

저차원 나노구조체의 거대자기저항 현상에 대한 연구: CIP-와 CPP-구조에 대한 자기저항 현상의 주요 연구 및 응용

장은영 · 김태희*

이화 여자 대학교 물리학과, 서울시 서대문구 대현동 11-1, 120-750

(2007년 10월 23일 받음, 2007년 10월 23일 최종수정본 받음)

저차원 구조체에서 스핀의존산란에 의한 거대자기저항의 주요 연구들을 정리하였다. 본 논문에서는 다층박막, 나노선, 그리고 나노필러 등의 저차원 구조체에서 효율적인 자기저항의 제어에 대한 연구결과들을 양자역학적 차원에서 되 짚어 보고 앞으로 스핀트로닉스 분야의 연구가 나갈 방향에 대해 논의하고자 한다.

주제어 : 거대자기저항, 스핀의존산란, 스핀편극전자, 나노구조, 스핀트로닉스

I. 서 론

약 20년 전 프랑스의 Albert Fert[1]와 독일의 Peter Grünberg[2]에 의해 독자적으로 발표 된 두 자성층이 반자성층에 의해 분리된 샌드위치 형태의 층상구조에서 거대자기저항(giant magneto-resistance, GMR) 현상에 대한 연구는 올해 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 등 양자역학적 현상을 기반으로 한 오늘날의 나노기술을 초래한 공로가 동등하게 인정되어 과학기술 분야에서 최고의 영예를 함께 누리게 된 것이다.

본래 자기저항이라는 현상은 자기장 안에서 전기저항의 변화율로 정의되며, 일반적으로 상온에서 1% 미만의 자기저항 효과는 벌크(bulk)에서도 관찰되어 왔다. Fert 그룹에 의해 최초로 보고된 Fe/Cr의 강자성과 반강자성 층으로 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[1]. 기존의 벌크 보다 100배 이상 큰 다층 박막에서 GMR은 다층 박막의 계면에서 발생하는 스핀의존산란에 의해 발현되는 현상이라는 것이 보고된 이후, 기존의 전하만을 이용하던 전자소자에 전자의 스핀을 함께 이용하는 소자응용의 폭을 넓혀 주어 스핀트로닉스(spintronics)라는 물리와 전자공학이 융합된 새로운 학문분야를 탄생시켰다. 이것은 또한 최근 10여 년간 눈부시게 성장한 나노 기술 등, 21세기의 신과학 기술 혁명의 기초를 마련하였고 과거 학문분야 간의 분명했

던 경계를 넘어 물리, 화학, 생물, 공학 분야가 함께 긴밀히 연계하는 융합학문의 새로운 학풍을 일으키는데 중요한 역할을 하였다고 본다[3-5].

본 논문에서는 초기 GMR 현상의 기본 구조인 다층 박막으로부터 다양한 나노 구조체에 이르는 최근 20년 동안 발표된 GMR 현상에 대한 주요 업적들을 되돌아보고 앞으로의 전망에 대해 간략히 논의해 보고자 한다.

오늘날 원자크기 수준의 표면평탄도의 제어기술을 기초로 한 나노크기의 저차원 구조체의 제작기술 발달은, 벌크 차원으로부터 2차원의 층상 그리고 1차원의 나노 두께의 선 및 주형구조와 그 배열에 이르기까지, 양자역학적 현상의 크기의 존성에 대한 체계적 연구를 가능하게 하였다. 그 연구성과들은 순수학문적 이해에 귀중한 자료로 제공되어 기초 학문발달에 큰 기여를 할 뿐만 아니라 테라 급 고집적도의 정보저장기록매체의 개발을 선도하는 중요한 기반 기술로도 활용되고 있다.

현재 산업계에서 자기저장기록매체 개발을 위해 활발히 연구 되고 있는 박막의 표면에 수직 방향으로 흐르는 전류를 측정하는 CPP(current perpendicular to plane)-GMR의 층상 구조와 나노선 그리고 주형구조에 대한 주요 연구결과들은 20세기에서 21세기로의 과학기술의 변천을 나타내는 지표라 할 수 있기에 이 논문에서 중요하게 다루고자 한다.

