ISSN (Print) 1598-5385
ISSN (Online) 2233-6648
≪연구논문≫ Journal of the Korean Magnetics Society 31(5), 197-202 (2021) https://doi.org/10.4283/JKMS.2021.31.5.197

Multiple Chiral Domain Wall Motions by Applying Transverse Magnetic Field Pulses

June-Seo Kim*,† and Jaehun Cho*,†
Division of Nanotechnology, Institute of Convergence, DGIST, Daegu 42988, Korea

(Received 23 September 2021, Received in final form 19 October 2021, Accepted 20 October 2021)

Multiple chiral magnetic domain walls (DW) motions on a perpendicularly magnetized nanowire by applying transverse magnetic field pulses are systematically investigated. The chiral DW motions depend on the directions of the magnetic fields, the magnetic domain wall configurations, and the signs of the Dzyaloshinskii-Moriya (DMI) interaction. For racetrack memory, the successive chiral DW motions by introducing the repetitive magnetic field pulses for both directions are numerically demonstrated. Lastly, various applications such as the next-generation non-volatile memory devices and the artificial intelligent logic devices based on the chiral DW motions are discussed.

Keywords : magnetization dynamics, magnetic domain wall, chirality, in-plane magnetic field pulse, dzyaloshinskii-moriya interaction, racetrack memory

횡축 자기장 펄스 인가 복수의 키랄 자구벽 이동 현상

김준서*,† · 조재훈*,†
대구경북과학기술원 나노융합연구부, 대구시 달성군 현풍면 테크노중앙대로 333, 42988

(2021년 9월 23일 받음, 2021년 10월 19일 최종수정본 받음, 2021년 10월 20일 게재확정)

수직이방성을 가지는 나노선에서 수평 자기장 펄스에 의한 복수의 키랄성을 가지는 자구벽들의 이동에 관한 체계적인 연구를 수행한다. 자구벽의 이동 방향은 횡축 자기장 펄스의 방향, 자구벽의 방향 및 잘로쉰스키-모리야 상호작용의 부호에 의존한다. 레이스트랙 메모리로의 응용 가능성을 판정하기 위하여 연속적인 자기장 펄스에 의하여 복수의 자구벽이 일정하게 이동하는지 여부에 대해서 시뮬레이션을 수행한다. 마지막으로 차세대 비휘발성 메모리 분야 및 인공지능 논리회로 분야로의 응용 가능성에 대해서 논의한다.

주제어 : 자화동역학, 자구벽, 횡축 자기장 펄스, 잘로신스키-모리야 상호작용, 레이스트랙 메모리

I. 서 론

IBM 연구소 Stuart Parkin 박사에 의하여 제안된 스핀 분극 전류 인가 자구벽 이동(spin-polarized current induced magnetic domain wall motion)은 기존 휘발성 메모리의 한계를 극복하고 자구벽이라는 비휘발성 소재를 사용함으로써 소모전력을 획기적으로 줄이는 것이 가능하다[1]. 기술이 발전함에 따라서 자구벽 이동 소자의 기반이 되는 자성체 나노선(magnetic nanowire)은 수평 자기 이방성 물질에서 수직 자기 이방성 (perpendicular magnetic anisotropy) 물질로 변화하게 되었다[2,3]. 그 이유는 수직 자기 이방성 물질 내 자구벽의 넓이가 상대적으로 작기 때문에 정보의 밀도를 높이는 측면에서 유리하기 때문이다. 이런 관점에서 수직 자기 이방성을 가지는 나노선에서 자구벽 이동 현상에 관한 활발한 연구가 진행되고 있었고 초고속으로 이동하는 자구벽 현상이 관측됨에 따라서 새로운 물리 현상들, 예를 들어 라쉬바 효과(Rashba effect)[4] 또는 스핀홀 효과(spin Hall effect)[5,6]의 기여에 대해서 많은 연구 또한 수행되었다. 뿐만 아니라 상기 두 가지 강한 스핀-궤도 상호작용(spin-orbit interaction) 기반 효과들로도 해석이 불가능한 현상들이 보고되었고, 최근에 강한 스핀-궤도 상호작용을 가지는 자성 다층 박막에서 잘로쉰스키-모리야 상호작용(Dzyaloshinskii-Moriya interaction)이 크게 기여한다는 사실이 밝혀졌다[7]. 가장 큰 기여 중 하나로

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.
*Corresponding author: Tel: +82-53-785-6912,
Fax: +82-53-785-3439, e-mail: spin2mtj@dgist.ac.kr
Tel: +82-53-785-3607, e-mail: jhcho@dgist.ac.kr
†The authors contributed equally to this work.

