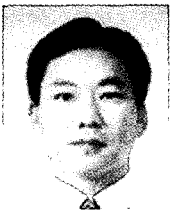


# Spintronics 기술의 현황 및 전망



김 영 근

고려대학교 재료공학부 교수  
ykim97@korea.ac.kr

## 1. 서론

스핀트로닉스 (Spintronics: Spin과 Electronics의 합성어) 기술은 전자의 전하뿐만 아니라 스핀 자유도, 즉 업스핀 (up-spin?) 전자와 다운스핀 (down-spin?) 전자를 구분하여 전자의 이동을 제어하는 신기술을 통칭한다. 이미 이 기술은 나노 기술 (Nanotechnology)의 한 축으로, 예전에는 볼 수 없었던 새로운 양자역학적 현상의 발견으로 지속적인 기술의 발전을 이루고 있으며, 특히 반도체, 광학, 생명공학 기술 등과의 접목을 통해 초고속 정보저장기술, 바이오센서, 스핀 광소자 등 다양한 미래 신산업 응용분야를 창출할 것으로 예상된다.

본 글에서는 스핀트로닉스 기술의 기본원리를 알아보고 국내외 연구동향을 살펴봄으로써 나노기술의 발전을 근간으로 새로운 연구영역으로 자리를 잡아 가고 있는 스핀트로닉스에 대한 이해를 돕고자 한다.

## 2. 역사적 배경

1948년 벨연구소에서 트랜지스터가 개발된 이

후 전자소자기술은 무어의 법칙을 따르면서 눈부신 발전을 이루어 왔으나 현재는 기술 포화 상태에 이르렀으며 향후 20년 후에는 반도체 소자의 크기가 실리콘 격자상수 (약 0.54 nm)에 도달하여 사실상 소자제작이 불가능할 것으로 예상된다. 따라서 새로운 차세대 소자의 출현이 시급히 요구되고 있다.

이러한 현재의 기술적 난관 극복을 위하여 전자의 전하와 함께 스핀의 자유도를 고려하여 전자소자를 개발하려는 새로운 패러다임인 스핀트로닉스 기술이 근래에 와서 큰 기대를 받고 있다. 아울러 스핀전자소자는 비 휘발성 (Non-volatility)과 함께 초고속 및 초저전력 등의 고유 특성을 가지고 있기 때문에 향후 나노기술의 발전과 함께 차세대 전자소자의 혁명적 성장을 주도할 것으로 전망되고 있다.

## 3. 자기저항 (Magnetoresistance) 기술

스핀트로닉스에서 가장 먼저 상업화에 성공한 거대자기저항 (GMR, Giant Magnetoresis-



tance)은 1988년에 A. Fert 그룹에서 발표한 현상이다[1]. 이후, IBM에 의해 보고 된 스핀밸브(SV, Spin-Valve)라 불리는 정보감지기구[2]는 구조설계에 따른 출력신호의 선형성을 확보할 수 있게 되어 GMR 헤드로서의 산업적 응용을 가속화하였다.

한편, GMR의 발견이후 가장 두드러진 발전중의 하나는 상온에서 자성체/절연체/자성체 박막 구조에서 관찰된 스핀 분극 된 전자의 터널링 자기저항(Tunneling Magnetoresistance, TMR) 현상이다[3].

#### 4. 스핀주입 (Spin Injection) 기술

현재 스핀전자소자 연구 분야의 가장 큰 관심은 전하와 스핀의 자유도를 동시에 고려하여 메모리 및 논리용 트랜지스터의 구현에 있으며 스핀 분극된 전자를 자성금속으로부터 상자성 금속에 주입하는 일 (Spin Injection)에 관한 연구가 진행되고 있다. 스핀 스위치 저장소자로서의 양극 스핀 트랜지스터 (Bipolar Spin Transistor)[4], 하이브리드 자성금속/반도체 구조의 스핀 트랜지스터[5], 이차원 전자가스 (Two-dimensional Electron Gas, 2DEG)에 자성금속의 박막으로부터 스핀주입을 하는 구조의 스핀분극 전계효과 트랜지스터 (Spin-polarized Field Effect Transistor, Spin FET)[6] 등에 대한 연구가 세계적으로 활발히 진행 중이다. 특히, 스핀분극 전계효과 트랜지스터의 경우 자성금속/반도체의 계면에 절연층을 삽입하거나 이차원 전자가스층의 측면으로 스핀을 주입하는 등의 방법으로 상온 동작이 가능하고 20%이상의 저항변화 특성 확보를 위한 활발한 연구 중이다.

#### 5. 자성 반도체 (Magnetic Semiconduction) 기술

자성금속/반도체에서의 스핀주입이 Conductivity Mismatch에 의해 효율이 떨어지는 근본적인 문제를 해결하기 위하여 시도하고 있는 것이 자성반도체/반도체 소자이다. 여기서 자성반도체는 분자 빔 에피택시 (Molecular Beam Epitaxy, MBE) 공정이나 이온 임플란테이션 (Ion Implantation)을 이용하여 III-V족 반도체에서 III이나 V족 원소 일부를 자성 금속으로 치환시킴으로써 제작된다. 예로 Mn이 GaAs에 약 7% 까지 도핑되며, 성장기판 온도에 따른 Ga<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>As의 상태도와 자기이력곡선 및 큐리온도 (T<sub>c</sub>)를 보여준다[7]. 최근에는 자성금속의 자기터널접합소자 (Magnetic Tunnel Junction)와 유사한 GaMnAs/GaAlAs/GaMnAs : 자성반도체/비자성반도체/자성반도체에서 자기터널저항 효과를 관찰하기도 하였다.

