm)/Cu(4 nm) (full line)과 Co(10 nm)/Cu(5 nm) (dashed line) 다층 나노선에서의 CPP-GMR [14].

나노선의 CPP-GMR이 77 K에서 각각 ~30과 ~70 % 정도 측정되었다(그림 6). 그림 6의 왼쪽 삽입 그림에서 보여 주듯이 Py/Cu 나노선의 경우 온도를 액체 헬륨의 온도인 4.2 K에서 GMR이 약 ~80 %인 소폭의 상승이 관찰 되었다 [12]. 이러한 나노선의 CPP-GMR을 측정을 위한 4-probe 측정 전극구조는 그림 6의 오른쪽에 삽입된 그림과 같다.

이 결과는 스핀 확산거리가 각 박막의 두께보다 긴 CPP구조라는 것과 상대적으로 손쉬운 전기증착법이란 공정과정을 고려할 때 매우 흥미로우나, 앞의 3장에서 언급한 연구에서 사용하는 고가의 진공 증착장비와 전자-빔 식각에 의한 층상 CPP구조의 GMR효과엔 미치지 못하는 결과라 할 수 있다. 상대적으로 제어하기 어려운 각 층간의 계면 거칠기, 그리고 제작과정 중 발생할 수 있는 오염에 의한 스핀 의존산란의 감소 등 그 원인과 개선방법에 대한 연구가 진행되고 있으나 [13-15], 전기증착법에 의해 다룰 수 있는 다층박막 구성 물질이 한정돼 있다는 것 또한 단점으로 지적할 수 있다. 그러므로 최근에 다시 전자-빔을 이용한 CPP-구조의 제작과 그 GMR 현상에 대한 연구가 더욱 활발히 진행되고 있으며, 다음 장에서 이야기할 나노필러에 대한 CPP-GMR 연구가 그 한 예이다.

5. 나노필러에 대한 CPP-GMR

스핀-편극 전류에 대한 자성 층의 자화 제어 가능성이 Slonczewski에 의해 예견된 이후[14], 최근 5-6년 동안 주상 형태의 나노필러에서 발생하는 GMR 현상에 대해 수많은 이론과 실험 연구결과가 발표되었다. 자성층의 자화방향에 수직으로 주입된 스핀과 자화 간에 상호작용에 의해 야기되는 자화반전 현상은 약 $200 \times 600 \text{ nm}^2$ 크기의 Co (15 nm) / Cu (10nm) / Co (2.5nm) 주형 박막에서 처음으로 보고되었다 [17]. 그림 7은 이 나노필러에 $10 \mu\text{A}$ 의 교류전류를 흘려주어 관찰한 CPP-GMR 결과이며, 비록 그 값은 작으나 두께에 따른 두 Co 층의 보자력 (Coercivity)에 의한 평행과 반평행 자화구조가 자기장에 의해 제어됨을 여실히 보여준다. 그림 8은 나노

필러에 음의 DC-전류를 인가하면 저항이 평행에서 반평행 상태로, 반대로 양의 DC-전류를 공급하면 반평행에서 평행상태의 저항으로 스위칭 되는 것을 보여주는 것으로, Slonczewski의 이론대로 전류에 의해 유도되는 자화반전이 형성됨을 보이는 중요한 결과이다. 이런 나노필러에서 전류에 의한 자화반전 현상을 토대로 스핀토크 (Spin Torque)에 대한 연구가 발전되었는데, 작은 DC전류에 의해 고품질 가변 마이크로파 발진이 발생될 수 있는 나노패턴 강자성 소자로의 응용에 대한 연구가 미국의 NIST, Cornell 대 그리고 Michigan주립대의 연구진에 의해 활발히 진행되고 있다. 이 스핀토크 발진기는 고품질의 동

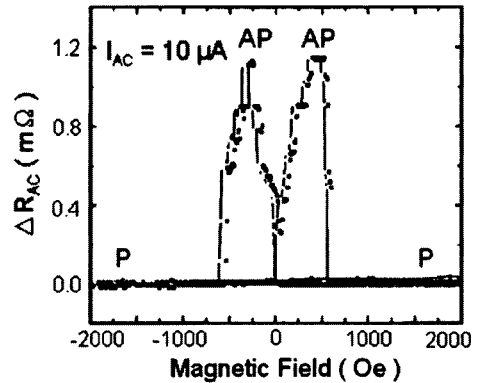


그림 7. 4.2 K에서 측정된 Co/Cu/Co pillar 의 GMR 현상 [17].

