스핀 트랜지스터

DOI: 10.3938/PhiT.19.038

구현철·장준연·한석희·엄종화

Spin Transistor

Hyun Cheol KOO, Joonyeon CHANG, Suk Hee HAN and Jonghwa EOM

Controlling not only the charges but also the spins of electrons, spintronic devices are expected to overcome the physical limitation of current Si-based electronics. The spin injected field effect transistor (FET), a lateral semi-conducting channel with two ferromagnetic electrodes, lies at the heart of spintronics research. An essential ingredient of spintronic devices is a spin polarized current, which can be generated by current injected from ferromagnetic materials. Transition metal is a good source of spin polarized current, and exhibits room temperature operation due to the high Curie temperature. InAs-based high mobility channel is utilized for spin transport channel due to large spin-orbit interaction. This article reviews the demonstration of a spin FET operation which includes the gate voltage control of spin precession of injected spins.

들어가는 글

최근 실리콘 전자소자 기술이 물리적 한계에 근접하여 더

저자약력

구현철 박사는 미국 University of Maryland 공학박사(2002)로서 현재 한국과학기술연구원 책임연구원으로 스핀 제어 정보 소자 연구에 참여하고 있다. (hckoo@kist.re.kr)

장준연 박사는 연세대학교 공학박사(1998)로서 현재 한국과학기술연구원 책임연구원으로 스핀 제어 정보 소자 연구에 참여하고 있다. (presto@kist.re.kr)

한석희 박사는 서울대학교 공학박사(1993)로서 현재 한국과학기술연구원 책임연구원으로 스핀 제어 정보 소자 연구에 참여하고 있다. (sukhan@kist.re.kr)

엄종화 교수는 미국 Northwestern University 이학박사(1998)로서 현재 세종대학교 교수로 스핀 홀 효과와 스핀-궤도 상호작용 연구에 참여하고 있다. (eom@sejong.ac.kr)

MOSFET

Spin Transistor

Fig. 1. Characteristic of spin transistor. Spin transistor can control not only electron charge but also electron spin.

이상 소자의 크기를 감소시키는 것이 어렵고 나노크기의 소자공정을 위해 많은 비용이 소모되고 있다. 이에 따라 스핀트로닉스(Spintronics) 소자와 같은 차세대 소자의 출현이 필요하게 되었다. 스핀트로닉스 소자는 단순한 기존 소자의 개량이나 소형화가 아닌 전자의 양자역학적 성질인 스핀을 이용하는 개념의 전환을 이루는 소자이다. 스핀관련 소자는 지금까지 메모리나 저장용 미디어를 중심으로 발전해 왔다. 자성은 전원이 없이도 그 정보를 유지할 수 있는 비휘발성을 띠고 있어 하드디스크, 저장 테이프, 최근에는 자성메모리(Magnetic Random Access Memory) 분야에서 많은 연구가 되었다. 그러나 새로운 기능의 연산 및 메모리 융합소자를 구현하기 위해서는 능동소자의 출현이 필요하게 되었다.

스핀트로닉스 분야의 대표적 능동 소자인 스핀 트랜지스터(Spin Transistor)는 그림 1과 같이 전자가 가지고 있는 전하와 스핀을 동시에 제어할 수 있는 장점을 가지고 있다.

스핀 트랜지스터는 반도체와 강자성체(ferromagnet)의 하이브리드 구조를 이용하여 트랜지스터의 특성을 구현하는 새로운 개념의 소자이다. 스핀의 정보를 반도체 채널에 전달하고 입력된 스핀의 방향을 게이트 전계로 조절하여 동작시키는 소자이다. 이러한 스핀 트랜지스터는 같은 전하량이 전달되더라도 스핀이라는 또 하나의 제어할 수 있는 변수가 있어 다양한 기능을 할 수가 있다. 스핀의 방향에 따라 저항이 바뀌는 것을 이용한 스위칭 소자로 사용이 가능하며 자성물질의 고유한 특성인 비휘발성을 이용한 메모리 기능도 갖추어 차세대 논리 및 정보저장 통합소자로의 적용이 가능하다.

Fig. 2. Operation of spin transistor. If the spins arriving at drain are parallel (antiparallel) to the magnetization of drain, the transistor is ON (OFF) state.

