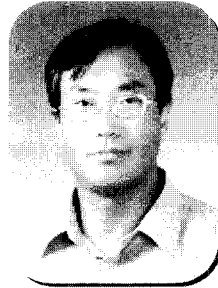


## 스핀소자 응용을 위한 자성반도체



· 윤순길 ·  
충남대  
재료공학과 교수

### 1. 서론

오늘날은 고도의 정보화 시대로서, 이는 컴퓨터의 대중화와 인터넷 및 이동통신 기술의 급속한 발전에 의해 주로 이루어졌다. 이러한 정보화 시대에는 효율적인 정보 처리 및 저장 기술이 요구된다. 최근에는 정보기기의 휴대성에 대한 요구가 증대됨에 따라, 정보기기의 초고속화, 소형화, 대용량화 및 저전력화가 크게 요구되고 있는 실정이다. 이와 같이 정보산업의 급속한 발달에 대응할 수 있는 특성을 가진 전자소자에 대한 필요성이 크게 증대되고 있는데, 머지않아 새로운 전자소자가 등장될 것으로 전망되고 있다. 이는 기존 반도체 기술의 한계와 최근 급속한 진전이 이루어진 나노구조 제조기술에 주로 기인된다. 그동안 장기간에 걸친 기술적 진보로 인하여 캐리어 전하의 제어에 기반을 둔 트랜지스터를 포함한 현재의 전자소자 기술은 거의 포화 상태이며 수년 후에는 한계에 이를 것으로 예상된다.

전자의 물리적 성질에는 전하뿐 아니라, 동시에 양자역학적 특성인 스핀이 있는 것은 주지의 사실이다. 또한 기존의 트랜지스터 및 DRAM 등과 같은 반도체를 기반으로 한 전자소자들은 반도체 내의 캐리어 전하만을 전기장을 사용하여 제어하는데 반해 스

핀전자소자에서는 전자가 가지는 전하와 스핀을 전 기장/자기장을 사용하여 각각 제어하는 것이다. 이러한 스핀분극된 전자의 제어를 통해 지금까지 달성하지 못하였던 새로운 개념의 스핀전자 소자를 창출하고자 연구가 미국과 유럽을 중심으로 활발히 이루어지고 있다.

스핀트로닉스란 전자가 가지고 있는 스핀 특성을 활용하는 일렉트로닉스를 일컫는 말이다. 전자의 전하특성을 이용하는 기존의 전자소자에 스핀에 의한 특성을 더하여 활용하거나, 스핀특성 자체를 이용함으로써 기존의 반도체에 비하여 비휘발성, 고속의 정보처리속도, 저전력 소모, 높은 집적도 등의 장점을 가지는 새로운 형태의 전자소자를 개발할 수 있을 것으로 기대하고 있다. 그림 1은 스핀트로닉스를 기반으로 하는 소자와 응용가능성을 나타내고 있다.

스핀분극된 전자의 이동은 페르미 준위에서 스핀수의 불균형이 존재하는 강자성 금속에서 일어난다. 즉, 강자성 금속은 스핀분극된 캐리어의 원천으로 반도체, 초전도체 또는 상자성 금속에 스핀을 주입하거나 터널 장벽을 통하여 터널링하게 하는 역할을 한다.

그림 2와 3은 스핀소자 동작의 기본 개념도를 보여 준다. 두 강자성 금속의 스핀이 서로 나란하면 저항

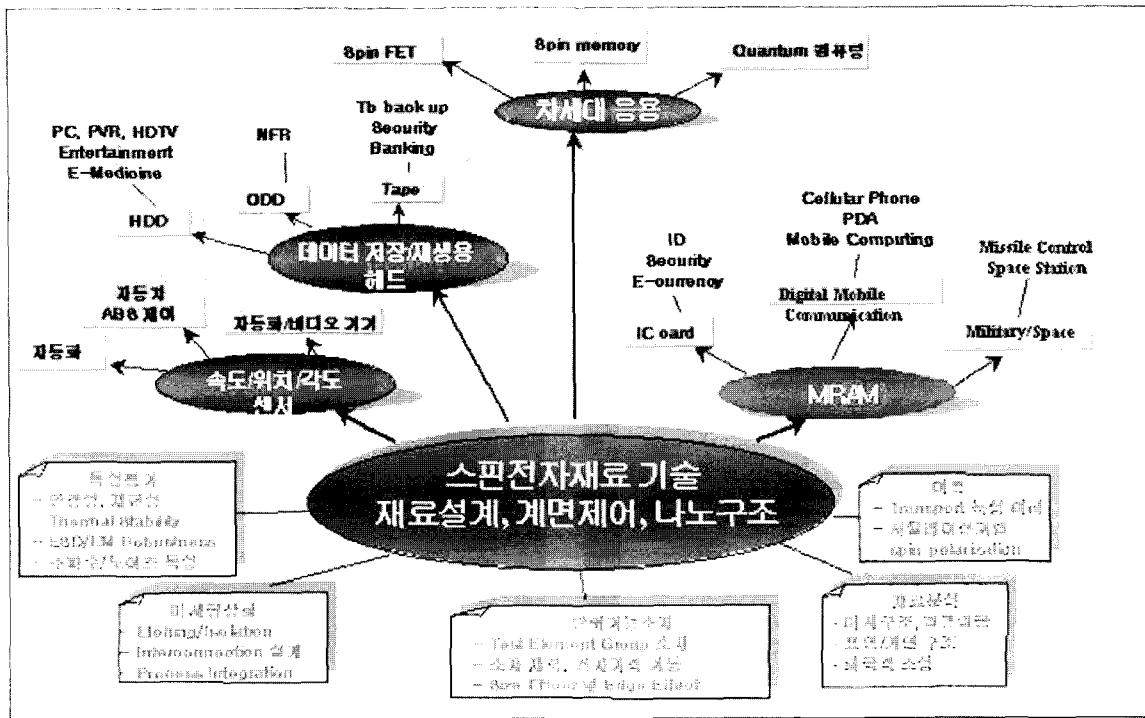


그림 1. 스핀트로닉스의 소자와 응용가능성.