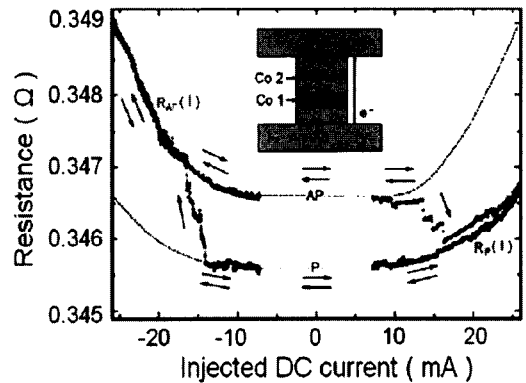


그림 8. DC current에 따른 Co/Cu/Co 나노필러구조의 저항변화 [17].



조와 높은 집적도를 겸비하는 저전력, 저비용 응용 및 광대역 가변기에 있어서 핵심적 기술을 제공할 것으로 기대 된다 [18-20].

6. 스핀주입 자화반전 MRAM

고속 및 저소비전력 동작이 가능하고 고집적성의 비휘발성 특성을 갖는 통합형 메모리로서 스핀주입 자화반전방식의 MRAM이 주목을 받고 있다. 스핀주입 자화반전 MRAM은 터널자기저항효과 (Tunneling Magneto-resistance, TMR) 소자에 전류를 흘려 전자의 스핀작용에 의해 강자성막을 자화반전시켜 자화의 방향에 따른 전기저항값의 변화를 이용하여 데이터의 저장 및 판독을 수행하는 메모리이다. 소자크기의 극소화에 의해 정보저장에 필요한 전류를 감소시킬 수 있다는 점에서 Gbit급 통합형 메모리 방식으로 최근 스핀소자연구의 핵심주제로 대두되었다. 그러나 종래의 전류의 on/off로 제어되는 반도체 기반 메모리에서와는 달리 TMR소자에 흘리는 전류방향을 다르게 하는 회로작동 구현이 필요하고 판독전류에 의한 기록이 발생하지 않아야 하는 등 연구쟁점들이 산재해 있다.

최근 이러한 문제를 해결하기 위해 동북대의 Ohno교수가 이끄는 연구진은 MgO를 터널 절연막으로 사용하여, 저전력 기록동작과 고출력 판독작동이 가능한 TMR소자를 메모리 셀로 이용한 스핀주입 자화반전 방식을 기반으로한 메모리 회로기술을 개발하였다[21]. 1.8 V의 저전력에서 고속작동이 가능한 (기록시간 10 ns, 판독시간 40 ns) 2 Mb TMR소자를 히타치社와 함께 연구 개발하여 PC와 휴대전화 등에서 이용되는 각종 메모리를 하나의 칩 (Chip)으로 대체할 수 있는 가능성을 제시하였다.

7. 결론

본 논문에서는 전이금속을 기반으로한 스핀트로닉스 분야에서 Fert와 Grünberg의 초기 GMR모델을 기반으로 층상구조에서부터 나노필러구조에 이

르는 스핀편극전류와 스핀의존산란에 관련된 주요 연구들을 소개하였다. 근래 20여 년간, 기존의 플래시 메모리에 비해 저전력소모, 장시간 데이터를 유지할 수 있는 비휘발성이 매우 뛰어나고, 읽고 또 쓰는 동작특성이 낮은 동작전압에서도 극히 빠르고 아울러 극한 환경에서도 작동하는 최첨단 메모리 소재와 소자연구에 대한 국·내외 과학기술계의 노력은 계속되어 기가 급을 테라 급의 초고집적 소자개발에 이르고 있다. 차세대 고성능 고집적도의 비휘발성 메모리 소자개발이라는 기술혁신을 성취하기 위해서는 앞으로 나노크기 수준에서 제어되는 양자현상의 이해와 제어에 그 승패가 달려 있다고 해도 과언이 아닐 것이다. 또한 일본, 미국 등의 세계 우수 연구진과 기술 경쟁하여 선점을 쟁취해 나가기 위해선, 스핀과 일렉트로닉스의 합성어인 스핀트로닉스의 어원이 의미하듯이, 국내 연구진의 물리 화학공학 전 분야에 걸쳐 긴밀한 연구협력이 매우 중요할 것이다. 지금까지의 스핀정보현상과 관련된 연구 성과는 스핀트로닉스 분야의 일부분으로 도입 단계에 불과하다고 할 수 있다. 최근 높은 관심의 대상인 금속/반도체 (초전도체 또는 산화물) 등의 응집물질 뿐만 아니라 폴리머나 또는 고분자 등의 연성물질 그리고 무기물/유기물 등의 복합다체계에서의 다기능 소재 소자의 개발을 위한 연구는 GMR현상 연구가 우리에게 나노기술의 신세계를 열어 주었듯이 또 다시 새로운 과학기술혁명을 초래할 것으로 기대 된다.