스핀 트랜지스터의 동작 원리

1990년 Datta-Das가 이론적으로 제안한 스핀 전계효과 트랜지스터(spin Field Effect Transistor)^[1] 전자의 스핀을 이용하여 저항을 변화시키는 신개념 트랜지스터 소자로 비휘발성, 저전력, 초고속 소자로서의 잠재력을 인정받아 최근 20여 년간 많은 연구가 진행되어 왔다. 그림 2에 스핀 트랜지스터의 구조와 작동원리를 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 기존 소자와 구조적으로 거의 동일하나 유일한 차이는 소스(source)와 드레인(drain) 부분이 전자의 스핀을 정렬하고 감지할 수 있도록 강자성 금속(ferromagnetic metal)으로 이루어진 것이다. 작동원리는 다음과 같다. 강자성체 소스의 자화 방향으로 (화살표) 정렬된 스핀분극된 전자를 반도체에 주입시킨 다음 소스와 드레인 사이에 위치하고 있는 게이트 전극(gate)에 전기장을 인가하여 반도체 채널을 통해 이동하는 전자의 스핀 방향 (반도체 내부 전자의 화살표)을 조절한다. 드레인 자성체의 자화방향은 소스와 동일한 방향으로 정렬되어 있으며 반도체 내부를 이동하여 드레인에 도착하는 전자의 스핀 방향이 드레인의 자화방향과 평행(parallel)하거나 반평행(antiparallel)하면 각각 저항이 낮거나 높게 나타난다. 결국 반도체로 주입된 스핀의 방향을 게이트 전기장으로 제어하여 저항을 변화시키는 것이다.

스핀 트랜지스터 동작의 필요조건

이와 같이 스핀 트랜지스터를 작동시키기 위해서는 많은 기반기술이 필요하다. 먼저 소스와 드레인이 원하는 방향의

자화(magnetization)와 높은 분극률(polarization)을 가져야 원하는 스핀 정보를 전달할 수 있다. 현재는 상온에서도 안정된 스핀 분극을 갖은 Co, Fe Ni나 이들의 합금을 사용하고 있다.

그 다음으로는 스핀 정보를 반도체내에 높은 효율로 주입을 하여야 한다. 강자성체의 스핀 분극률은 40% 정도이므로 모두가 정보를 잃지 않고 통과하여도 주입된 스핀 분극은 절반 이하이다. 현재 반도체로의 전기적 스핀 주입률은 수 %에 불과하고 입력단과 출력단의 접합면을 지나가면 현저하게 감소하게 되어 스핀분극 전자의 주입효율을 높이는 것이 시급하다.

적절한 스핀 채널의 선택은 스핀 주입과 함께 가장 중요한 필수 요건이다. 스핀 채널을 제작할 때에는 스핀 감쇠특성과 스핀 제어특성을 동시에 고려해야 한다. 물질에 따라 스핀 정보가 감쇠되는 정도가 크게 다르며 단위 길이에서 스핀을 회전시킬 수 있는 효율도 매우 다르다. 이 두 가지는 서로 상충되는 경우가 많아 목적에 따라 잘 고려해야 하며 이는 소자를 동작시키는 것이 상당한 난이도를 갖는다는 것을 보여주고 있다.

스핀 주입 및 전달

스핀 트랜지스터를 구현하기 위해 기본적으로 필요한 것은 얼마나 많은 스핀 정보를 소스에서 드레인으로 전달하는가를 나타내는 스핀 주입효율이다. 대부분의 스핀 정보의 손실은 소스와 채널 그리고 채널과 드레인 사이의 접합면에서 일어난다. 따라서 스핀 주입을 전기적으로 측정하는 실험은 매우 중요하다. 금속채널은 스핀을 전기적으로 제어할 수 있는 라쉬바 스핀-궤도결합 특성이 작기 때문에 반도체 채널을 이용해야 스핀 트랜지스터를 구현할 수 있다. 많은 그룹들이 강자성체와 금속 사이에서 스핀이 전달되는 것을 전기적으로 확인하였으나 강자성체에서 반도체로 전달하는 것은 매우 제한된 그룹만이 성공을 하였다. 그 이유는 강자성체와 반도체 사이에 고유 저항차이가 커서 접합면에서 스핀 스케터링에 따른 스핀 감쇠가 일어나기 때문이다. 이를 극복하기 위해서는 접합면의 저항을 적절하게 조절하는 계면제어와 채널길이를 미세하게 패터닝하는 나노공정 기술을 필요로 한다. 이 실험에 사용한 소자는 소스와 드레인을 증착하기 전에 알맞은 접촉저항을 구현하기 위해 반도체 층의 일부를 밀링으로 제