[[http://spintronics.korea.ac.kr/research\\_map1.htm](http://spintronics.korea.ac.kr/research_map1.htm)]

이 작으며, 반면 스핀이 역 방향으로 나란하면 저항이 크다. 이와 같이 스핀의 배열에 따른 저항 차이를 이용한 자기저항 현상은 이미 컴퓨터 하드디스크의 재생헤드로서 상업화된 GMR 센서, 그리고 차세대 비휘발성 메모리 소자로 간주되고 있는 MRAM의 기본동작원리이다.

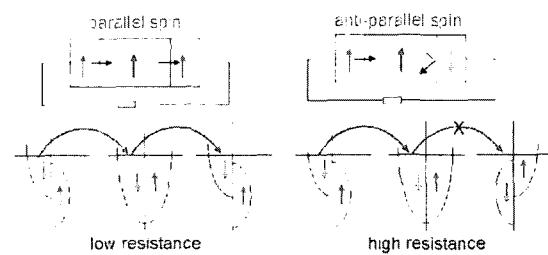


그림 2. 강자성금속/비자성금속/강자성금속의 세층으로 이루어진 다층 박막에서 두 강자성체의 상대적 자화방향에 따라 스핀분극된 전자의 흐름이 변화함을 보여주는 개념도.

## 2. 스핀트랜지스터 및 자성 반도체

### 2.1 스핀트랜지스터

스핀전자소자 연구 분야의 가장 큰 관심은 전하와 스핀의 자유도를 동시에 고려하여 메모리 및 논리용 트랜지스터를 구현하려는 데 있다.

스핀분극된 전자를 자성금속으로부터 상자성 금속에 주입하는 일(spín injection)에 관한 연구가 일부 진행되어 왔다[5]. 이와 같은 스핀주입은 스핀축적(spín accumulation)등과 같은 흥미로운 현상이 일으키는 것으로 보고 되었다.[5,6] Mark Johnson[5]은 두

개의 자성금속 사이에 Au 등의 상자성 금속을 끼워 넣는 구조로 한쪽의 자성금속을 스핀소스로 이용하여 상자성 금속에 스핀을 주입하고 다른 쪽의 자성금속으로 주입된 스핀을 검출하는 스핀 스위치 저장 소자로서의 양극 스핀 트랜지스터(bipolar spin transistor)를 제조하였다.

그림 4는 스핀 주입과 검출의 기본 개념도와 두 자성 금속의 스핀이 나란할 때의 상태밀도를 보여준다. 그림 4의 (a)는 스핀주입과 검출에 대한 기본 개념을 보여주는 개략도이며, 여기서 F1과 F2는 강자성체이고 P는 상자성체이다. F1을 통하여 주입된 전류가 P에 있는 패턴에 표시된 것과 같이 비평형 자화(주입된 스핀)를 유도하고 이것을 F2가 검출한다. (b)는 두 자성 금속 F1과 F2가 평행할 때의 상태 밀도  $N(E)$ 를 나타내는 개념도로서 소수(minority) 전자들은 상자성체의 페르미 준위에 있는 소수(minority) 상

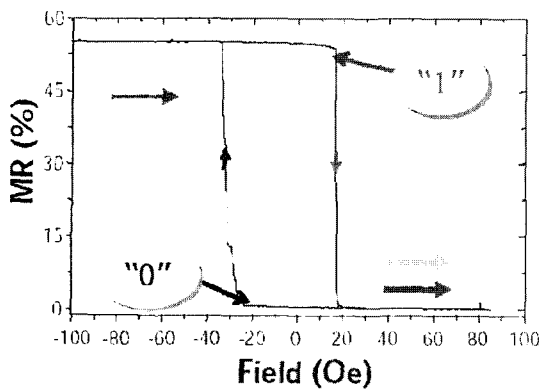


그림 3. 자기터널접합에서 자기장에 따른 자기저항 값의 변화.

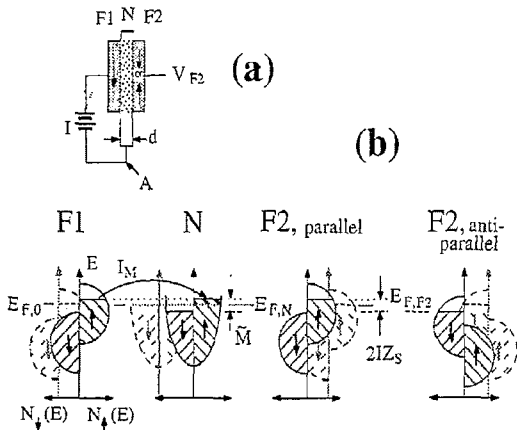


그림 4. (a) 스핀주입과 검출에 대한 기본 개념을 보여주는 개략도, (b) en 자성 금속 F1과 F2가 평행할 때의 상태밀도  $N(E)$ 를 나타내는 개념도.

