DMS 물질 연구 현황과 응용

DOI: 10.3938/PhiT.19.036

조용찬·정세영

Research Trend and Applications of Dilute Magnetic Semiconductors

Yong-Chan CHO and Se-Young JEONG

Magnetic semiconductors are semiconductor materials exhibiting ferromagnetic characteristics as well as semiconducting properties simultaneously. While conventional electronic devices are based on the only control of charge carriers, the magnetic semiconductors can provide the new paradigm devices based on the quantum spin state of carrier as well as charge carriers. Among these materials, dilute magnetic semiconductors (DMSs) have been extensively investigated. These DMS materials are based on conventional semiconductor materials doped with transition metal ions. Since the discovery of ferromagnetic semiconductor such as GaMnAs and InMnAs, considerable research efforts have been directly toward the development of spintronic devices. Many have developed various sample fabrication methods and new techniques, but the ferromagnetic transition temperature of these promising DMS materials has been still far below room temperature. With the theoretical prediction of room temperature DMS in transition metal doped wide band gap semiconductors including GaN and ZnO, the realization of room temperature ferromagnetism in semiconductor has been one of dream research in condensed matter physics.

저자약력

조용찬 박사는 부산대학교 이학박사(2000)로서 미국 스탠포드대학교(Stanford University)와 스탠포드 가속기센터(SLAC)의 연구원을 거쳐 현재 부산대학교 나노과학기술대학에 연구교수로 재직 중이며 스핀트로닉스와 자성반도체 개발연구를 수행하고 있다. (yongchanjo@gmail.com)

정세영 교수는 독일 쾰른대학교(Köln University) 이학박사(1990)로서 1991년부터 부산대학교 물리학과 교수(1991-2005), 부산대학교 나노과학기술대학 교(2005-2009)를 거쳐 현재 부산대학교 World Class University 인지광메카트로닉스 공학과에 재직 중이다. (syjeong@pusan.ac.kr)

However, in spite of the extensive investigation over 10 years, the debates about the origin of ferromagnetism still go on. Here, we briefly summarize the studies about DMS materials and their applications. In addition to this, we describe how the DMS materials and research trends will evolve beyond the present obstacles.

서론: 자성반도체와 스핀트로닉스

현재 전 세계적으로 화두가 되고 있는 스핀트로닉스(spintronics)는 전자의 전하는 물론 전자소자 기술에서 무시되었던 양자역학적인 성질인 스핀(spin)을 함께 사용하여 새로운 스핀전자소자를 개발하는 이른바 스핀특성 기반의 일렉트로닉스(spin electronics)라고 할 수 있다. 지난 50여 년 동안의 실리콘 중심의 전자소자 기술은 소위 무어(Moore)의 법칙으로 잘 알려진 바와 같이, 단위면적당 이식되는 트랜지스터의 개수를 늘임으로써 경이적인 발전을 거듭하였다. 하지만 이러한 집적화가 계속되면서 집적화된 트랜지스터들에서 발생하는 열과 원하지 않는 양자 효과(quantum effects)로 인한 기술적 한계에 직면하게 되었다. 이러한 문제에 대한 기술적 대안으로 지금까지 반도체 소자개발에서 고려되지 않던 스핀 자유도를 반도체에서 이용하고자 하는 패러다임이 발전하였고 새로운 스핀트로닉스 소자 개발로 이어지고 있다. 실제 스핀트로닉스 기술은 여러 분야에 걸쳐 다양하게 연구가 진행되지만, 스핀을 어떻게 반도체에 주입하고 수송하고 조작하며 이를 감지할 것인가 하는 공통적인 목표를 가지고 있다. 이 중에서 반도체에 스핀을 주입하기 위한 목적으로 스핀 편광된 전류의 소스로서 자성반도체(dilute magnetic semiconductor: DMS)가 연구되기 시작하였다. DMS에서는 반도체 물질에 전이금속을 반도체의 양이온 자리에 랜덤하게 치환하여, 전극을 통해 주입된 스핀 편광되지 않은 캐리어들을 스핀 편광시켜 이를 반도체에 주입하는 역할을 한다.(Fig. 1)