II. 다층박막 구조에 대한 CIP-GMR

Fig. 1의 개략도가 보여주듯이 GMR은 Cr이나 Cu 등의 비자성체 층을 사이에 둔 두 강자성체의 자화 방향에 따라 자기저항이 변화하는 현상을 말한다. 이들 강자성과 비자성층들은 약 1 nm 정도의 두께로 교대로 다층으로 적재 하고 이때 GMR 현상은 전자가 이웃한 자성층을 통과할 때 두 자

*Tel: (02) 3277-4647, E-mail: taehee@ewha.ac.kr

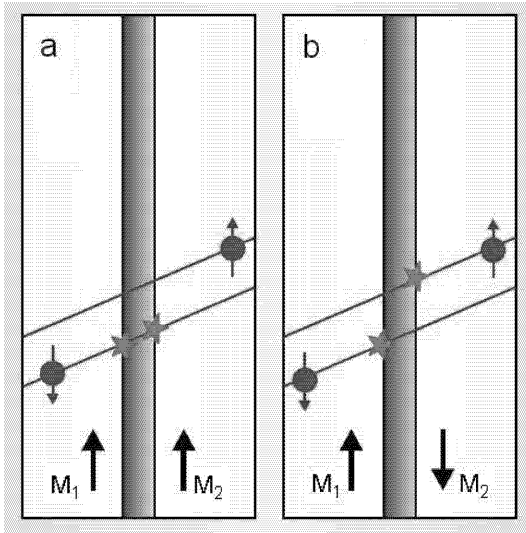


Fig. 1. Schematics of SPIN-DEPENDENT SCATTERING: Cross sections of a structure of two ferromagnetic films are shown, having magnetizations M_1 and M_2 in the directions indicated by arrows, and separated by a nonmagnetic interlayer. The net current flow is from bottom to top, but the conduction electrons (red dots with an arrow denoting the spin orientation) drift randomly within and between the layers. For simplicity, it is assumed that only electrons with their spins anti-parallel to the local magnetization are scattered. (a) With parallel M_1 and M_2 , spin-down electrons are scattered while spin-up electrons flow freely in a “short circuit.” (b) With anti-parallel M_1 and M_2 , both spin-down and spin-up electrons are scattered [Ref. 5].

성층의 자화배열이 평행(P) 또는 반평행(AP)인가에 따라 박막의 저항 값이 변화하는 것에 기인하는 것으로 스핀의존산란(spinependent scattering)으로 설명이 가능하다[1-5].

그 원리는 RKKY 모델을 기반으로 한 두 인접한 자성층 간에 작용하는 교환결합(exchange coupling)에 의한 것으로 학계에 널리 알려져 있다[3-5]. R^{AP} 와 R^P 는 각각 자화 배열이 평행 그리고 반평행인 경우의 저항 값을 나타낼 때, $GMR = (R^{AP} - R^P)/R^P$ 로 정의되는 GMR은 두 자성층 사이의 반강자성 Cr 두께의 의존성을 보이는데, 두께가 감소하여 9 Å에 이르러서 저온(4.2 K)에서 무려 80% 그리고 상온(300 K)에서는 20%의 GMR 효과가 측정되었다(Fig. 2 참조). 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[6].

Fert와 Grünberg의 선도적인 연구 이후, 다양한 자성과 비자성 조합에서 GMR현상이 연구되었는데, 미국 IBM의 Parkin이 이끄는 연구진은 자성층 간의 antiferromagnetic한 교환 결합의 비자성층 두께의 의존성을 체계적으로 연구하여 GMR head로 응용되는 스핀밸브(spin valve) 구조를 개발하는데 매우 큰 공헌을 하였다[7].

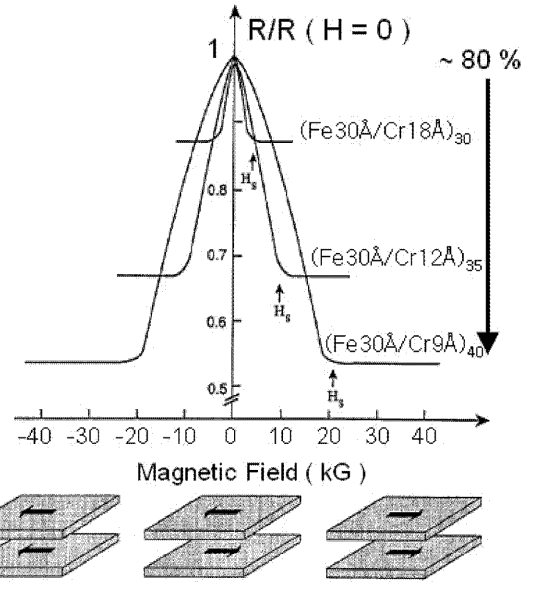


Fig. 2. Magneto-resistance curves at 4.2 K of (Fe/Cr) multilayers [Ref. 1].

