



# 융합 Weekly TIP

Technology · Industry · Policy

만물인터넷을 위한 스피트로닉스 기반  
초저전력 초고속 통신소자

우성훈 | 한국과학기술연구원 스피융합연구단



# 만물인터넷을 위한 스핀트로닉스 기반 초저전력 초고속 통신소자

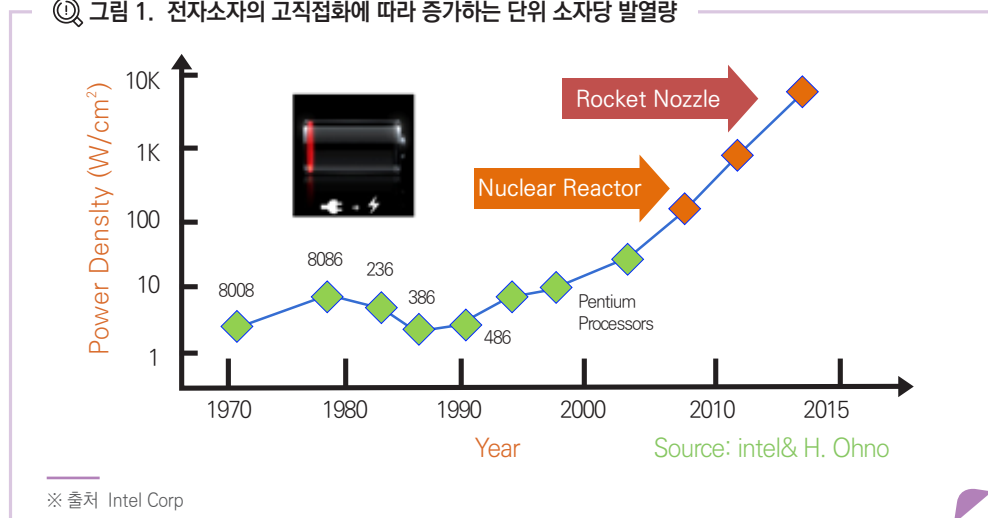
우성훈 | 한국과학기술연구원 스핀융합연구단

# 01

## 선정배경

- 최근 모든 전자 기기가 연결되어 상호 통신함으로써 사람들의 일상생활 전반에 걸쳐 영향을 끼치는 '만물인터넷(IoE: Internet of Everything)' 시대가 도래
- AI(인공지능)등 관련 기술이 더욱 확대·보급됨에 따라, 상호 통신 무선소자들의 트래픽 및 통신 기기들의 전력 소모가 증대할 것으로 예상
  - 현재의 통신 기술은 실리콘 기반의 CMOS(Complimentary Metal-Oxide-Semiconductor) 통신 소자에서 발생하는 주파수 영역대 및 통신 방법을 개선하는 방법으로 3G, 4G, 5G순으로 발전
  - 4G, 5G로 이어지는 새로운 고성능 통신기법의 출현은 단위 통신소자의 소모전력 및 발열량을 크게 증가시킴

그림 1. 전자소자의 고집적화에 따라 증가하는 단위 소자당 발열량



- 최근 CMOS 통신의 대체기술로 전자의 '스핀'을 이용하는 스핀트로닉스 분야를 기반으로 저전력 및 초고속으로 작동하는 차세대 통신소자에 대한 연구가 활발히 진행

- 이에 스핀트로닉스를 활용한 차세대 IoT용 초저전력 초고속 통신소자 기술에 대해 알아보하고자 함

## 02

## 스핀트로닉스 기반 초저전력 초고속 통신소자 기술

## (1) 스핀트로닉스의 정의

- 💡 스핀트로닉스 기술은 전자의 전하와 스핀을 동시에 제어하는 기술
  - 기존의 일렉트로닉스(Electronics) 기술은 전자의 두 가지 특성인 전하와 스핀 중 양자역학적인 스핀을 고려하지 않고 전하만을 제어
  - 스핀트로닉스 기술은 초고속, 초저전력 및 초고주파 등 스핀 고유의 특성으로 차세대 통신 소자로서 높은 효율성 기대