특히, DMS에는 현재의 반도체 공정 기술의 적용이 매우 용이하기 때문에 새로운 소자 개발이 비교적 쉽고 금속 기반의 스핀트로닉 소자보다 산업적 파급효과가 매우 클 것으로 평가받고 있다. 이 글에서는 그동안의 물질 연구의 발전과 문

Fig. 1. The dilute magnetic semiconductor (Ga, Mn)As. Mn^{2+} ions sit on trivalent Ga sites (triangles), and therefore act as electron acceptors (providing holes) as well as producing a magnetic moment (arrows). The holes are thought to mediate ferromagnetic coupling between the magnetic Mn^{2+} ions.^[1,2]

제점에 대해 간략히 요약해보고 향후 연구진행방향과 응용에 대해 기술하고자 한다.

자성체와 반도체의 융합은 가능한가?

자기적 물질(magnetic materials)은 오래전부터 인류의 역사와 함께 활용되어 왔으며 현재 가장 많이 쓰이고 있는 물질 중 하나일 것이다. 가장 쉽고 흔한 예로서 나침반의 바늘에서부터 시작하여 전기에너지를 역학적인 힘으로 전환하는 전기 모터, 컴퓨터의 하드 드라이브를 비롯해 음향 스피커, 신용카드의 자기테이프까지 그 활용범위는 매우 넓고 광범위하다. 이러한 자성체의 가장 기본이 되는 물성은 전자의 스핀이다. 자성 이온들은 서로 짝짓지 않은 전자의 스핀들로 인해 자기적 특성이 나타난다. 전자는 고유한 각운동량을 가지고 외부 자기장이 주어질 때 자기장에 평행한 up 상태와 반대방향인 down 상태를 가지는 것이 밝혀졌다.(Fig. 2) 전자의 스핀을 이용한 물질개발은 이미 매우 산업적으로 크게 발전했다. 1세대 스핀트로닉스라고 할 수 있는 금속 기반의 스핀소자는 컴퓨터의 하드디스크를 포함하여 실로 널리 활용되고 있다. 그리고 1998년 두 개의 강자성 층과 그 사이의 비자성 금속 층에서 발견된 GMR 효과는 2007년 노벨물리학상으로 이어질 정도로 학문적으로도 그리고 산업적으로도 중요한 특성이다.

이에 비교해서 반도체는 트랜지스터의 개발 이후 현대 문명의 발전의 근간이 되는 일렉트로닉스 발전을 가능하게 했다. 전자의 전하를 이용하는 반도체는 마이크로프로세서, 메모리 디바이스, 트랜지스터, 다이오드, 증폭기와 휴대전화기 등에서 모두 열거하지 못할 정도로 많은 곳에서 사용되고 있다. 또한 18개월마다 트랜지스터의 성능이 두 배로 발전한다는 소위 Moore의 법칙 등에서 알 수 있듯이 트랜지스터의 크기를 줄여서 더욱더 집적화하는 제작기술을 통해서 반도체

Fig. 2. The visualization of electron spins: Two possibilities for electron spin are shown with their coexisting magnetic fields. The magnetic fields of two electrons with opposite spins cancel one another; there is no net magnetic field for the pair.

는 급격히 발전하였다. 하지만 반도체에서 캐리어가 가지는 스핀의 업·다운 상태는 고려되지 않고 단순히 전하의 종류와 양에 따라 소자가 제어된다.