한편 다층박막계가 아닌 미세입상박막(granular film) 구조에서도 미국 Johns Hopkins 대학의 Chien 등에 의해 GMR 현상이 발견되었는데 당시 GMR 현상의 주요 요인으로 계면뿐만 아니라 부피에 의한 스핀 산란효과 또한 고려해야 함을 보이는 중요한 연구결과였다[8].

III. 층상구조에 대한 CPP-GMR

GMR 현상은 박막구조에서 두 가지 방법으로 측정되는데, 그 하나는 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 CPP 구조는 그 저항 값이 매우 작아 측정에 어려움이 있었으나 Pratt 등에 의해 CPP 구조에서 자기저항 측정방법이 제시되었다[9]. CPP-GMR이 측정됨으로써 자성층 내에서의 스핀전도전자의 스핀산란거리 (spin scattering length), 계면/부피(interface/bulk) 저항의 구분, 계면상태에 따른 변화 등에 대한 학문적 연구가 보다 심도 깊게 진행되었다.

Fert 그룹에 의한 CIP와 CPP 구조에서 거대자기현상에 대해 이론적 연구는 GMR에 대한 물리적 원리의 이해에 필요한 주요 정보를 제공 하였다[10]. 계면산란에서의 스핀 비대칭성 산란 계수에 따라 거대자기저항현상이 종래와는 반대로 나타나는 역거대자기저항현상(inverse GMR)에 대한 결과가 처음으로 보고되었고, 계면과 부피산란에 의한 효과를 구분하여 비대칭성 산란을 규명하였으며, 자성층 간의 결합에도 반

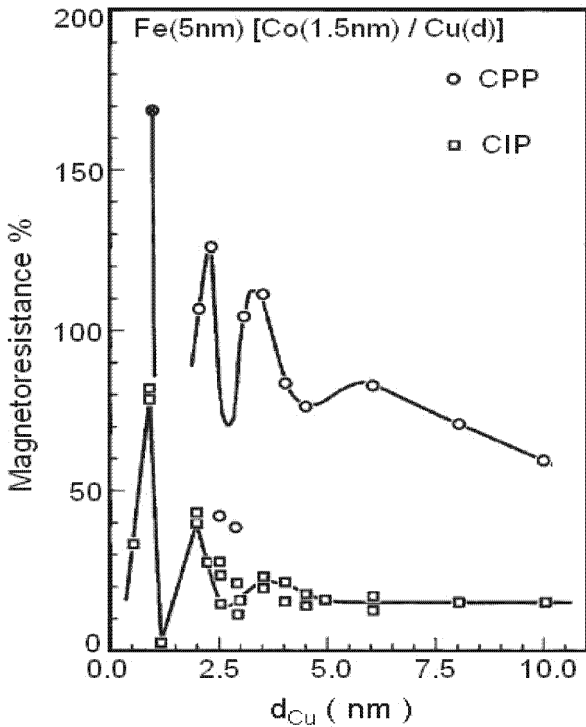


Fig. 3. Variation of the CPP and CIP GMR as a function of the nonmagnetic Cu thickness [Ref. 9].

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

한편 미국 Michigan 주립대의 Pratt 그룹은 CIP와 CPP-GMR에서 각기 다른 scaling length를 제안하고, 스핀축적 (spin-accumulation)에 의한 CIP 구조에서 스핀 평균자유경로 (mean free path) 보다 10배 이상 긴 CPP 구조에서의 스핀 확산거리 (spin diffusion length)로 인해, CPP 구조에서 효과적인 스핀의존산란에 의한 GMR의 증가를 실험으로 확인하였다[9]. Fig. 3은 이러한 계면 산란의 보다 효과적인 제어가 가능한 CPP 구조에서 CIP 구조보다 10배 정도 큰 GMR 값이 측정 됨을 보여준 Pratt 그룹의 연구결과이다. 여기서 CIP와 CPP-GMR 모두 비자성층의 두께에 따라 감소 진동하는 양상이 뚜렷이 나타남을 알 수 있다.