REFERENCES

- [1] S. Datta and B. Das, Appl. Phys. Lett. **56**, 665 (1990).

Fig. 3. Structure of spin valve device with an external magnetic field applied along the y-axis (top) and x-axis (bottom). The center-to-center channel length is $1.65 \mu\text{m}$ and the bias current is 1 mA .

거하였다.

그림 3^[2] 이 실험에서 사용된 측정 구조로 자장을 x- 또는 y-축으로 가하면서 전기적으로 측정을 하는 것을 보여주고 있다. 강자성체의 형상이 y축 방향으로 장축(long axis)을 가지므로 자기형상이방성으로 인해 y 방향으로 자화용이축이 형성되어 y축 방향으로 외부자기장을 인가하면 쉽게 두 자성체의 자화방향을 평행-반평행으로 조절할 수 있다. (상단그림) 반면 x축 방향으로 자기장을 인가하면 이 방향의 스위칭 필드가 매우 커지므로 통상적으로 인가하는 $\pm 20 \text{ mT}$ 범위에서 두 자성체의 자화방향은 여전히 y 방향으로 정렬되어 두 자성체의 자화방향을 평행-반평행으로 정렬할 수 없다. (하단그림) 그림 4^[2] 스핀이 전달되는 신호를 전기적으로 측정한 결과로 그림 3의 상단과 같이 y 방향으로 자기장을 인가하여 측정한 구조이다. 측정구조에서 보듯이 전류를 입력단에 가하고 전압을 출력단과 다른 쪽의 채널 사이를 측정하는 구조이다. 이 방법을 논로컬(non-local) 측정방법이라고 부르며 전하의 흐름이 아닌 순수한 스핀 전류를 측정하는 방법이다. 여기서는 게이트 전압의 영향을 배제하고 단순히 스핀 전달만을 측정하기 위해 $V_G=0$ 으로 하였다. 강자성체로는 NiFe를 증착하였고 소스와 드레인의 강자성체의 스위칭 필드를 다르게 하기 위해 다른 크기로 제작을 하였는데 자장을 조절하면 두 강자성 패턴이 평행 또는 반평행으로 정렬을 하게 된다. 측정 결과에서 보이는 바와 같이 두 자성체의 자화방향이 평행일

Fig. 4. Non-local lateral spin valve magnetoresistance measurement using configuration of Fig. 3(a) at $T=1.8 \text{ K}$. The black and red lines correspond to field sweep-up and -down, respectively. The pairs of arrows indicate the magnetization alignments of the two ferromagnetic electrode.

때는 높은 전위를 반평행일 때는 낮은 전위를 갖는 것을 관찰할 수 있다. 이는 입력된 스핀이 출력단에 전달되었다는 것을 알 수 있는 증거가 된다. 본 실험에서는 강자성체와 반도체 채널과의 거리를 조절하여 옴릭특성에 근접한 낮은 터널링 배리어를 갖게 하여 스핀 주입효율과 전기적 감도를 향상시켰다. 이 실험에 사용된 InAs 기반 채널은 채널길이에 따른 논로컬 측정 방법을 통해 20 K 에서 $1.8 \mu\text{m}$, 상온에서 $1.3 \mu\text{m}$ 정도의 스핀확산길이를 얻었다.^[3] 스핀 주입효율은 접합면의 상태에 크게 좌우되는데 현재 전기적 방법에 의한 측정결과로는 수 %대에 머물고 있다.