는 자구 및 자구벽의 키랄성(chirality)을 주는 것이다. 키랄성이란 서로 다른 두 개의 자구와 그 사이에 존재하는 자구벽의 스핀방향이 특정 방향으로 꼬이는 것을 의미한다[8]. 예를 들어 오른쪽 자구는 업(up) 방향을 향하고 있고 왼쪽 자구는 다운(down) 방향을 향하고 있다고 가정하면 자구벽의 자화 방향이 오른쪽(right) 방향, 혹은 왼쪽(left) 방향을 향하는지에 따라서 서로 다른 키랄성을 갖는다고 한다. 이 방향은 시스템이 가지고 있는 DMI의 방향에 따라서 결정된다.

문제는 키랄성을 가지는 자구벽을 효과적으로 이동시켜서 이를 기반으로 다양한 메모리 소자 또는 논리회로에 응용하는 것이다. 가장 기본적인 자구벽 이동 방법으로는 외부 자기장을 인가하는 것이다. 수직자기이방성을 가지는 나노선의 경우 자구의 방향과 동일한 방향으로 자기장을 인가하여 자구벽을 이동시키는 방법이다. 하지만 상기 방법의 치명적인 문제는 서로 다른 두 개이상의 자구벽이 존재하는 시스템의 경우 자구벽이 외부 자기장에 의하여 한쪽 방향으로 움직이는 것이 아니라 서로 가까워지거나 멀어지는 현상을 보이기 때문에 메모리나 기타 소자로의 응용에 걸림돌이 된다. 대안으로 개발된 방법이 전류 인가 자구벽 이동 현상이다. 전류에 의한 현상은 크게 두 가지로 나눠지는데 스핀-전달 토크(spin-transfer torque, STT)[9]와 스핀-궤도 토크(spin-orbit torque)[10] 자구벽 이동 현상이다. 수직자기이방성을 만들기 위하여 기본적으로 강자성체-중금속 이종 접합 구조를 사용하는데 계면에서 강한 스핀-궤도 상호작용이 만들어지고, 상기 시스템에 전류를 인가할 때 계면에서 스핀 전류(spin current)가 발생한다. 이 스핀 전류는 키랄성 자구벽을 제어하는데 매우 효과적인 것으로 알려져 있다.

최근에 횡축 자기장 펄스(transverse magnetic field pulse) 인가 자구벽 이동 및 자화 반전(magnetization reversal) 기술이 발표되어 주목을 받고 있다[11-13]. 그 이유는 매우 단순하다. 기존에 외부 자기장 인가에 의한 자구벽 이동현상은 앞에서 설명한 것과 같이 자구벽들이 서로 가까워지거나 멀어지는 방향으로만 움직이기 때문에 동시에 한 방향으로 움직이는 동기화(synchronization)가 필요한 메모리 소자에 사용이 어려웠는데 이런 문제를 해결해 줄 수 있기 때문이다. 뿐만 아니라 동작원리가 Landau-Lifshitz-Gilbert(LLG) 방정식만으로 기술이 가능하기 때문에 자화 동력학을 이해하는데 매우 수월해지기 때문이다. LLG 방정식의 일반적인 형태는 다음과 같다.

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma\vec{M}\times\vec{H} + \frac{\alpha}{M_s}\left[\vec{M}\times\frac{d\vec{M}}{dt}\right], \quad (1)$$

이때 $\vec{M}$은 자화, M_s는 포화자화량, γ는 $\gamma = -g\mu_B/\hbar$로 표현되는데, μ_B는 보어마그네톤, g는 g-factor이다. 그리고 $\vec{H}$는 유효자기장이고, 교환자기장, 자기이방성 자기장, 정자기 자기장, 외부 자기장 외에 열적 요동에 의한 자기장, 자기변형에 의한 자기장, DMI에 의한 자기장 등이 포함될 수 있으며, 마지막으로 α는 감쇠상수를 의미한다.

그러므로 횡축 자기장 펄스에 의한 자구벽 이동 현상 또는 자화 반전 현상의 핵심은 LLG 방정식에서 설명하듯이 세차운동 토크(precession torque)와 감쇠 토크(damping torque)의 경쟁이다. 세차운동은 자구벽을 일정 방향으로 회전하려고 하기 때문에 나노선에서의 자구벽은 횡축 자기장 펄스에 의하여 이동하게 된다. 한편 감쇠 토크는 이런 변화를 억제하고자 하는 성질이 있기 때문에 자구벽 이동을 방해하려고 한다. 일단 횡축 방향으로 자기장이 인가되면 자구 및 자구벽은 세차운동 토크와 감쇠 토크의 경쟁으로 인하여 비평형 상태에 놓이게 되고 시스템이 평형 상태를 찾아가는 동안에 자구벽은 이동하게 된다. 자기장 펄스가 사라지면 새로운 평형 상태의 시스템은 반대 방향의 토크를 받게 되고, 자구 및 자구벽은 원래 위치로 돌아가게 된다. 이 때 횡축 자기장 펄스의 상승시간 또는 하강시간을 조절하면 시스템이 느끼는 비평형 상태에서의 토크를 조절할 수 있고, 여기에 노치(notch)를 사용하면 일정 단위 길이를 단위 시간에 움직이는 레이스트랙(racetrack) 메모리로 활용이 가능하다[13].