IV. 다층 나노선에 대한 CPP-GMR

기존의 진공 장비에 비해 공정이 간편하고 저렴한 전기증착법에 의해 멤브란의 주형 구멍을 나노틀(nano-template)로 활용하여 Co/Cu 또는 Py/Cu 등 다층박막형태로 제작한 나노선의 CPP-GMR 현상에 대한 연구 또한 진행되었다[4, 10]. Co/Cu과 Py/Cu 나노선의 CPP-GMR이 77 K에서 각각 ~30% 과 ~70% 정도 측정되었다(Fig. 4 참조). Fig. 4의 왼쪽 삽

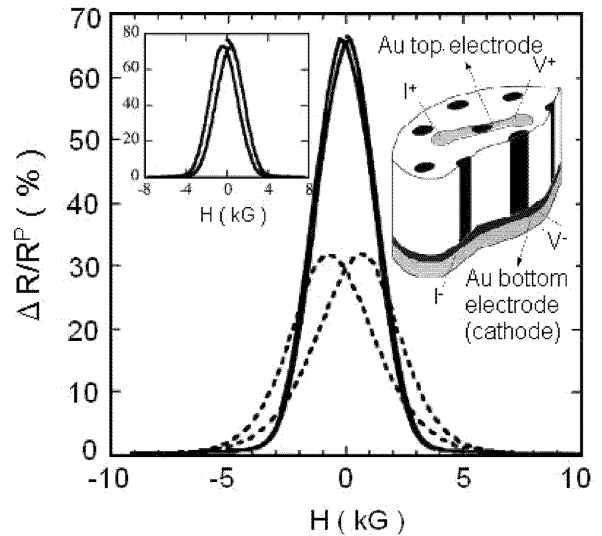


Fig. 4. CPP-GMR ($\Delta R/R^P$) versus applied field parallel to the layers at 77 K for $Ni_{80}Fe_{20}(12 \text{ nm})/Cu(4 \text{ nm})$ (full line) and $Co(10 \text{ nm})/Cu(5 \text{ nm})$ (dashed line) multilayered nanowires. Inset: same plot at 4.2 K for the $Ni_{80}Fe_{20}/Cu$ sample [Ref. 12].

입 그림에서 보여 주듯이, Py/Cu 나노선의 경우 77 K로부터 온도를 감소한 4.2 K에서 GMR이 약 ~80%인 소폭의 상승이 관찰 되었다[10]. 나노선의 CPP-GMR을 측정을 위한 4-probe 측정 contact 구조는 Fig. 4의 오른쪽에 삽입된 개략도가 보여주는 것과 같다.

이 결과는 스핀 확산거리가 각 박막의 두께보다 긴 CPP 구조라는 것과 상대적으로 손쉬운 전기증착법이란 공정과정을 고려할 때 매우 흥미로우나, 앞의 III 장에서 언급한 진공 증착장비와 전자빔 식각에 의한 층상 CPP 구조의 GMR 효과엔 미치지 못 하는 결과라 할 수 있다. 상대적으로 제어하기 어려운 각 층간의 계면 거칠기, 그리고 제작과정 중 발생할 수 있는 오염에 의한 스핀의존산란의 감소 등 그 원인과 개선방법에 대한 연구가 진행되고 있으나[11-13], 전기증착법에 의해 다룰 수 있는 다층박막 구성 물질이 한정돼 있다는 것 또한 단점으로 지적 할 수 있다. 그러므로 최근에 다시 전자빔을 이용한 CPP-구조의 제작과 그 GMR 현상에 대한 연구가 더욱 활발히 진행되고 있으며, 다음 장에서 이야기할 나노필러에 대한 CPP-GMR 연구가 그 한 예이다.

V. 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 수 많은 이론과 실험 연구결과가 발표되었다.

자성층의 자화방향에 수직으로 주입된 스핀과 자화 사이의

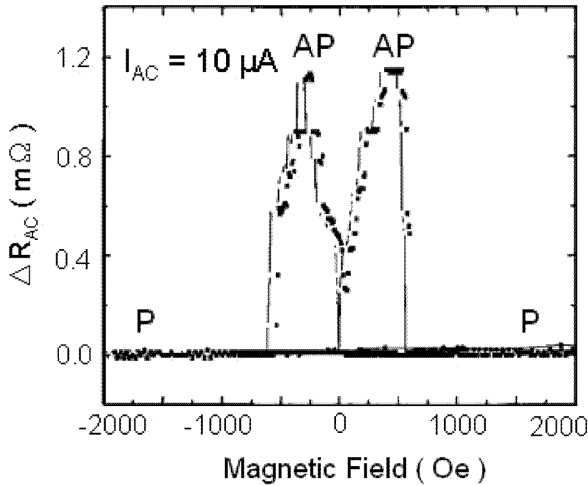


Fig. 5. GMR curve of a 200~600 nm.