▶ 표1. 일렉트로닉스와 스핀트로닉스의 비교

전자 통신소자 (Electronics)	스핀 통신소자 (Spintronics)
High Power	Low Power
Device "Boot up"required	No "Boot up"required
Less Compact	More Compact
Normal Speed	Faster Transfer
Cheaper	Costlier

※ 출처 저자작성

## (2) 스핀트로닉스 기반 통신 소자의 역사

- 💡 전류구동 스핀 소자의 개념은 1996년 L. Berger와 J. C. Slonczewski가 독립적으로 발표한 스핀전달토크 이론에 근거[1,2]
  - 이들은 전류를 인가하여 국부적인 자화 방향을 반전시킬 수 있으며, 10 GHz 정도의 주파수를 갖는 마이크로파 발생을 예측

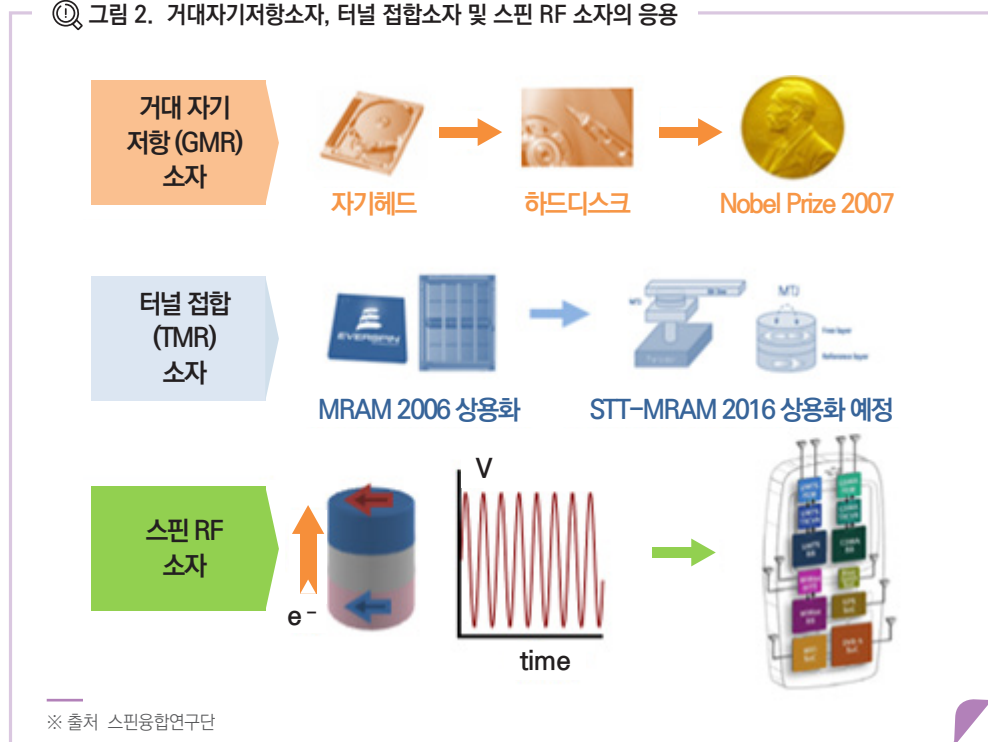
- 💡 병렬적으로, 1986년 프랑스의 A. Fert\*와 독일의 P. Grunberg\*의 거대자기저항현상(giant magneto-resistance, GMR)발견 이후, 자기저항 효과에 대한 연구가 급속도로 발전

\* 2007년 노벨 물리학상 수상



💡 스핀발진기는 GMR(거대자기저항) 및 TMR(터널형 거대자기현상) 소자의 자기저항 효과와 전류구동 자화반전(Current Induced Magnetization Switching, CIMS) 현상을 함께 응용하여 구현하는 소자[3,4]

🔍 그림 2. 거대자기저항소자, 터널 접합소자 및 스핀 RF 소자의 응용



💡 1999년 Cornell 대학 연구그룹에 의해 GMR 소자에서 스핀토크에 의한 자화반전을 실증함으로써 Berger와 Slonczewski의 이론적 예측을 증명[4]

💡 2003년 Cornell 대학 연구진이 스핀토크에 의한 초고주파 발진을 실험적으로 증명하면서 스핀 발진기에 대한 연구가 급속히 진전[3]