태 중에서 빈곳으로 이동하였다가 두 번째 강자성체에 있는 소수(minority)상태 중에서 빈 곳으로 들어간다. 이와 같이 금속으로 구성된 스핀 트랜지스터는 스핀 주입현상을 실험적으로 증명하였지만 임피던스가 작아 메모리 소자로 사용하는데 한계를 가지고 있다[5].

1990년, Gary Prinz[7]가 반도체 위에 에피택셜 자성금속을 성장하는 것이 가능하다는 것을 확인함으로써 하이브리드 자성금속/반도체 구조의 스핀 트랜지스터의 제조가 가능할 것으로 기대되어 왔다. 특히, Datta와 Das[8]가 이차원 전자가스(two-dimensional electron gas, 2DEG)에 자성금속의 박막으로부터 스핀주입을 하는 구조의 스핀분극 전계효과 트랜지스터(spin-polarized field effect transistor, spin FET)제조에 관한 이론적 아이디어를 제안하였다. 그림 5는 Datta와 Das가 이론적 아이디어를 제안한 스핀분극 전계효과 트랜지스터이다. 2차원 전자가스(2DEG)에 자성금속으로부터 스핀분극된 캐리어를 주입하는 구조를 가진다. 이와 같은 트랜지스터에서 자성금속을 스핀주입과 스핀을 검출하는 전극으로 사용함으로써 좁은 밴드갭 반도체에서의 스핀-궤도 상호작용(spin orbit interaction)때문에 일어나는 스핀 세차운동(spi precession)을 전기장을 가하여 전류의 크기를 조절할 수 있다.

1999년에 이와 같은 트랜지스터의 개념을 바탕으로 영국 케임브리지 대학[9]과 미국 해군연구소[10]가 독립적으로 양자우물을 갖는 high electron mobility transistor(HEMT)구조에서 이차원 전자가스층에 스핀을 주입하여 외부자기장에 따른 저항의 변

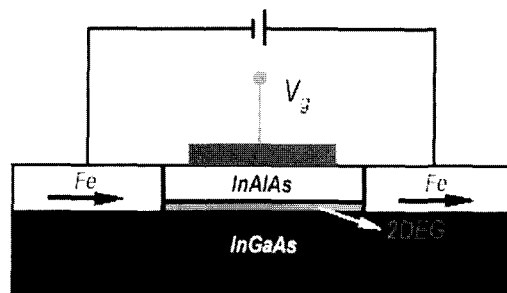


그림 5. Datta와 Das가 이론적 아이디어를 제안한 스핀분극 전계효과 트랜지스터.

화를 측정하여 스핀주입 현상을 관찰하였다. 하지만, 저항의 변화율이 1% 미만으로 미미하였을 뿐 아니라 극저온(300mK)에서만 관찰되었다. 현재 이와 같이 자성금속으로부터 반도체 내로의 스핀주입은 자성금속의 자구(magnetic domain)에 의한 스핀반전, 반도체내의 스핀-궤도 상호작용 및 자성금속/반도체 계면에서의 스핀산란과 특히 자성금속과 반도체의 conductivity mismatch 등의 문제를 수반하고 있으므로 정확히 관측되기 어려운 것으로 생각되고 있다. 이 문제의 해결책으로 첫째, 소자의 전극으로 사용되는 자성금속의 형상을 제어하고 크기를 나노사이즈로 제어함으로써 단자구(single domain) 거동을 하게하며, 둘째, 두 전극의 거리를 줄여 스핀-궤도 상호작용 효과를 줄이고, 셋째, 가능한 한 깨끗한 계면을 만드는 방법 등이 제안되고 있다.

최근 미국 해군연구소, 독일 함브르크와 한국과학기술연구원을 중심으로 자성금속/반도체의 계면에 절연층을 삽입하거나 이차원 전자가스층의 측면으로 스핀을 주입하는 등의 방법으로 상온 동작이 가능하고 20% 이상의 저항변화를 보이는 하이브리드 스핀분극 전계 효과 트랜지스터(spin FET)를 개발하는데 박차를 가하고 있다.

### 2.2 자성반도체

자성반도체는 기존의 반도체에 자기이온을 첨가시킴으로써 전자의 특성을 이용하는 반도체와 전자의 스핀에 의한 자성체의 특성을 겸한 재료이다.

Molecular Beam Epitaxy(MBE) 공정을 이용하여 GaAs에서 Ga의 일부를 천이금속인 Mn으로 치환시킴으로써 약 110° K의 온도에서 자성 반도체 특성이 보고된 이래 세계적으로 매우 활발한 연구가 진행되고 있다[19].

그림 6은 Mn과 같은 자기 이온의 함량에 따라 3가지 종류의 반도체의 스핀구조를 도식적으로 보여준다. (A)는 자성반도체로서 자성원소가 규칙적으로 배열되어 있다 (B)는 묽은 자성반도체로서 비자성 반도체와 자성원소로 이루어진 합금이다. (C)는 비자성 반도체로서 자기 이온을 함유하지 않고 있음을 나타내고 있다.