상호작용에 의해 야기되는 자화반전 현상은 약 $200 \times 600 \text{ nm}^2$ 크기의 $\text{Co}(15 \text{ nm})/\text{Cu}(10 \text{ nm})/\text{Co}(2.5 \text{ nm})$ 주형 박막에서 처음으로 보고 되었다[14]. Fig. 5는 이 나노필러에 $50 \mu\text{A}$ 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.

Fig. 6은 나노필러에 음의 DC-전류를 인가하면 저항이 평행에서 반평행 상태로, 반대로 양의 DC-전류를 공급하면 반평행에서 평행상태의 저항으로 스위칭 되는 것을 보여주는 것으로, Slonczewski의 이론 대로 전류에 의해 유도되는 자화반전이 형성됨을 보이는 중요한 결과 이다[15]. 이러한 나노필러에서 전류에 의한 자화반전 현상을 기반으로 스핀토크(spin torque)에 대한 이론 및 실험 연구가 최근 급격히 증가하였는데, 작은 DC전류에 의해 고품질 가변 마이크로파 발

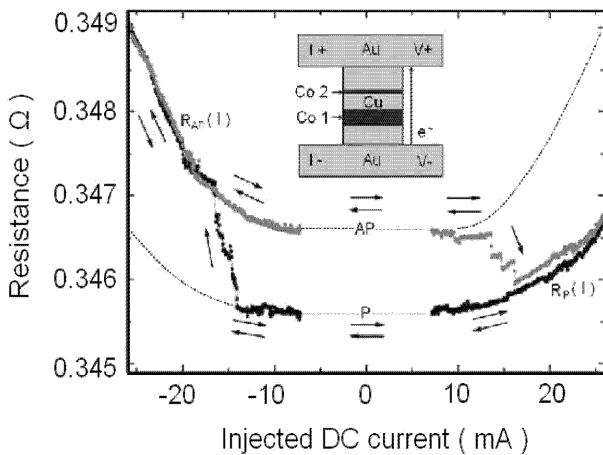


Fig. 6. Resistance as a function of DC current [Ref. 15].

진이 발생될 수 있는 나노패턴 강자성 소자로의 응용에 대한 연구가 미국의 NIST, Cornell대 그리고 Michigan 주립대의 연구진에 의해 활발히 진행되고 있다. 이 스핀토크 발진기는 고품질의 동조와 높은 집적도를 겸비하는 저전력, 저비용 응용 및 광대역 가변에 있어서 핵심적 기술을 제공할 것으로 기대 된다[16-18].

VI. 맺음말

본 논문에서는 스핀트로닉스 분야에서 Fert와 Grünberg의 초기 GMR 모델을 기반으로 층상구조에서부터 나노필러 구조에 이르는 스핀편극전자와 스핀의존산란에 관련 된 주요 연구들을 정리 하였다. 단지 최초로 GMR 모델을 주창하고 검증하는 수준에 머무르지 않고 최근 나노필러의 GMR 대한 연구에 까지 약 20년 동안 끊임 없이 이론과 실험 전분야에 걸쳐 이론 Fert의 방대한 연구업적은 참으로 노벨 물리학상을 받기에 부족함이 없다고 할 것이다.

차세대 고성능 고집적도의 비휘발성 메모리 소자개발이라는 기술혁신을 성취하기 위해서는 앞으로도 나노크기 수준에서 제어되는 양자현상의 이해에 그 승패가 달려 있다고 해도 과언이 아닐 것이다. 이러한 과학기술 혁신은 스핀과 일렉트로닉스의 합성어인 스핀트로닉스의 어원으로부터 알 수 있듯이, 물리 화학 공학 분야 사이에 긴밀한 연구협력을 필요로 한다. 최근 금속/반도체(초전도체 또는 산화물) 그리고 무기물/유기물 등의 복합 다체계에서 다기능 소재와 소자의 개발을 위한 연구는 GMR 현상 연구가 우리에게 나노과학의 새로운 장을 열어 주었듯이 또 다시 새로운 과학 혁명을 초래할 것으로 기대하는 바이다.