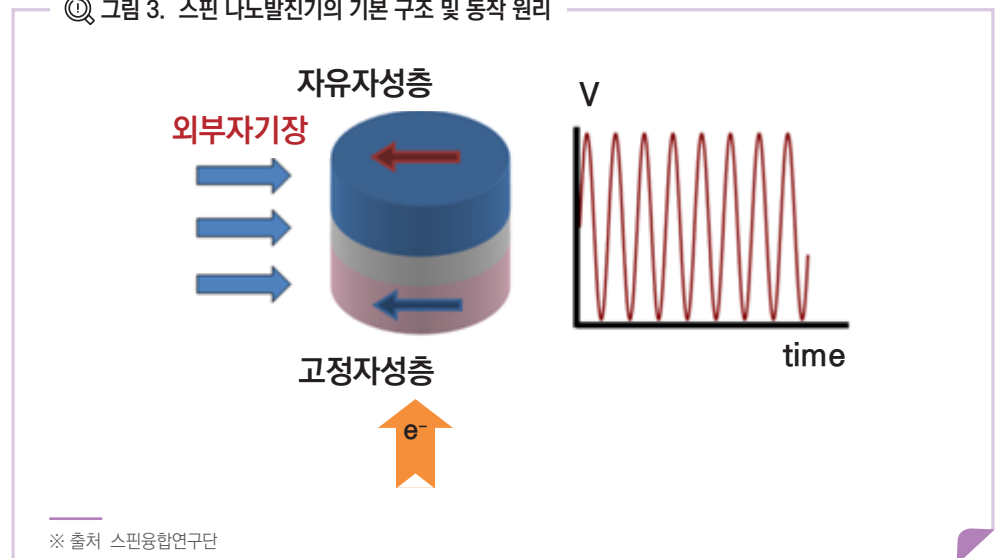
💡 현재 소자의 상용화까지는 아직 도달하지는 못하였으나, 스핀발진기 연구의 학술적, 기술적 파급력은 높을 것으로 예상

※ 최근 Science, Nature를 비롯한 세계적인 학술지에 30여 편의 관련 논문 게재

### (3) 스핀 RF 소자의 구동 원리

- 💡 스핀전달토크 현상을 이용한 스핀 RF 발진기 통신 소자는 적정 전류를 인가하여 스핀의 세차운동을 일으킴으로써 수 GHz 주파수 대역의 신호 발진
  - 이 때 전류 혹은 자기장의 변화에 따라 공진 주파수를 넓은 범위(십~수백 GHz 영역) 내에서 조절하는 것이 가능함
- 💡 또한 스핀트로닉스 기반의 통신소자는 소자의 크기를 수십 나노미터로 축소할 수 있으며, 제조공정이 CMOS process와 호환 가능하므로 집적화에 유리[3]
- 💡 스핀 통신 소자는 고정 자성층(pinned magnetic layer), 비자성층(절연층) 및 자유 자성층(free magnetic layer) 으로 이루어진 자기터널접합 구조
  - 고정 자성층은 경계면에 대해 평행한 고정된 자화 방향을 가지며, 비자성층은 고정 자성층과 자유 자성층의 사이에 위치
- 💡 통신 소자에 전류를 인가하는 경우, 인가된 전류의 스핀전달토크에 의해 자유 자성층의 자화 방향을 회전시킬 수 있으며, 이때 자유 자성층의 자화가 수 GHz 내지 수십 GHz의 주파수 대역으로 회전하면서 초고주파 교류신호를 출력