그림 7은 Mn이 GaAs에 약 7%까지 도핑되며, 성장

기판 온도에 따른  $Ga_{1-x}Mn_xAs$ 의 상태도와 자기이력 곡선 및 큐리온도( $T_c$ )를 보여준다. 최근에는 자성금속의 자기 터널접합소자(magnetic tunnel junction)와 유사한 GaMnAs/GaAlAs/GaMnAs : 자성반도체/비자성반도체/자성반도체에서 자기터널 저항효과가 나타남을 관찰하기도 하였다. 그림 7은 MBE 공정으로 (Ga,Mn)As 박막을 성장시킬 때, 기판온도나 망간의

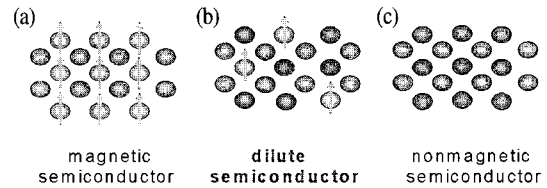


그림 6. 3가지 종류의 반도체.

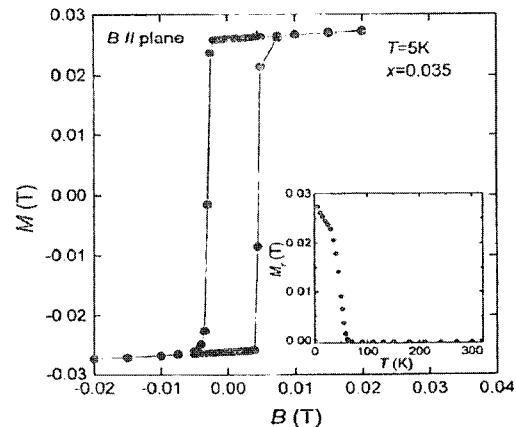
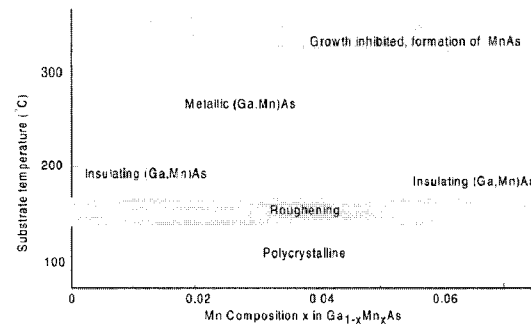


그림 7. MBE 공정으로 (Ga, Mn)As 박막을 성장시킬 때, 기판 온도나 망간의 함량 등 공정 조건에 따라 박막의 특성이 어떻게 변화하는지를 보여주는 도식적 상태도.

함량 등 공정 조건에 따라 박막의 특성이 어떻게 변화하는지를 보여주는 도식적 상태도이다. 망간의 함량이 한계 고용치를 넘을 수 있었던 이유는 저온에서 성장할 경우 비평형 상태로 박막이 성장할 수 있기 때문이다. 망간의 함량이 3.5%인(Ga,Mn)As 박막을 5°K에서 성장하였을 때의 자기이력곡선과 자성특성의 온도 의존성을 보여준다. 자성금속/반도체에서의 스핀주입이 conductivity mismatch에 의해 효율이 떨어지는 근본적인 문제를 해결하기 위하여 시도하고 있는 것이 자성반도체/반도체 구조의 소자이다.

그림 8은 GaAs 헤테로구조에 에피택시로 성장시킨 자성반도체에서의 전기적 스핀주입을 나타낸 것이다. (a)는 큐리온도(Tc) 이하의 온도에서는 p형 자성반도체(Ga,Mn)As가 자발적으로 자화되는데, 자발 자화된 모습을 그림에서 검정색 화살로서 도식적으로 묘사하였다. 순방향 바이어스를 인가하면 (Ga,Mn)As에서는 스핀분극된 전자들이, 그리고 n형 GaAs 기판에서는 분극되어 있지 않은 전자들이 두께 d를 가지는 사이층을 지나 (In,Ga)As 양자우물

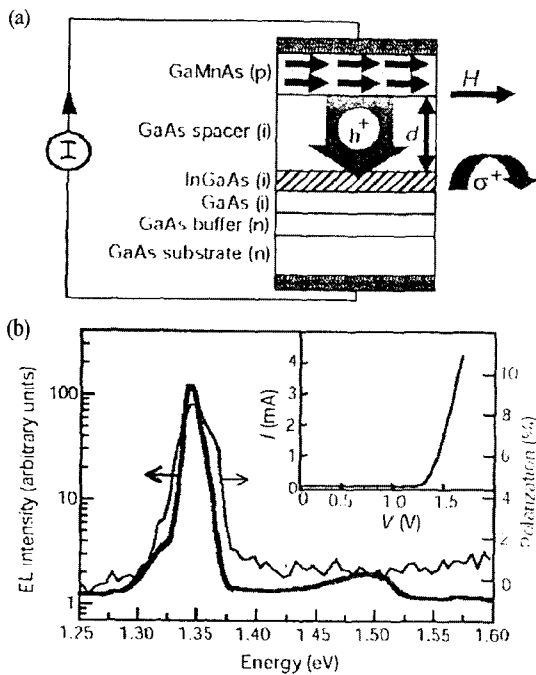


그림 8. GaAs 헤테로 구조에 에피택시로 성장시킨 자성 반도체에서의 전기적 스핀 주입.

(QW, 빗금친 부분)로 주입됨에 따라 스핀분극된 빛을 내게 된다. (b)는 실험온도 6°K, 외부인가 자장 1,000Oe에서 순방향 바이어스를 인가하였을 때, d가 20nm인 소자의 총 발광량과 그에 상응하는 분극도를 보여준다. 이 때의 전류 I는 1.43mA이다. 양자우물이 기저상태(E=1.34eV)일 때 소자의 분극도가 최대인 점에 주목하여 보자. 여기서 발광량은 세미로그 스케일로, 분극도는 선형적 스케일로 나타내었다. 20 nm의 사이층을 가지는 소자의 전류-전압 특성 곡선을 삽입그림에 나타내었다.