라쉬바 효과

스핀 트랜지스터를 동작하기 위해서는 스핀 세차운동(spin precession)이 필요한데 이러한 현상을 발생시키는 기본원리를 라쉬바 효과(Rashba effect)라고 부른다. 라쉬바 효과는 전기장을 자기장으로 전환하는 원리로 스핀 트랜지스터를 구현하는데 중심이 되는 현상이다. 그림 5와 같이 x-방향으로 진행하는 전자가 z-방향으로 전계를 받으면 y-방향이 유도되는 것을 기본원리로 하고 있다. 여기서 전계는 반도체 이종구조 내부에서 발생하며 외부 전기장을 가해 그 크기를 조절할 수도 있다.

REFERENCES

- [2] H. C. Koo, J. H. Kwon, J. Eom, J. Chang, S. H. Han and M. Johnson, Science **325**, 1515 (2009).
- [3] H. C. Koo, H. Yi, J.-B. Ko, J. Chang, S.-H. Han, D. Jung, S.-G. Huh and J. Eom, Appl. Phys. Lett. **90**, 022101 (2007).

Fig. 5. Diagram of Rashba field. Moving electrons with electric field produce effective magnetic field.

Fig. 6. Shubnikov-de Haas oscillations as a function of gate voltage.

반도체 내부에서 라쉬바 효과를 발생시키고 전자 이동도를 높이기 위해 HEMT(High electron mobility transistor) 구조를 채널로 사용하고 있다. 라쉬바 효과는 물질 그 자체에서 발생하기 보다는 접합면의 비대칭성이 중요한 역할을 함으로 정교한 이종접합구조를 개발하는 것이 매우 중요하다. 이 실험에서는 밴드갭이 작은 InAs를 양자우물층으로 사용하고 전하를 전도층에 가두기 위해 크래딩 층으로 InGaAs와 InAlAs 층을 사용하고 있다. 여기서 도핑층을 양자우물층 아래에 두고 비대칭적인 구조를 만들었는데 그 이유는 비대칭 채널에서는 전도밴드의 기울기에 따라 강한 전계가 발생하고 이 전계는 게이트 전압을 가하여 크기를 조절할 수 있기 때문이다.

라쉬바 효과를 측정하기 위해 많이 사용하는 방법은 Shubnikov-de Haas (SdH) oscillation을 채널로부터 얻는 것이다.^[4,5] 이 방법은 수직자장을 가하면서 저항을 측정하는 방법이다. 그림 6은^[2] SdH 측정 결과인데 맥놀이 파형을 발견할 수 있다. 측정된 파형의 주파수는 전자밀도에 비례하는 값이다. 스핀 업(up)과 다운(down) 전자농도는 라쉬바 효과에 의해 동일하지 않게 되며 각각의 다른 주파수를 갖고 이 두 개의 파형이 합쳐져서 맥놀이 파형이 관찰된다. 여기에서 노

Fig. 7. Gate voltage dependence of spin-orbit interaction parameter (α) and carrier concentration (n_s) as functions of gate voltage. Due to the internal electric field induced by asymmetry of the quantum well structure, α shows non-zero even with zero gate voltage.

드 위치를 관찰하면 두 종류의 스핀농도의 차이를 알 수 있고 결국은 얼마나 많은 라쉬바 필드가 유도되었는지를 알 수 있다. 이러한 크기를 나타내는 파라미터를 스핀-궤도 결합 상수(α)라 한다. 이 상수는 전기장의 크기에 따라 제어되는 상수로써 게이트의 전압으로 이를 제어할 수 있다.

그림 7은^[2] 게이트 전압에 따른 스핀-궤도 결합상수를 보여 주고 있다. 게이트 전압과 스핀-궤도 결합상수의 관계는 게이트 절연막의 두께와도 관련이 있다. 절연막이 두꺼워지면 채널에 가해지는 외부전계가 작아져 게이트 제어를 하기가 어려워진다. 그러나 누설전류의 방지를 위해 본 실험에서는 100 nm의 절연층을 사용하였다. 게이트에서 발생하는 전기장이 라쉬바 필드와 스핀궤도결합상수를 변화시켜 양의 전압으로 갈수록 그 값이 작아짐을 보여준다. 이는 채널의 에너지 밴드 계산 결과와도 일치한다. 비대칭한 양자우물구조가 양의 게이트 전압에서는 대칭한 쪽으로 변하고 음의 전압을 가할수록 비대칭성이 커짐을 알 수 있다. 이 그래프를 보면 전하 밀도는 게이트 전압에 따라 많은 변화가 없는데 이는 라쉬바 효과를 관찰하기에 좋은 시스템을 보여준다.