강자성물질과 반도체 물질이 융합된 물질연구는 응집물질 연구에서 오래된 연구주제 중에 하나이지만 두 물질 간에 결정 구조의 차이와 전기적 밴드 구조의 차이 등으로 인해 스핀 주입 효율이 적어 많은 난항을 겪었다. 최근 들어 소재 제작 기술과 장비의 발전에 힘입어 스핀 주입효율을 증가시키기 위하여 구조적·전기적 부정합(mismatch)을 해결하려는 연구가 진행되고 있다. 반도체에 기반한 스핀트로닉스의 구현은 금속 기반의 스핀트로닉스에 비해 반도체 소자로 바로 이식되기 쉽고 반도체의 뛰어난 광학적, 전기적 특성을 동시에 이용할 수 있는 많은 이점이 있다.

자성반도체는 반도체에 소량의 자성 이온이 반도체 양이온 자리를 치환하여 반도체 캐리어들이 자성 원자와의 상호작용에 의해 어느 한 상태의 스핀으로 편광되는 물질이다. 스핀편광 물질은 대부분의 전자의 스핀이 어느 한 방향으로 정렬되어 있는 물질이다. 자성반도체는 반도체의 고유한 에너지 밴드구조를 유지하며 자성 이온과 캐리어의 상호작용에 의해 캐리어가 스핀 편광되어야 한다. 그러므로 일반적인 반도체와는 달리 거시적으로 강자성적 특성을 나타내게 되고 자기광학적 전기광학적 특성에서 스핀의 효과가 나타난다. 더 나아가서 소자에 공급되는 전기장 혹은 광을 통해서 물질의 자기적 특성 즉 스핀 정렬과 수송을 조절하는 연구 결과가 보고되기 시작하고 있다. (Fig. 3, Fig. 4)

REFERENCES

- [1] T. Dietl, Nat. Mat. **2**, 646 (2003).
- [2] S. J. Pearton, C. R. Abernathy, D. P. Norton, A. F. Hebard, Y. D. Park, L. A. Boatner and J. D. Budai, Mater. Sci. Eng. **R40**, 137 (2003).

Fig. 3. Shown are the cross-sections of a metal-insulator-semiconductor structure under gate biases V_G . This controls the hole concentration in the magnetic semiconductor channel (filled circles). Negative V_G increases hole concentration, resulting in enhancement of the ferromagnetic interaction among magnetic Mn ions, whereas positive V_G has an opposite effect. The arrow schematically shows the magnitude of the Mn magnetization. The InAs/(Al,Ga)Sb/AlSb structure under the (In,Mn)As layer serves as a buffer relaxing the lattice mismatch between the structure and the GaAs substrate to produce a smooth surface on which the magnetic layer is grown.^[3]

Fig. 4. (a) Magnetization vector manipulation by electric field: The device comprises a metal gate (Cr/Au), an insulator layer (ZrO_2), and a ferromagnetic semiconductor (Ga,Mn)As layer. The gate voltage is applied between the metal gate and the (Ga,Mn)As layer and induces the electric field (E), which results in the change of the hole concentration, p , in the ferromagnetic semiconductor. The orientation of the magnetization (M) varies as a consequence of anisotropy modulation by p . (b) The Hall-bar-shaped device. The Hall bar is used to measure longitudinal and transverse resistance (respectively R_{xx} and R_{xy}).^[4]

자성반도체는 어떻게 활용되나?

기존의 반도체 일렉트로닉스 소자에서는 전하의 흐름을 조절함으로써 소자가 작동하지만 스핀트로닉스 소자에서는 소위 스핀전류(spin-current) 전자의 스핀 흐름에 의해 조절되며 훨씬 고성능, 고효율의 소자를 제작할 수 있다. 전자소자 내에서 전자의 스핀은 하나의 상태에서 다른 상태로 소위 스핀 업과 스핀다운 상태 사이에 전환하는 속도는 수 펨토초 정도에 불과하기 때문에, 전하가 회로를 따라 움직이는 것보다 훨씬 빠르다. 이 때문에 기존의 스핀트로닉스 소자는 기존의 일렉트로닉스 소자보다 빠른 구동을 가능하게 할 뿐만 아니라 전류의 흐름과 물질 내에 저항으로 발생하는 발열 역시 훨씬 적을 것으로 기대된다. 반도체 소자의 핵심이 트랜지스터인