1999년 후반기에 독일 Wurzburg 대학의 Molenkamp 그룹[20]과 일본 동북대 Ohno 그룹과 캘리포니아 Santa Barbara 대학의 Awschalom 그룹[21]에서 자성반도체를 이용한 스핀소자의 결과를 각각 발표하였다. Molenkamp 그룹은 GaAs/AlGaAs 발광 다이오드(light-emitting diode, LED)에 스핀 얼라이너(spinner)로서 자성반도체인 Be,Mn,Zn, x,Se를 사용하여 4°K에서 90%의 스핀 주입효율을 달성하였다[20].

그림 9는 소자의 구조와 전자밴드 구조로서 (a)는 스핀정렬 발광 다이오드의 도식적 밴드 구조를 나타내고 있으며, (b)는 외부인가 자장의 방향과 발광하는 빛의 방향을 보여주는 소자의 측면도이다. 또한 Awschalom 등[21]은 GaAs 헤테로 구조에 자성반도체인 GaMnAs를 사용하여 액체질소 온도에서 자기장에 따라서 서로 다른 방향으로 스핀분극된 빛을 검출함으로써 스핀 발광 다이오드(spin LED)에 소자 응용 가능성을 증명하였다. 하지만 두 연구 모두 spin LED 동작온도가 상온이 아니라는 한계성을 가진다. 따라서 큐리온도가 상온 이상의 자성반도체를 찾는 연구가 이 분야에서 최대 현안이다.

큐리온도가 상온 이상인 자성반도체를 찾는 노력으로 wide-band gap물질(GaN, GaP, ZnO 등)에 천이금

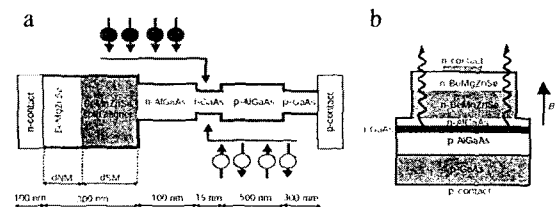


그림 9. 소자의 구조와 전자밴드 구조.

속(Mn, Cr 등)을 도핑한 경우, 상온이상의 큐리온도를 갖는다는 것이 예상되었으며, 실험결과도 보고되었다. 또한, 최근에 TiO<sub>2</sub>에 Co를 도핑한 경우, 400K 이상에 강자성특성 및 반도체 특성이 나타남이 보고되어 ZnO와 더불어 산화물 자성반도체로서 많은 연구가 이루어지고 있다. 그림 10, 표 1, 표 2에 연구결과를 나타내었다.[22, 23] 산화물 자성반도체의 경우, OPMBE, PLD, sol-gel, Sputtering, MOCVD 등 다양한 증착방법으로 연구가 진행되고 있다.

### 2.3 스핀기능소자 국내외 현황

미국 국방성에서 첨단 연구를 담당하고 있는 DARPA(the US Defense Advanced Research Projects Agency)는 나노 스핀소자 연구분야에 향후 수년간 1억 달러의 연구비를 투자할 예정이다. 또한 IBM과 Motorola 등 우수한 전자관련 기업들이 앞을 다투어 이와 같은 미래기술에 많은 투자를 하고 있다.

<표 3>은 나노 스핀기능소자 관련 국내외 연구동향을 나타낸 것으로, 이 분야는 세계적으로 매우 빠른 연구의 움직임을 보여준다. 국내에서 본 연구의 전단계로서 스핀을 주로 제어하는 GMR 및 TMR 연구를 수행하는 기관은 다수 있었지만 나노 스핀기능소자에 관한 연구는 최근부터 시작되었고, 아직 미미한 실정이다. 포항공대는 스핀 물성을 중심으로 연구를 하고 있으며, 동국대는 양자기능소자로서의 자성반도체를 주로 연구하고 있다. 한국과학기술원

구원은 스핀 트랜지스터와 스핀관련 원천기술을 위주로 최근 연구에 박차를 가하고 있다.

### 3. 스핀기능소자의 향후 전망

전하-스핀 제어 기술은 신개념의 기술로서의 오래전부터 그 중요성이 인식되었으나 최근에 와서야 활발하게 연구가 시작된 분야이다. 지금까지의 연구개발 현황을 살펴보면 기술 진전의 속도가 예상보다 매우 빠르게 진행되고 있다. 1988년에 처음 개발된 거대 자기 저항효과가 10년이 되기도 전에 상업화가 달성된 것은 좋은 예이다.

이는 이 분야에서 그 동안 축적된 기술 수준이 높은 것도 하나의 원인이 되겠지만, 매우 큰 기술적 파급효과로 인하여 집중적인 연구 개발 투자가 이루어졌기 때문으로 사료된다. 기존의 스핀 및 광, 전하의 제어기술의 한계를 넘어 스핀과 광, 전하를 동시에 제어하는 것은 전자의 응용 범위를 양자역학적인 영역으로 확대하는 것을 의미하며, 이는 물리학의 또 다른 세계에 도전하는 것을 의미한다.