게이트 제어

앞에서 살펴본 바와 같이 게이트 전압으로 라쉬바 효과의

REFERENCES

- [4] J. Nitta, T. Akazaki and H. Takayanagi, Phys. Rev. Lett. **78**, 1335 (1997).
- [5] J. H. Kwon, H. C. Koo, J. Chang, S.-H Han and J. Eom, Appl. Phys. Lett. **90**, 112505 (2007).

Fig. 8. Spin precession signal as a function of temperature. The channel length is $1.25 \mu\text{m}$, and bias current is 1 mA . As increasing temperature the mean free path decreases and transport characteristics change from ballistic to diffusive at 50 K .

크기를 조절할 수 있다. 그림 3의 두 그림은 게이트 제어 실험의 측정 구조로써 외부 필드의 역할은 소스와 드레인의 자화 방향을 정렬시키는 것이며 실제로 스핀의 방향을 제어하는 것은 게이트 전기장이다. 라쉬바 필드의 방향이 y -축과 평행하므로 상단과 같이 자장을 y -축으로 가하면 스핀 프리세션이 일어나지 않는다. 스핀 프리세션은 스핀이 자장방향을 축으로 하여 회전하기 때문이다. 그러나 입력된 스핀이 그림 3의 하단 그림처럼 x -방향인 경우에는 y -축을 중심으로 x - z 평면에서 프리세션을 하고 드레인에 도착하게 된다. 여기서도 다른 원하지 않는 효과들을 배제하기 위해 논로칼 측정방법을 사용하였고 측정된 전압값은 그림 8과^[2] 같다. 온도가 1.8 K 일 때를 예를 들면 드레인에 도착한 스핀이 드레인의 자화 방향과 평행이면 높은 전위를, 반평행이면 낮은 전위를 얻게 된다.

입력된 스핀이 출력단까지 전달되는 것을 설명하는 모델로

는 ballistic 모델과 diffusive 모델이 있다. 이 중에서 ballistic 모델은 스캐터링이 없이 스핀 정보가 전달되어 출력신호가 코사인(cosine) 형태로 나타난다. 스핀이 회전하는 정도는 스핀-궤도결합상수에 비례하게 나타난다. 그러나 diffusive 모델에서는 출력단에 도달하는 스핀이 모든 다른 시간이 걸려 도착하므로 이러한 스핀의 분포를 모두 고려해 주어야 한다. 이를 계산해 보면 diffusive 영역에서는 어떠한 파형도 관찰될 수가 없다. 따라서 이 실험에서 관찰한 스핀프리세션은 ballistic 모델로 설명할 수 있다.

그림 8은^[2] 온도에 따른 게이트 제어 신호를 보여주고 있다. 약 40 K 까지 뚜렷한 스핀 프리세션 신호를 보여주고 있으며 그보다 온도를 높이면 신호가 사라지고 있다. 그 이유는 스핀 전달 메커니즘과 관계가 있다. 본 실험에 사용된 채널의 평균자유행로(mean free path)는 50 K 정도에서 갑자기 감소하는데, 이 온도에서 ballistic 전달 메커니즘이 diffusive 전달 메커니즘으로 전환되기 때문으로 보인다.

맺음말

본 연구를 통해 스핀 트랜지스터의 동작을 실험적으로 보여주었다. 게이트 전기장으로 스핀의 방향을 제어하여 차세대 소자로서의 가능성을 제시하였고 강자성체가 가진 비휘발성까지 응용한다면 메모리와 논리소자를 통합하는 소자로도 발전시킬 수 있다. 현재는 소자의 동작을 확인하는 정도의 초기 개발단계에 불과하며 이용 가능한 소자를 위해서는 스핀 주입률 향상, 고효율 스핀 채널 개발, 외부자장이 필요 없는 시스템 개발 등의 많은 연구가 필요하다.

감사의 글

이 연구는 한국과학기술연구원의 기관고유사업의 지원을 받아 이루어졌습니다.