㉔ 그림 3. 스핀 나노발진기의 기본 구조 및 동작 원리

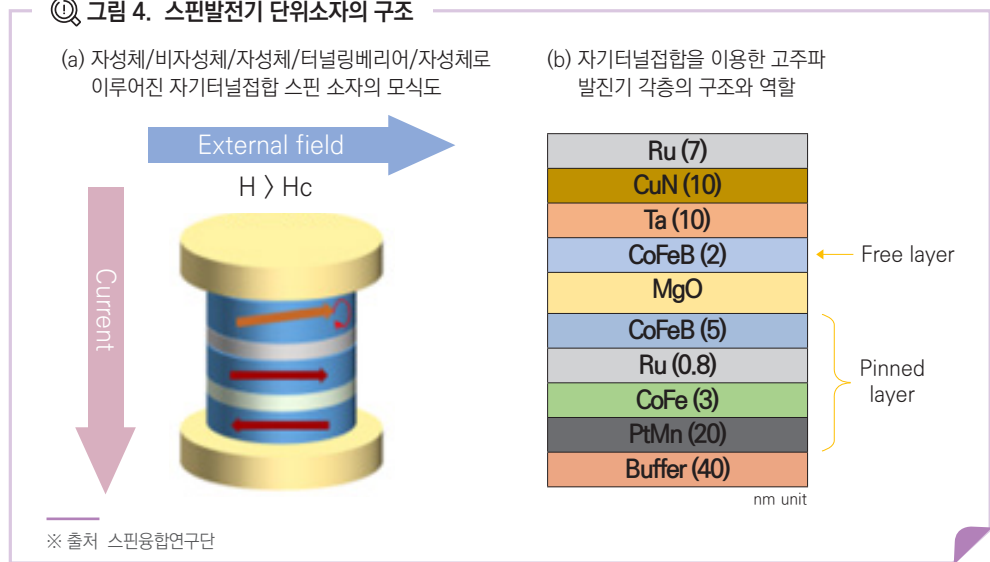




#### (4) 스핀발진기 단위소자의 구조

- 💡 스핀토크 기반 통신 소자의 가장 핵심적인 구성요소는 자기터널접합
  - 자기터널접합은 자성체, 절연체, 자성체로 구성되어 있으며, 두 자성층 사이에 전압을 인가하면, 절연체를 터널하는 전자의 전도도(conductance)가 두 자성층의 상대적인 자화방향에 의해 전환

🔍 그림 4. 스핀발진기 단위소자의 구조



- 💡 초고주파 대역 스핀토크 나노 RF 소자에 사용할 터널접합구조 설계의 고려사항
  - 자기터널접합은 수~수십  $\Omega \mu\text{m}^2$ 의 낮은 저항값( $R \cdot A$ : resistance \* area)을 가지고, 충분한 터널자기 저항비(TMR)가 확보되어야 RF 회로와 임피던스 매칭이 되는 스핀토크 나노 통신 소자로 응용 가능
  - ※ [그림 4]는 가장 일반적으로 쓰이는 MgO 기반 자기터널접합 구조를 나타냄

(5) 스핀통신 소자의 성능

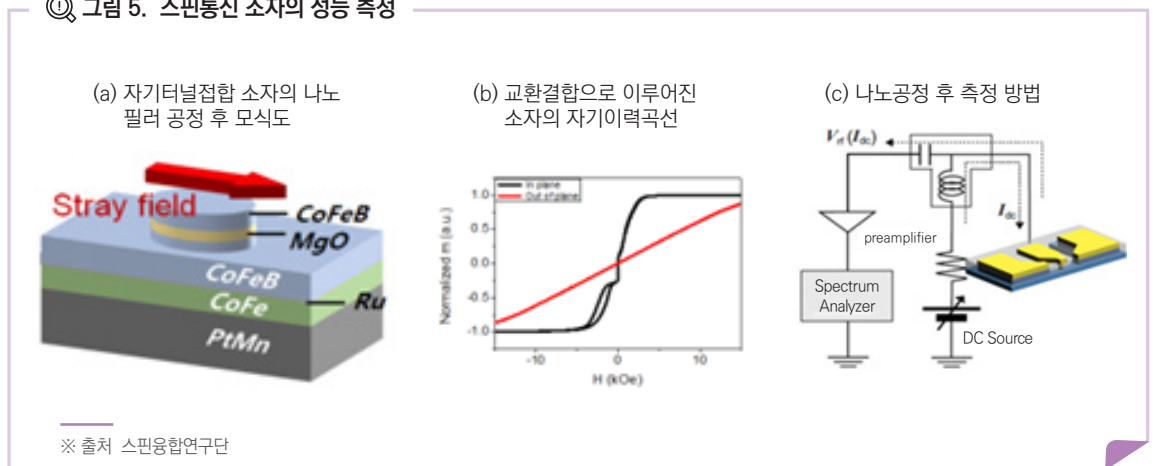
💡 스핀 통신소자는 일반적으로 최대  $\sim 50 \text{ nV/Hz}^{1/2}$ \*의 스펙트럼 밀도(Spectral density)를 갖는 초고주파 발진 출력을 가지며, CMOS 소자 출력에 비해 매우 향상된 결과