나노구조 다층박막의 제조기술 확보 및 스핀분극된 전자의 이동현상에 대한 기술확보는 과거 이론적으로 예측된 전자의 양자역학적인 성질을 실험적으로 증명으로써 새로운 물리적 현상을 이해할 수 있을 것으로 기대된다. 특히, 기술적 측면에서 보면 나노 스핀구조의 현상에 대한 정확한 해석과 소자기술의 확립은 향후 새로운 개념의 정보산업용 나노 스핀소자의 창출에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

공급적으로 나노 스핀전자 소자기술은 차세대 정보 통신 산업에 직결되는 신기능의 소자들 즉, 스핀 전계효과 트랜지스터(spín FET), 나노 홀소자(Hall device), 나노 스핀 발광 다이오드(spín LED) 및 스핀 분극 공명터널링소자(spín RTD) 등으로 응용될 수 있을 것이다.

이와 같이 기술적 측면에서 뿐 아니라 경제·산업적 측면에서도 큰 파급효과가 기대된다. 예컨대, MRAM(magnetic random access memory)는 5년 이내에 RAM 시장을 점진적으로 대체하게 될 전망이며, 이외에도 스핀전자소자는 PDA(Personal Digital

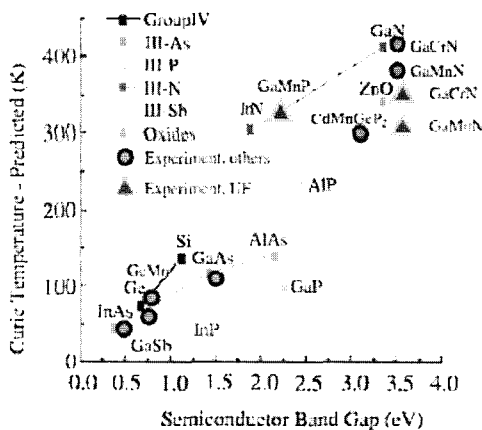


그림 10. Band gap에 따른 큐리온도[22].

표 1. 상온에서 자성특성을 나타내는 반도체와 산화물[22].

| Material                 | Bandgap (eV) | Comments  | Ordering temperature (K) |
|--------------------------|--------------|---|--------------------------|
| $Cd_{1-x}Mn_xGeP_2$      | 1.72         | Solid-phase reaction of evaporated Mn                               | >300                     |
| (Ga, Mn)N                | 3.4          | Mn incorporated by diffusion  | 228–370                  |
| (Ga, Mn)N                | 3.4          | Mn incorporated during MBE: n-type                                  | >300                     |
| (Ga, Mn)N                | 3.4          | Mn incorporated during MBE  | 940 <sup>a</sup>         |
| (Ga, Cr)N                | 3.4          | Cr incorporated during MBE  | >400                     |
| (Ga, Cr)N                | 3.4          | Bulk growth   | ~280                     |
| (Ga, Gd)N                | 3.4          | Gd incorporated during MBE  | >400                     |
| (Al, Cr)N                | 6.2          | Reactive co-sputtering  | >340                     |
| (ZnO):Co                 | 3.1–3.6      | Co incorporated during PLD: ~15% Co                                 | >300                     |
| (TiO <sub>2</sub> ):Co   | 3.1          | Anatase; ~7% Co; PLD or O <sub>2</sub> MBE                          | >380                     |
| (Ga, Mn)P:C              | 2.2          | Mn incorporated by implant or MBE: $p \sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ | >330                     |
| $(Zn_{1-x}Mn_x)GeP_2$    | 1.83–2.8     | Sealed ampule growth; insulating: 5.6% Mn                           | 312                      |
| (Zn, Mn)GeP <sub>2</sub> | <2.8         | Mn incorporated by diffusion  | 350                      |
| ZnSnAs <sub>2</sub>      | 0.65         | bulk growth   | 329                      |
| ZnSiGeN <sub>2</sub>     | 3.52         | Mn-implanted epi  | ~300                     |

<sup>a</sup> Extrapolated from measurements up to ~750 K.

표 2. 최근 발표된 산화물계 DMS 목록[23].