감사의 글

저자 김태희는 스핀트로닉스 분야의 연구자의 한 사람으로서 이 분야에 발전에 매우 큰 공헌을 한 Albert Fert 교수께 깊이 감사 드린다. 박사학위과정 시절 들었던 그의 강연들과 지난 2006년 10월 프랑스에서 열린 TMN2006 학회에서 그의 스핀트로닉스에 대한 초청강연은 이 논문을 작성하는 기초가 되었음을 밝힌다. 또한 저자 일동은 이화여자대학교에서 진행되는 스핀트로닉스 연구를 지원해주는 한국과학재단(No. R01-2006-000-11227-0)과 한국기술진흥재단(KRF-2006-531-C00026)에 깊은 감사를 표하는 바이다.

참고문헌

- [1] M. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. N. Guyen Van Dau, F.

- Petroff, P. Etienne, G. Creuzet, and A. Friederich, Phys. Rev. Lett., **61**, 2472 (1988).
- [2] P. Grünberg, R. Schreiber, Y. Pang, M. B. Brodsky, and H. Sowers, Phys. Rev. Lett., **57**, 2442 (1986).
- [3] A. Barthélémy, A. Fert, J.-P. Contour, M. Bowen, V. Cros, J. M. De Teresa, A. Hamzic, J. C. Faini, J. M. George, J. Grollier, F. Montaigne, F. Pailloux, F. Petroff, and C. Vouille, J. Magn. Magn. Mater., **242-245**, 68-76 (2002).
- [4] A. Fert and L. Piraux, J. Magn. Magn. Mat., **200**, 338 (1999).
- [5] P. Grünberg, Physics Today, **54**(May), 31 (2001).
- [6] R. Schad, C. D. Potter, P. Beliën, G. Verbanck, V. V. Moshchalkov, and Y. Bruynseraede, Appl. Phys. Lett., **64**, 3500 (1994).
- [7] S. S. P. Parkin, N. More, and K. P. Roche, Phys. Rev. Lett., **64**, 2304 (1990).
- [8] John Q. Xiao, J. Samuel Jiang, and C. L. Chien, Phys. Rev. B, **46**, 9266 (1992).
- [9] P. A. Schroeder, J. Bass, P. Holody, S. F. Lee, R. Loloee, W. P. Pratt Jr., and Q. Yang, Materials Research Society Symposium Proceedings, vol. **313**, MRS, Pittsburg, PA, 47 (1993).
- [10] C. Vouille, A. Barthélémy, A. Fert, P. A. Schroeder, S. H. Hsu, A. Reilly, and R. Loloee, Phys. Rev. B, **60**, 6710 (1999).
- [11] L. Piraux, J. M. George, J. F. Despres, C. Leroy, E. Ferain, R. Legras, K. Ounadjela, and A. Fert, Appl. Phys. Lett., **65**, 2484 (1994).
- [12] S. Dubois, J. M. Beuken, L. Piraux, J. L. Duvail, A. Fert, J. M. George, and J. L. Maurice, J. Magn. Magn. Mater., **165**, 30 (1997).
- [13] K. Liu, K. Nagodawithana, P. C. Pearson, and C. L. Chien, Phys. Rev. B, **51**, 7381 (1995).
- [14] J. Slonczewski, J. Magn. Magn. Mater., **159**, 1 (1996).
- [15] J. Grollier, V. Cros, A. Hamzic, J.M. George, H. Jaffres, A. Fert, G. Faini, J. Ben Youssef, and H. Legall, Appl. Phys. Lett., **78**, 3663 (2001).
- [16] H. Kurt, R. Loloee, K. Eid, W. P. Pratt Jr., and J. Bass, Appl. Phys. Lett., **81**, 4787 (2002).
- [17] W. H. Rippard, M. R. Pufall, S. Kaka, S. E. Russek, and T. J. Silva, Phys. Rev. Lett., **92**, 027201 (2004).
- [18] 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 (2003).

Giant Magnetoresistance in Low Dimensional Structures: Highlights and Applications of CIP- and CPP-GMR

Eun Young Jang and Tae Hee Kim*

Department of Physics, Ewha Womans University, Seoul 120-750, Korea

(Received 23 October 2007, in final form 23 October 2007)

Recent years have seen a rapid development of spintronics. One of the major achievements of this field is the understanding of spin dependent process in various physical systems, for example, metallic multilayers showing the giant magnetoresistance (GMR). Today devices based on the GMR are revolutionizing electronic data storage. In this paper, we review recent developments in the research on GMR of low dimensional structures. We describe the magnetoresistance properties of magnetic multilayers, multilayered nanowires and nonopillars, etc.

Keywords : giant magnetoresistance, spin dependent scattering, spin-polarized electron current, low dimensional structures