Fig. 5. Electrical spin injection in an epitaxially grown ferromagnetic semiconductor heterostructure, based on GaAs. Spontaneous magnetization develops below T_C in the ferromagnetic p-type semiconductor (Ga,Mn)As, depicted by the black arrows in the green layer. Under forward bias, spin-polarized holes from (Ga,Mn)As and unpolarized electrons from the n-type GaAs substrate are injected into the (In,Ga)As quantum well (QW, hatched region), through a spacer layer producing polarized EL.^[5]

것과 마찬가지로 스핀트로닉스 소자의 개발에서 많은 연구자들의 궁극적 연구의 목표 중에 하나는 논리소자의 기본이 되는 스핀-트랜지스터의 개발이다. 또한 스핀트로닉스는 단지 스핀의 자기적인 특성의 이용에만 그치지 않고 스핀의 특성으로 스핀에 의한 좌편광/우편광된 빛을 조절하는 소자를 제작할 수 있으며 암호화된(encrypted) 통신에 사용될 수 있고 이는 양자컴퓨터의 정보처리의 기본단위인 양자 비트(quantum bit)로 사용될 수도 있다.(Fig. 5) 이러한 연구는 반도체에서의 스핀의 활용이 얼마나 중요한 발전인가를 보여주고 있다.

현재 스핀트로닉스의 주제는 반도체에 어떻게 높은 효율로 스핀을 주입하고 스핀을 어떻게 수송하고 조작하며 또한 어떻게 스핀을 감지하는가이다. 특히, 스핀을 주입하고 감지하는 연구는 현재 스핀트로닉스 분야에서 주된 관심사로 떠오르고 있다.

DMS 연구는 어떻게 시작하였나?

1960년대 말 과학자들은 반도체에서의 자성의 구현에 대해 기술적으로 연구하기 시작하였다. 작은 양의 자성을 일으키는 불순물을 비자성 반도체 물질에 도핑하는데 성공하게 되고

REFERENCES

- [3] H. Ohno, D. Chiba, F. Matsukura, T. Omiya, T. Dietl, Y. Ohno and K. Ohtani, *Nature* **408**, 944 (2000).
- [4] D. Chiba, M. Sawicki, Y. Nishitani, Y. Nakatani, F. Matsukura and H. Ohno, *Nature* **455**, 515 (2008).
- [5] Y. Ohno, D. K. Young, B. Beschoten, F. Matsukura, H. Ohno and D. D. Awschalom, *Nature* **402**, 790 (1999).
- [6] R. R. Gazka, in *Proceedings of the 14th International Conference on the Physics of Semiconductors*, edited by B. L. H. Wilson (Institute of Physics, Bristol, 1978), p. 133.

Mn이 도핑된 II-IV족 화합물에서의 결과가 보고되었다.^[6] 특히 낮은 농도의 Mn 도핑에서 물질의 결정학적 구조를 손상하지 않고 자기광학적(magneto-optical) 그리고 자기 수송(magneto-transport) 특성 측정에 의해 반도체 내 자기적 특성이 증명될 수 있었으며 동시에 스핀-splitting과 같은 자기적 특성이 측정되었다. 뒤이어 1990년대 초에 저온 분자선 에피택시(molecular beam epitaxy)의 발전 덕분에 획기적인 연구결과들이 이루어졌다. 분자선 에피택시를 이용해 자성반도체를 열적 평형 상태보다 훨씬 낮은 온도 조건에서 육성함으로써 Mn 이온을 III-V족 반도체 속에 성공적으로 주입하는데 성공하였다. Hideo Ohno 등은 1992년 1.3%의 (In, Mn)As에서 자기-수송 특성과 anomalous 홀효과를 측정함으로써 강자성 정렬을 증명하였고^[7] 1996년에는 (Ga,Mn)As에서 110 K의 강자성 상전이 온도를 측정하는데 성공하였다.^[8] 그 후 GaAs 물질에 스핀 편광된 전자를 성공적으로 주입한 결과들이 보고되었다. 하나는 자기장 하에서 GaAs층으로 스핀을 주입하는 동안에 90%의 스핀편광을 얻는데 성공한 것이며 다른 하나는 저온에서 외부의 자기장 없이 약 1% 정도의 스핀편광을 얻는데 성공한 것이다.^[5,9] 이러한 실험 결과들은 반도체의 기본 물성을 유지하면서 반도체 내에 스핀을 주입할 수 있음을 시사하였고 전 세계의 연구자들은 외부 자기장을 사용하지 않고 상온에서 스핀을 주입할 수 있는 새로운 자성반도체를 개발하기 위해 광범위한 연구를 추진하기 시작하였다.