| Compound                            | TM content | Substrate                               | Fabrication method   | Growth temperature (°C) | Oxygen pressure (Torr)                   | Post-annealing                           | T <sub>c</sub> (K) | Notes                               |
|-------------------------------------|------------|---|----------------------|-------------------------|--|--|--------------------|-------------------------------------|
| ZnO:Mn                              | <0.35      | c-Sapphire                              | PLD                  | 600                     | $5 \times 10^{-5}$                       |  | N/A                |                                     |
| ZnO:Mn                              | 0.36       | c-Sapphire                              | PLD                  | 600                     | $5 \times 10^{-5}$                       |  | N/A                | Spin-glass                          |
| Zn <sub>1-x</sub> TM <sub>x</sub> O |            | c-Sapphire                              | PLD                  | 500–600                 | $1 \times 10^{-9}$ to $10^{-6}$          |  | N/A                |                                     |
| ZnO:Co                              | 0.02–0.5   | c-Sapphire                              | PLD                  | 300–700                 | $1 \times 10^{-6}$ to $10^{-1}$          |  | N/A                | Spin-glass                          |
| ZnO:Mn                              | 0.01–0.36  | c-Sapphire                              | PLD                  | 610                     | $5 \times 10^{-5}$                       |  |                    | Paramagnetic                        |
| ZnO:(Co, Mn, Cr, or Ni)             | 0.05–0.25  | r-Sapphire                              | PLD                  | 350–600                 | $2-4 \times 10^{-5}$                     |  | 280–300            | 2 μ <sub>B</sub> /Co                |
| ZnO:Ni                              | 0.01–0.25  | c-Sapphire                              | PLD                  | 300–700                 | $1 \times 10^{-5}$                       |  |                    | Superpara- or ferro-magnetic        |
| ZnO:V                               | 0.05–0.15  | r-Sapphire                              | PLD                  | 300                     | $10^{-3}$ to $10^{-5}$                   |  | >350               | 0.5 μ <sub>B</sub> /V               |
| ZnO:(Co, Fe)                        | <0.15      | SiO <sub>2</sub> /Si                    | Magnetron sputtering | 600                     | $2 \times 10^{-1}$                       | 600 C, 10 min, $1.0 \times 10^{-5}$ Torr | >300               | 12–15 emu/cm <sup>3</sup>           |
| ZnO:Co                              | 0–0.25     | c-Sapphire                              | Sol-gel              | <350                    |  | 700 C, 1 min                             | >350               | 0.56 μ <sub>B</sub> /Co             |
| ZnO:Mn                              | 0–0.3      | c-Sapphire                              | PLD                  |                         |  |  | >30–45             | 0.15–0.17 μ <sub>B</sub> /Mn        |
| ZnO:(Fe, Cu)                        | 0–0.1      |   | Solid state reaction | 897                     |  |  | 550                | 0.75 μ <sub>B</sub> /Fe             |
| ZnO:(Co, Al)                        | 0.04–0.12  | Glass                                   | RF sputtering        |                         | $1 \times 10^{-2}$ in Ar                 |  | >350               | 0.21 μ <sub>B</sub> /Co             |
| ZnO:(Mn, Sn)                        | 0–0.3      |   | Implantation         |                         |  | 5 min, 700 C                             | 250                |                                     |
| Anatase TiO <sub>2</sub> :Co        | <0.08      | LaAlO <sub>3</sub> , SrTiO <sub>3</sub> | PLD                  | 677–727                 | $1 \times 10^{-6}$ to $10^{-5}$          |  | >400               | 0.32 μ <sub>B</sub> /Co             |
| Anatase TiO <sub>2</sub> :Co        | 0.01–0.1   | SrTiO <sub>3</sub>                      | OPA-MBE              | 550–750                 | $2 \times 10^{-5}$                       |  | >300               | 1.26 μ <sub>B</sub> /Co             |
| Anatase TiO <sub>2</sub> :Co        | 0.01–0.1   | Si                                      | Sputtering           | 250–450                 | $5 \times 10^{-5}$ to $3 \times 10^{-4}$ |  | >400               | 0.94 μ <sub>B</sub> /Co             |
| Anatase TiO <sub>2</sub> :Co        | 0.03–0.12  | SiO <sub>2</sub> /Si                    | MOCVD                | 400–500                 | 1  | 700 C, 1 h, $1.0 \times 10^{-9}$ Torr    | >RT                | 20–40 emu/cm <sup>3</sup>           |
| Anatase TiO <sub>2</sub> :Co        | 0–0.15     | LaAlO <sub>3</sub> , SrTiO <sub>3</sub> | PLD                  | 700                     | $1 \times 10^{-5}$ to $10^{-4}$          |  | 650–700            | 1.4 μ <sub>B</sub> /Co              |
| Anatase TiO <sub>2</sub> :Co        | 0.04       | SrTiO <sub>3</sub>                      | PLD                  | 600                     | $1 \times 10^{-7}$ to $10^{-4}$          |  |                    | Co metal 1.7–2.3 μ <sub>B</sub> /Co |
| Anatase TiO <sub>2</sub> :Co        | 0.01–0.07  | LaAlO <sub>3</sub> , SrTiO <sub>3</sub> | PLD                  | 750                     | $1 \times 10^{-1}$                       |  |                    | Co cluster 1.7 μ <sub>B</sub> /Co   |
| Anatase TiO <sub>2</sub> :Co        | 0.04–0.1   | LaAlO <sub>3</sub>                      | PLD                  | 650                     | $10^{-6}$ to $10^{-5}$                   | 400 C, 20 min, $10^{-6}$ Torr            |                    | Co cluster 1.55 μ <sub>B</sub> /Co  |
| Rutile TiO <sub>2</sub> :Co         | 0–0.05     | r-Sapphire                              | PLD                  | 700                     | $1 \times 10^{-6}$                       |  | >400               | 1 μ <sub>B</sub> /Co                |
| SnO <sub>2</sub> :(Mn, Sb)          | 0.05–0.34  | r-Sapphire                              | PLD                  | 300–600                 | $1 \times 10^{-2}$                       |  | N/A                | Paramagnetic                        |

표 3. 나노 스핀기능소자 관련 국내외 연구동향.