#### 6. 국내외 기술개발 동향 및 향후전망

미국은 국방성에서 첨단 연구를 담당하고 있는 DARPA (US Defense Advanced Research Projects Agency) 주도로 향후 수년간 1억 달러의 연구비를 투자할 예정이다. 또한 IBM과 Motorola 등 유수한 전자관련 기업들이 앞 다퉈서 많은 투자를 하고 있는 실정이다.

현재 스핀트로닉스 소자 중 유일하게 상용화된 제품인 GMR 헤드는 기록밀도가 지속적으로 증가함에 따라, 면수평 전류주입형 (CIP, Current-In-Plane) 스핀밸브 구조를 대신할 면수직 전류주입형 (CPP, Current-Perpendicular-to-the-Plane) 스핀밸브 구조의 연구가

발이 산업계에서 활발히 전개되고 있다.

한편 개발이 가속화 되고 있는 MRAM 분야에서 미국 기업들은 MRAM 잠재시장에서의 우위 선점과 막대한 개발 투자에 따르는 위험을 줄이기 위해 공동연구 또는 기업간 협력의 경향이 뚜렷하다 (예: IBM-Infineon, Honeywell-USTC, Cypress-NVE). 2002년 VLSI Symposium에서 Motorola는 0.6 $\mu$ m CMOS와 셀 크기가 7.2  $\mu$ m<sup>2</sup>인 1 Mbit MRAM 프로토타입을 발표하였다. 현재 IBM과 Motorola는 각각 2005년경에 MRAM을 시장에 출시할 예정이라고 홍보하고 있으나 국내외 전문가들의 전망으로는 기술의 성숙도를 감안하여 일어난 정도 지연되리라 보고 있다. 한편, 일본은 미국에 비해 뒤늦게 개발에 착수하였으나 반도체공정, 자기재료 분야에 풍부한 기반기술을 갖고 있으므로 빠른 기술 발전을 할 것으로 예상된다.

국내에서 금속 기반의 스핀트로닉스인 GMR 및 TMR 연구는 학계를 중심으로 재료, 물성 관련 기초연구가 진행되고 있으며, 삼성종합기술원, 삼성전자 등에서 MRAM 연구개발을 수행 중에 있다. 삼성은 작년 말 0.24  $\mu$ m 공정을 적용하여 크기가 2.06  $\mu$ m<sup>2</sup> 인 MRAM 셀을 개발하였다. 반면, 반도체를 기반으로 하는 스핀트로닉스에 관한 연구는 최근부터 시작되었다. 2002년부터 KIST 주도의 Vision 21 사업에서 하이브리드 스핀트로닉스 소자 및 강자성 반도체 연구에 박차를 가하고 있다.

## 6. 맺음말

20세기의 반도체 기술이 전자의 전하를 이용한 마이크로 일렉트로닉스 기술이었다면, 21세기는 전자의 스핀정보를 이용한 스핀트로닉스 기술

이다.[8] 라는 표현이 스핀트로닉스 기술의 가능성을 함축하고 있다.

약 반세기 전 트랜지스터의 발명으로 시작한 반도체기술은 현재의 전자기술을 이루었으며 산업사회에서 정보사회로의 변화에 밑거름이 되었다. 지난 50년간 반도체기술은 전자의 전하 제어 기술로서 유지되어 왔으며 더 빠르고 더 작은 소자의 요구 한계에 접근하고 있다. 그러나 최근 들어 전자의 전하뿐만 아니라 스핀 정보를 이용하여 전자의 이동을 제어하는 기술, 즉 스핀트로닉스라는 신 개념의 응용기술 분야를 탄생시키고 있으며 현재의 반도체기술의 한계를 극복할 수 있는 대안으로 떠오르고 있어, 트랜지스터의 발명이 가져온 반도체기술 이상의 사회·문화적 변화를 불러올 것으로 예측된다.

## [참고문헌]

- [1] M. Baibich et al, Phys. Rev. Lett. 61, 2472 (1988)
- [2] B. Dieny, V. S. Speriosu, S. S. P. Parkin, B. A. Gurney, D. R. Wilhoit, and D. Mauri, Phys. Rev. B 43, 1297 (1991)
- [3] J. Moodera et al., Phys. Rev. Lett. 74, 3273 (1995)
- [4] M. Johnson, Science 260, 320 (1993); Phys. Rev. Lett. 70, 2142 (1993); J. Mag. Mag. Mater. 140-144, 21 (1995)
- [5] G. A. Prinz, Science 250, 1092 (1990)
- [6] S. Datta and B. Das, Appl. Phys. Lett. 56, 665 (1990)
- [7] H. Ohno, Science 281,951 (1998)
- [8] T. Dietl, H. Ohno, F. Matsukura, J. Cibert, and D. Ferrand, Science 287, 1019 (2000)

기획 : 윤종승 편집위원 csyoon@hanyang.ac.kr