GaAs는 상온에서 작동하는 전자소자 제작에 사용될 수 있을 것으로 기대되기 때문에 계속해서 GaAs를 기반으로 한 여러 가지 다양한 스핀트로닉 응용성에 대한 연구들이 심도 있게 연구되고 있기는 하나 현재까지는 그 자성반도체의 특성이 170 K 이상에서는 유지되기 힘들기 때문에 실제 상온에서 작동하는 소자의 제작이 이루어지지 못하는 부분이 가장 큰 문제점으로 인식되고 있다.

상온 DMS는 가능한가 ?

2000년 전이금속(transition metal)인 Mn과 Co 등을 GaN과 ZnO 등의 넓은 띠 반도체 물질에 치환하고 도핑 농도를 증가시킴으로써 강자성 상전이 온도를 상온 이상으로 높일 수 있다는 이론적 가능성이 보고되었다.^[10] Zener 모델을 이용한 이론 계산을 통해서 (Ga,Mn)As에서의 강자성의 설명이 가능함을 보였으며 자기적 정렬은 옮겨 다니는 홀(delocalized hole)에 의해서 비롯되며 이 홀은 고정된(localized) 전이금속의 자기 모멘트를 매개함을 보고하였다. 이러한 캐리어 매개 자성은 외부의 전기장을 사용해 강자성 특성을 조절할 수 있다는 것을 의미한다. 이 논문은 특히 ZnO와 GaN 등에서 상

Fig. 6. Computed values of the Curie temperature T_C for various p-type semiconductors containing 5% of Mn and 3.5×10^{20} holes per cm^3 .^[10]

온 이상에서의 강자성 DMS 구현이 가능할 것으로 예측하였다.

상온 강자성의 가능성에 대한 고무적인 이 계산 결과는 많은 연구자들에게 ZnO와 GaN 등에서 충분한 전이금속이온의 도핑을 통해 상온강자성 물질을 제조할 수 있음을 시사하였고, DMS 연구를 폭발적으로 활성화시키고 상온 이상에서 작동하는 DMS 물질을 찾는 연구에 많은 연구자들이 집중하는 계기가 되었다.(Fig. 6)

이 계산결과 이후 GaN과 ZnO에서의 상온 강자성 특성에 대한 실험적 연구결과들이 앞다투어 보고되었다. GaN에서는 10% 이하의 Mn 도핑으로 940 K의 강자성 상전이 온도가 보고되기도 했으며^[11] ZnCoO 등에서도 상온 강자성 특성이 보고되었다.^[12] 또한 TiO_2 등과 같은 금속 산화물에서의 상온 이상의 강자성 상전이 온도 등이 보고되었으며 심지어 자성 이온이 포함되지 않은 HfO_2 등에서 상온강자성 특성이 보고되었다.