| 기술분야              |                        | 국외 연구동향   | 국내 연구동향                    |
|-------------------|------------------------|---|----------------------------|
| 스핀제어기능 소자기술       | 자성체/반도체 하이브리드 기술       | NRL, Hamburg U., Caltech, Cambridge U., NTT, Twente U., IBM                               | KIST, 고려대, 연세대, 명지대        |
|                   | Hall effect 소자 기술      | NRL, Caltech  |                            |
|                   | Ⅲ-Ⅴ족 화합물 DMS 기술        | 동북대, 동경공대, 동경대, 오사카대, Minnesota U., USCB, Poland U., JRCAT, PSI, Twente U., IBM, NRL, NTT | KIST, 동국대, 서울대, 고려대, 울산대   |
|                   | Ⅱ-Ⅵ족 화합물 DMS 기술        | U. ND, Poland U., NRL, 동북대, 오사카대, U. Wurzburg   | KIST, 충남대                  |
|                   | Ⅳ-Ⅵ족 및 Ⅳ-Ⅵ족 화합물 DMS 기술 | UC. Davis, 야마구치대, 모스크바대, Johannes Kepler대   |                            |
| 신개념 나노스핀기능 소자기반기술 | 능동 스핀반전 소자 기술          | ETH Zurich, Cornell대, 남파리대, IBM, NIST Max Planck  | KRISS                      |
|                   | 터널형 스핀 트랜지스터 기술        | Cambridge U., IMAC, 동북대   | KIST, 고려대                  |
|                   | 전산모사 기술                | Ames. lab., UC Berkeley, Caltech, Princeton대, Illinois대, NRIM, Max Planck                 | KIST, 서울대, 시립대, KAIST, 부산대 |
| 스핀-포토닉스 기능 소자 기술  | 자기-광소자 기술              | UCSB, 동경대, 동경공대   |                            |
|                   | 스핀변환 SAW 기술            | Bell lab.   |                            |

Assistnat), Digital camera 등 차세대 휴대용 정보기기와 Digital TV, 멀티미디어 서버 등 가전용 AV 시스템을 비롯하여 의료영상 등 각종 산업용 정보시스템에 이르기까지 모든 정보 관련산업 기기의 정보처리 및 저장장치로 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

이러한 나노 스핀소자가 이용될 수 있는 분야 중의 하나가 양자컴퓨터(quantum computer)이며 이 분야의 발달은 현재 컴퓨터의 성능을 획기적으로 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 나노 스핀소자기술은 정보처리 및 정보저장 이외에도 광통신 등 정보산업의 각종 분야에 응용될 수 있을 것으로 기대를 모으고 있다.

또한, 신개념의 스핀기능소자는 현재 국내 주력 산업인 반도체와 더불어 산업을 주도할 수 있으며 특히 세계최고의 수준인 국내 반도체 기술과 연계될 경우 시너지 효과를 나타낼 수 있어 정보산업 전반에 걸쳐 지대한 기술적 경제적 파급효과를 발생시킬 수 있을 것으로 기대되고 있다.

### 참고 문헌

[1] N. Mott, Proc. Roy. Soc, 153, 699, 1936.

[2] M. Baibich et al., Phys. Rev. Lett. 61, 2472, 1988.  
 [3] M. Jullire, Phys. Lett. 54 A, 225, 1975.  
 [4] Moodera et al., Phys. Rev. Lett. 74, 3273, 1995.  
 [5] M. Johnson, Science 260, 320, 1993; Phys Rev. Lett. 70, 2142, 1993; J. Mag. Mag. Mater. 140-144, 21, 1995.  
 [6] A. Fert and S.F. Lee, J. Mag. Mag. Mater. 165, 115, 1997.  
 [7] G. A. Prinz, Science 250, 1092, 1990.  
 [8] S. Datta and B. Das, Appl. Phys. Lett. 56, 665, 1990  
 [9] W. Y. Lee, S. Gadelis, B. C. Choi, C. G. Smith, E. H. Linfield, C. H. W. Barnes, and J. A. C. Bland, J. Appl. Phys. 85, 6682, 1999.  
 [10] P. R. Hammar, B. R. Bennett, M. J. Yang, and M. Johnson, Phys. Rev. Lett. 83, 203, 1999.  
 [11] Atalla and Kahng, IEEE Trans. Electron Dev., 9, 507, 1962.  
 [12] D. J. Monsma, R. Vlutters and J. C. Lodder, Science 281, 407, 1998.  
 [13] M. Johnson et al., Appl. Phys. Lett. 71, 974, 1997  
 [14] K. Tsukagoshi et al., Nature 401, 572, 1999.  
 [15] R. P. Cowburn and M. E. Welland, Science 287,



- 446, 2000.
- [16] E. B. Myers, D. C. Ralph, J. A. Katine, R. N. Loule, R. A. Buhrman, Science 285, 867, 1999.
- [17] K. Bussmann et al., Appl. Phys. Lett. 78., 2001.
- [18] J. G. Zhu, Y. Zheng and Gary A. Prinz, J. Appl. Phys. 87, 6668, 2000.
- [19] H. Ohno, Science 281, 951, 1998.
- [20] R. Fiederling, M. Keim, G. Reuscher, W. Ossau, G. Schmidt, A. Waag & L. W. Molenkamp, Nature 402, 787, 1999.
- [21] Y. Ohno, D. K. Young, B. Beschotoen, F. Matsukura, H. Ohno and D. D. Awschalom, Nature 402, 790, 1999.
- [22] S.J. Pearton, C.R. Abernathy, D.P. Norton, A.F. Hebard, Y.D. Park, L.A. Boatner, J.D. Budai, Materials Science and Engineering R 40, 137, 2003.
- [23] T. Fukumura, Y. Yamada, H. Toyosaki, T. Hasegawa, H. Koinuma, M. Kawasaki, Applied Surface Science, published, 2003.

· 저 · 자 · 약 · 력 · . . . . .

**성명 : 윤순길**

❖ 학력

- 1982년 연세대 금속공학과 공학사
- 1985년 KAIST 재료공학과 공학석사
- 1988년 KAIST 재료공학과 공학박사

❖ 경력

- 1985년-1989년 금성전자 선임연구원
- 1992년-1993년 뉴저지주립대학 Visiting Scientist
- 1999년-2000년 미국 노스캐롤리나 주립대학 Visiting Scientist
- 1994년-현재 충남대 재료공학과 교수