참고 문헌

- [1] D. Lammers, Semiconductor international, Reed Elsevier Inc, 2008년2월28일자 기사.
- [2] Embedded Computing Design Magazine, 2006년 5월 기사 ; www.freescale.com.
- [3] M. Baibich, J.M. Broto, A. Fert, F.N. Guyen Van Dau, F. Petroff, P. Etienne, G. Creuzet, A. Friederich, Phys. Rev. Lett., 61 2472 . (1988).
- [4] A. Barthelemy, , a, A. Fert, J-P. Contoura, M. Bowen, V. Crosa, J. M. De Teresa, A.

Hamzica, J. C. Fainib, J. M. Georgea, J. Grolliera, F. Montaignea, F. Paillouxa, F. Petroffa and C. Vouille, J. Mag. Mag. Mater., 242-245, 68-76 (2002).

[5] A. Fert, L. Piraux, J. Magn. Magn. Mat., 200, 338 (1999).

[6] P. Grünberg, R. Schreiber, Y. Pang, M.B. Brodsky, H. Sowers, Phys. Rev. Lett., 57 2442 (1986).

[7] P. Grünberg, Physics Today, May 2001, 31-37 (2001)

[8] R. Schad, C.D. Potter, P. Belien, G. Verbanck, V.V. Moshchalkov and Y. Bruynseraede Appl. Phys. Lett., 64 3500, (1994).

[9] S. S. P. Parkin, N. More, and K. P. Roche, Phys. Rev. Lett., 64, 2304 - 2307 (1990).

[10] John Q. Xiao, J. Samuel Jiang, and C. L. Chien, Phys. Rev. B, 46, 9266 - 9269 (1992).

[11] P.A. Schroeder, J. Bass, P. Holody, S.F. Lee, R. Loloee, W.P. Pratt Jr., Q. Yang, Materials Research Society Symposium Proceedings, Vol. 313, MRS, Pittsburg, PA, 47. (1993)

[12] C. Vouille, A. Barthelémy, A. Fert, P.A. Schroeder, S.H. Hsu, A. Reilly, R. Loloee, Phys. Rev. B, 60, 6710 (1999).

[13] L. Piraux, J.M. George, J.F. Despres, C. Leroy, E. Ferain, R. Legras, K. Ounadjela, A. Fert, Appl. Phys. Lett., 65, 2484 (1994).

[14] S. Dubois, J.M. Beuken, L. Piraux, J.L. Duvail, A. Fert, J.M. George, J.L. Maurice, J. Magn. Magn. Mater., 165, 30 (1997).

[15] K. Liu, K. Nagodawithana, P.C. Pearson, C.L. Chien, Phys. Rev. B, 51 7381 (1995).

[16] J. Slonczewski, J. Magn. Magn. Mater., 159 1 (1996).

[17] J. Grollier, V. Cros, A. Hamzic, J.M. George, H. Jaffres, A. Fert, G. Faini, J. Ben Youssef, H. Legall, Appl. Phys. Lett., 78, 3663 (2001).

[18] H. Kurt, R. Loloee, K. Eid, W. P. Pratt, Jr., and J. Bass, Appl. Phys. Lett. 81, 4787 (2002).

[19] W. H. Rippard, M. R. Pufall, S. Kaka, S. E. Russek, and T. J. Silva, Phys. Rev. Lett. 92, 027201 (2004).

[20] S. I. Kiselev, J. C. Sankey, I. N. Krivorotov, N. C. Emley, R. J. Schoelkopf, R. A. Buhrman, and D. C. Ralph, Nature 425, 380-383 (2003).

[21] T. Kawahara et al., IEEE J. Solid-State Circuits, 43 (1), 109 (2008).

저자약력



성명 : 김태희

◆ 학력

- 1987년 이화여대 물리학과 이학사
- 1991년 France Louis Pasteur Strasbourg Univ. 고체물리학과 이학석사
- 1994년 France Louis Pasteur Strasbourg Univ. 고체물리학과 이학박사

◆ 경력

- 1995년 - 1997년 포항공대 물리학과 Postdoctoral fellow
- 1997년 - 1998년 Rutgers Univ., Department of Physics Research Associate
- 1998년 - 2004년 Massachusetts Institute of Technology, Francis Bitter Magnet Lab Research Scientist
- 2005년 - 2007년 이화여대 물리학과 조교수
- 2007년 - 현재 이화여대 물리학과 부교수