그러나 이러한 활발한 상온 강자성의 보고가 이루어진 지

REFERENCES

- [7] H. Ohno, H. Munekata, T. Penney, S. V. Molnar and L. L. Chang, Phys. Rev. Lett. **68**, 1664 (1992).
- [8] H. Ohno, A. Shen, F. Matsukura, A. Oiwa, A. Endo, S. Katsumoto and Y. Iye, Appl. Phys. Lett. **69**, 363 (1996).
- [9] G. Schmidt, L. W. Molenkamp and G. W. Baur, Mat. Sci. & Eng. **C15**, 83 (2001); T. Bland, K. Lee and S. Steinmuller, Physicsworld, Jan 3 (2008).
- [10] T. Dietl, H. Ohno, F. Matsukura, J. Cibert and D. Ferrand, Science **187**, 1019 (2000).
- [11] S. Sonoda *et al.*, J. Cryst. Growth **237-239**, 1358 (2002).
- [12] H.-J. Lee, C. R. Cho, C. H. Park and S. -Y. Jeong, Appl. Phys. Lett. **81**, 4020 (2002).

Fig. 7. Ferromagnetic magnetization is caused by segregation of the ferromagnetic secondary phase (red arrows), regardless of the non-ferromagnetic ordering of solid-soluted magnetic impurities (green arrows) and the absence of the AHE (blue lines) due to no spin polarization of charge carriers (band diagram in upper panel of a). b, The ferromagnetic ordering is caused by exchange interaction between solid-soluted magnetic impurities (green arrows) and charge carriers (blue arrows). The spin-orbit interaction between ferromagnetically ordered impurity ions and charge carriers having ferromagnetic spin polarization (band diagram in upper panel of b) generates an AHE (blue curves).^[14]

10여 년이 지난 지금까지도 강자성의 근원에 대한 논란이 계속되고 있다. 동일한 물질임에도 불구하고 물질 제작방법과 처리방법에 따라 서로 상이한 결과가 보고되고, 측정 방법에 따라 서로 다른 결과들이 발표되었다. 이러한 서로 일관되지 않은 불명확한 상온 강자성 원인에 대한 연구가 활발히 이루어지기 시작하였고 새로운 자성반도체의 개발보다는 강자성의 물리적 원인을 규명하려는 연구가 집중적으로 수행되기 시작하였다. 앞에서 기술한 대로 스핀트로닉스에 사용하기 위한 DMS 물질에서 강자성은 호스트 양이온을 랜덤하게 치환한 자성 이온에서 스핀 편광된 캐리어에 의해 나타나야 한다. 그러나 반도체에 도핑되는 자성원자가 박막 제작조건에 따라 쉽게 clustering을 형성하게 되면 이것으로 인해 DMS의 고유한 특성이 아닌 외부적인 강자성이 나타날 수 있다. 대부분의 보고된 상온강자성 물질에서 자성의 크기는 10^{-5} emu 정도의 값을 가지며 이는 자성측정 장치인 SQUID 장비에서 쉽게 측정된다.^[13](Fig. 7)

이러한 이유로 제작방법과 처리 방법에 따라 자기적 특성이 다르게 보고되기도 하였다.^[14] 그리고 시료의 처리 방법에 따라 외부의 오염과 의도하지 않은 불순물의 유입으로 강자성이 나타나기도 한다. HfO_2 물질인 경우 단지 철 핀셋에 접촉되었던 시료에서조차 강자성이 나타나는 현상도 보고되었

다. 많은 연구자들이 제조된 시료에서 x-ray나 TEM 같은 장비를 사용해서 자성이온의 응축(clustering)의 기여를 확인하고 배제하려는 노력을 하고 있지만 실제 그 측정 한계는 SQUID에 못 미치고 진정한 DMS 원인에 대한 결정적 증거는 되지 못했다. 이러한 연구결과들은 자성반도체를 검증하기 위해 자성 측정만으로는 부족하며 새로운 자성반도체의 검증 방법이 필요하게 되었다.

상온자성반도체를 통한 스핀편광은 가능한가?