\* Power로 환산하면,  $\sim 50 \text{ nW/GHz}$ 에 해당

💡 또한 이러한 스핀토크 기반의 나노통신 소자의 중심 주파수는 전류 바이어스에 따라  $\sim 1 \text{ GHz/mA}$  수준으로 변환 가능

- 통신 주파수 영역은 수 GHz  $\sim$  수십 GHz대로 CMOS 기반의 단위 통신소자에 비해 수십 배 절감한 수치

🔍 그림 5. 스핀통신 소자의 성능 측정





해외동향

- 💡 스피닝기반 통신소자에 관련한 연구는 주로 미국, 프랑스, 일본 등에서 활발하게 진행되고 있으며, 특히 스피닝 통신소자에 관한 연구는 미국이 주도하여 프랑스, 일본, 독일 등이 추격하고 있는 상황
  - **(미국)** 주요 연구기관은 Cornell, Michigan State University, New York, Missouri 등의 대학과 연구기관인 NIST를 중심으로 이론 및 실험 연구가 진행되고 있으며, IBM, Hitachi GST, Seagate 등의 기업에서는 스피닝발진기의 실용화 연구를 활발히 진행 중
  - **(일본)** 스피닝 통신소자 관련된 연구를 하는 주요 대학으로는 Osaka대학, Tohoku 대학과 연구소에서는 AIST를 중심으로 MgO tunnel junction에 기반 한 스피닝 연구를 선도하고 있으며, Toshiba 등 기업이 Osaka대학 및 AIST와의 협력하에 연구 진행
  - **(유럽)** 프랑스의 Paris Sud 대학 및 CNRS의 A. Fert 교수와 C. Chappert 교수를 중심으로 스피닝 통신소자에 대해 세계 최초, 최고 수준의 연구를 선도
    - 프랑스 Grunoble에 위치한 CEA의 Spintec 연구그룹(Prof. B. Dieny 등)은 새로운 구조와 물질을 중심으로 한 스피닝발진기 실험 연구를 활발히 진행
    - 독일은 대학 및 연구소 등에서 실험 및 이론 연구가 활발히 진행되고 있으나, 아직까지 미국, 일본, 프랑스 선두그룹에 비해 연구가 뒤쳐진 실정
    - 스웨덴의 RIT에서 스피닝발진기 측정실험에 대한 연구결과를 연이어 발표하면서 새롭게 각광
    - 이태리, 스페인, 폴란드, 러시아, 우크라이나 등 여러 연구그룹에서 강점 분야인 이론 부분을 중심으로 스피닝발진기 연구에 기여

▶ 표2. 스피닝 통신소자 분야 해외 연구 동향

연구수행 기관	연구개발의 내용	연구개발성과의 활용현황
Cornell Univ. (미국)	나노 필러 구조에서 스피닝토크전달 현상 및 초고주파 발생 현상 최초로 관측	나노 필러구조에서 얻은 연구결과를 MgO 터널접합구조에 적용
NIST (미국)	나노 point contact 구조에서 초고주파 발진 특성 구현 두개의 통신 소자가 공조되는 현상 발견	스피닝 통신 소자 array를 이용한 출력 증대 기술 개발
SpinTech (프랑스)	수직자기 이방성층을 이용한 스피닝 통신 소자 개발	스피닝 통신 소자 실용화 기술 개발을 위한 MOSAIC 프로젝트 출범
IMEC, Univ.Paris-Sud, (프랑스, 벨기에)	스피닝토크의 각도 의존성 조절을 이용하여, 외부자기장을 가하지 않은 초고주파 통신 구조 발견	이론적 예측을 실현으로 구현 원천기술 개발 TUNAMOS라는 대형 project 운영했음
IBM (미국)	스피닝 통신의 기본이 되는 스피닝토크현상의 최초 발견자	MgO 터널접합을 이용한 TMR 현상 연구 및 이를 이용한 통신소자 개발에 활용
AIST (일본)	MgO 터널접합에서의 스피닝 발진 (0.43μW), 세계 최고 수준	세계최고수준의 통신 소자 발진 출력