이러한 문제는 자성반도체의 광학적 특성을 이용하여 자성반도체의 밴드구조를 연구함으로써 해결된다. 즉 반도체 내에 존재하는 캐리어가 스핀 편광되어 있는지 확인할 필요가 있다. 전이 금속이 반도체 호스트 물질을 치환한 경우 자성원자의 d-궤도의 전자와 반도체 밴드를 구성하는 s, p 궤도의 전자는 서로 상호 작용하게 되고 스핀 편광을 일으키기 위해서는 스핀업과 다운에 따라 그 밴드구조가 차이를 나타내야 한다. 즉 s, p-d 교환 상호작용으로 인해 자성반도체 내의 s, p 전자들의 에너지가 전자의 스핀상태에 의존하게 된다.[Fig. 8] 이러한 특성으로 인해 자성반도체의 전기적 특성과 자기적 특성 그리고 광학적 특성이 서로 상호작용하게 된다. 이러한 차이는 MCD(magnetic circular dichroism) 측정을 통해서 알 수 있다. 그러므로 전기장을 통해서 자성의 조절이 가능하기도 하며 자기장을 통해서 그 광학적 특성이 조절될 수 있다. GaN:Mn , GaAs:Cr , 그리고 ZnO:Ni 등의 시료는 SQUID 측정에서 강자성 특성을 보였지만 MCD 측정 결과에서는 강자성을 보이지 않았다. 이는 SQUID에서 측정된 강자성은 자성반도체에서의 스핀 편광된 전자에 의해서 나온 것이 아니라 다른 자성원자 혹은 다른 기여를 통해서 나온 강자성임을 의미한다. 그 외에도 ZnCoO 와 $\text{TiO}_2:\text{Co}$ 중에서도 자성반도체적 특성이 일관되게 측정되지 않았다. MCD를 통해서 intrinsic 자성반도체의 특성이 확인된 물질은 $(\text{In,Mn})\text{As}$, $(\text{Ga,Mn})\text{As}$, and $(\text{Zn,Cr})\text{Te}$ 등에 그치고 있다.^[15-17] 결과적으로 상온 강자성의

REFERENCES

- [13] K. Ando, Science **312**, 1883 (2006).
- [14] H. Toyosaki, T. Fukumura, Y. Yamada, K. Nakajima, T. Chikyow, T. Hasegawa, H. Koinuma and M. Kawasaki, Nat. Mat. **3**, 221 (2004).
- [15] K. Ando and H. Muneakata, J. Magn. Magn. Mater. **272-276**, 2004 (2004).
- [16] K. Ando, T. Hayashi, M. Tanaka and A. Twardowski, J. Appl. Phys. **83**, 6548 (1998).
- [17] H. Saito, V. Zayets, S. Yamagata and K. Ando, Phys. Rev. Lett. **90**, 207202 (2003).

Fig. 8. Magnetism in semiconductors. (Left) In normal, nonmagnetic semiconductors, electronic energy does not depend on the spin direction. It is not possible to distinguish between spin-up and spin-down electrons. (Right) In magnetic semiconductors, the d electrons of magnetic ions influence the s and p electrons, and the conduction band and valence band are split depending on the spin direction (Zeeman splitting). This spin-polarized semiconductor band structure alters the absorption of clockwise-polarized (+) and counterclockwise-polarized (−) light.^[13]

가능성이 처음 보고된 이후로 지금까지 많은 연구자들에 의해서 ZnO와 GaN를 바탕으로 하는 상온 강자성 특성이 보고되고 있지만 그 강자성 특성은 계속해서 논란이 되고 있으며 아직까지 학계에서 공인하는 상온 강자성 반도체 물질은 없어 보인다.

최근 들어 나노과학기술의 발전으로 반도체 내에 치환된 자성 이온을 원자수준에서 직접적으로 관측하고 조절함으로써 자성 매개에 대한 보다 직접적 연구가 수행되기 시작하였다. 그림 9에서 보는 바와 같이, 저온 STM(scanning tunneling microscope) 장비를 사용해서 GaAs에서 Ga 원자 하나를 떼어내고 Mn 원자 하나를 그 자리에 치환하여 전자기적 특성의 변화를 관측할 수 있게 되었다.^[18] 이를 통해 GaMnAs에서 자성 반도체 특성의 극대화를 위한 최상의 Mn 이온의 배열에 대한 연구가 원자스케일에서 가능해졌으며 상온 이상으로 강자성 상전이 온도를 증가시킬 수 있을 것으로 기대된다. [그림 8] 이 연구는 실제 물질 제작에 곧바로 응용되기에는 어렵지만 다른 여러 DMS 물질 격자 내에서 전이금속 원자의 배열과 정렬에 따른 전기적 자기적 특성의 변화를 측정할 수 있으며 상온 강자성 물질의 실현을 위해 반도체에서 자성원자의 보다 근원적인 거동을 연구할 수 있게 할 것으로 기대된다.

마치는 글

현재 DMS에 대한 연구 열기는 지난 10여 년 동안의 연구에 비교해 많이 감소된 것이 사실이다. 하지만 최근 GaAs를 비롯한 DMS 물질을 이용한 스핀소자의 특성 향상에 대한 지

Fig. 9. a, Spatially resolved dI/dV measurements near an Mn acceptor. The As neighbours show enhancements deep in the valence band, highlighted by the blue arrow. The large in-gap resonance over the Mn is its acceptor level. b, 40 Å² topograph of the occupied states showing enhancements concentrated on the neighbouring As. c, 40 Å² topograph of the unoccupied states revealing the anisotropic shape of the Mn acceptor. d, Tight-binding model of a Mn acceptor in bulk GaAs with the Mn spin oriented in-plane along [001]. The image shows a 40 Å² area of the (110) plane containing the Mn.^[18]

속적인 연구와 뛰어난 연구들이 여전히 유수의 논문지에 매년 수백 편씩 발표되고 있다. 또한 MBE와 PLD 등의 시료제작 장비의 발전과 나노스케일에서의 물성의 분석이 정밀하게 이루어짐에 따라 논란이 되고 있는 DMS 물질에서의 자기적 특성의 규명이 점차 이루어지고 있다. 특히, 원자 단위의 물질 제작과 직접적 측정이 가능해져서 계면 조절을 통한 좀더 유용한 스핀소재로의 개발이 이루어질 전망이다. 뿐만 아니라 반도체 내에서의 전이금속의 스핀 정렬은 DMS로서 스핀 편광 소스로서 뿐만 아니라 반도체 자체의 전기적 광학적 특성과 융합되어 매우 다양하고 유용한 특성이 계속해서 보고되고 있고 특히 산업에서도 자성반도체를 활용한 논리회로나 나노선폭의 자성반도체 물질을 꾸준히 갈구하고 있기 때문에 스핀트로닉스 분야에서 DMS 연구의 열기는 쉽게 식지 않을 전망이다. 저자는 최근 이 분야 연구와 관련하여 수소 매개를 통해 재현 가능하고 가역적 상온 강자성을 보이는 ZnCoO 연구결과를 보고한 바 있으나 지면관계상 본 글에서는 생략하였다.^[19,20]

REFERENCES

- [18] D. Kitchen, A. Richardella, J. -M. Tang, M. E. Flatté and A. Yazdani, *Nature* **442**, 436 (2006).
- [19] S. Lee, Y. C. Cho, S.-J. Kim, C. R. Cho, S. J. Kim, J. P. Kim, Y. N. Choi, J. M. Sur and S.-Y. Jeong, *Appl. Phys. Lett.* **94**, 212507 (2009).
- [20] Y. C. Cho, S. -J. Kim, S. Lee, S. J. Kim, C. R. Cho, H. H. Nahm, C. H. Park, I. K. Jeong, S. Park, T. E. Hong, S. Kuroda and S. Y. Jeong, *Appl. Phys. Lett.* **95**, 172514 (2009).