※ 출처 스피닝융합연구단



- 💡 2005년 무선통신 시스템을 위한 초고주파 집적회로에 스핀토크 소자를 활용을 목적으로 유럽 연합에서는 TUNAMOS(TUnable NAno-Magnetic OScillators for integrated transceiver applications) 프로젝트를 진행
  - 현재의 이동통신, GPS 수신기, 무선네트워크 등에 사용되는 통신 소자의 크기, 성능 한계를 뛰어넘을 잠재성을 지닌 나노 스핀 통신소자를 제작하는 것이 프로젝트의 목적
  
- 💡 (특허) 해외의 선도 연구기관을 중심으로 각각 특정분야 원천 특허들을 확보하고 있는 상황
  - MOSAIC PROJECT는 통신소자의 가장 기본인 MTJ 구조 및 Vortex 구조에 강점을 나타내며, 그 외 경쟁 연구그룹이 관련 기술들인 Nanocontact, Phase shift, DWM, SHE(Spin Hall Effect), SHE+ Droplet + Nanocontact 등 다양한 분야의 특허 선점

## 국내동향

# 04

- 💡 스핀 통신 소자를 연구하기 위한 기반기술은 어느 정도 확립되어 있으나, 실제 초고주파 나노 스핀 가변 통신 소자와 관련된 연구는 시작 단계
  - 주로 차세대 메모리(MRAM) 개발에 편중되어 있으며, 스핀 RF 소자연구는 초기 단계
  - 주요 연구기관으로는 KIST가 스핀 통신 소자 제작 부문을 선도하고 있으며, 그 외 고려대와 포항공대 (이론분야), KBSI(한국기초과학지원연구원)와 서울대(측정분야)가 우수한 기술력을 보유
    - KIST는 세계 최고 수준에 근접한 100 nm 나노 스핀 통신소자 제작 공정기술을 보유
    - KBSI는 세계 수준에 근접한 초고주파 스핀 통신 소자 특성 평가 기술을 보유
    - 고려대는 스핀토크에 의한 국소 스핀 거동에 대한 마이크로마그네틱 분야에서 세계 최고 수준의 기술을 확보하고 있으며, KAIST, 서울대, 포항공대, 인하대, 연세대, 세종대, 삼성전자 등은 나노스핀 소자에 대한 기반기술 및 응용기술을 연구 중



## 시사점

- 💡 해외 스핀 RF 소자에 대한 연구는 주로 단위 소자의 성능 개선에 초점
  - 발진 출력증대, 좁은 신호선폭의 달성, 외부자기장 없는 초고주파 발진 등을 이루기 위한 수직자화층, vortex 자화 구조 등 다양한 자화 구조를 이용한 연구가 진행
  - 하지만 실제 상용 스핀 통신 소자로서의 응용 가능성에 대한 연구는 이제 시작되는 단계이며, RF 시스템에 대한 실질적인 요구조건을 만족시키기 위한 구체적인 연구는 이제 태동단계
- 💡 실제로 단위 스핀 통신소자를 응용한 변복조 개념 등을 포함한 시스템화에 대한 제작결과 발표는 거의 미비
- 💡 하지만 세계적으로 활발히 연구를 지속하고 있기에, 향후 10년 이내에 실제 CMOS 소자를 대체할 수 있는 스핀트로닉스 기반의 통신 상용 소자가 개발 가능할 것으로 예상



## 참고자료



1. J. C. Slonczewski, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 159, L1 (1996); J. C. Slonczewski, 'Currents and torques in metallic magnetic multilayers', Journal of Magnetism and Magnetic Materials 247, 324 (2002)
2. L. Berger, 'Emission of spin waves by a magnetic multilayer traversed by a current', Phys. Rev. B 54, 9353 (1996)
3. S. I. Kiselev, J. C. Sankey, I. N. Krivorotov et al., 'Microwave oscillations of a nanomagnet driven by a spin-polarized current', Nature 425, 380 (2003)
4. E. B. Myers, D. C. Ralph, J. A. Katine et al., 'Current-induced switching of domains in magnetic multilayer devices', Science 285, 867 (1999)