II. 시뮬레이션 방법

본 연구에서 사용한 시뮬레이션(simulation) 프로그램은 Object Oriented Micromagnetic Framework(OOMMF)이다[14]. Fig. 1은 시뮬레이션에 사용된 수직자기를 갖는 나노선

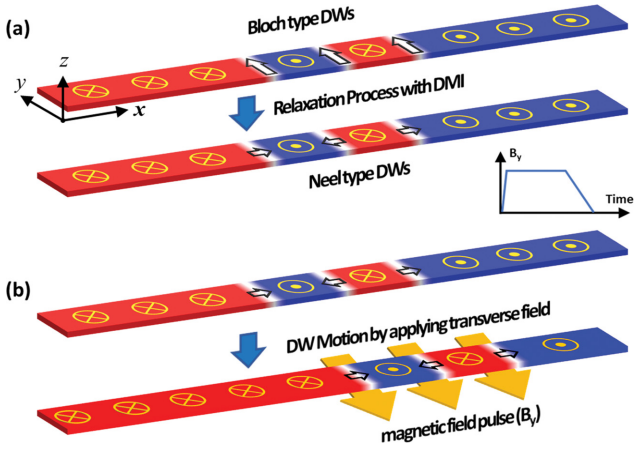

Fig. 1. (Color online) (a) Initial and final magnetization configurations during the relaxation process. After the relaxation process, three individual Neel type DWs are formed due to the DMI. (b) Schematic configuration of the transverse magnetic field pulses induced multiple chiral magnetic domain wall motion and the method of how to initialize chiral magnetic domain walls. Inset shows the schematics of asymmetric transverse magnetic field pulses.

에서의 자구 및 자구벽 생성 방법을 나타낸 것이다. 먼저 나노선의 길이, 폭, 높이는 각각 2000 nm, 50 nm, 1 nm이고, 나노선 방향을 x 축으로 정의한다. 시뮬레이션에 사용된 각종 물리량은 다음과 같다. 먼저 포화자화량(M_s), 수직자기이방성 에너지 밀도(K_u), 교환 뻣뻣함 상수(A_{ex})는 각각 1.1 MA/m, 1.0 MJ/m^3, 16 pJ/m을 사용하였고, DMI 에너지밀도(D)의 크기와 방향 및 감쇠계수는 각각 +1.0 mJ/m^{2}과 0.02로 설정했다. 시뮬레이션 셀(cell)의 크기는 1 × 1 × 1 m^{3}으로 설정했다. 상기 물질 상수들은 최근 브릴루앙 광산란을 이용한 DMI 크기 및 기타 물질 상수 측정 결과에서 결정하였기 때문에 실험적 검증이 용이할 것으로 예상한다[15,16].

먼저 DMI에 의한 키랄성을 가지는 다수의 자구벽을 생성하기 위하여 서로 다른 4개의 자구와 3개의 자구벽 구조체를 만들었다. 자구벽의 자화 방향은 일단 +y 방향으로 고정(Bloch type)하고 5 ns 동안 바닥상태(ground state)에 도달하도록 했다. 5 ns 후 서로 다른 3개의 자구벽의 자화 방향은 모두 x 방향과 나란하게 정렬하였다(Neel type). 자세히 살펴보면 3개의 자구와 자구벽의 자화 방향은 순서대로 down → +x → up → −x → down → +x → up이라는 규칙을 가지게 되는데, 이는 DMI가 주는 키랄성 때문이다.

횡축 방향 자기장의 방향이란 세차 토크의 크기가 최대화되는 방향이기 때문에 자구의 방향(± z) 및 자구벽의 방향(± x)에 동시에 수직한 ± y 방향을 의미한다. 앞서 진행되었던 연구들은 횡축 방향 자기장 펄스에 의한 다양한 동역학 해석 및 자구벽 이동에 관한 체계적인 연구 결과들을 보여주었으나, 복수의 자구벽을 갖는 구조체에서는 시도되지 않았다. 복수의 자구벽 이동과 관련된 선행연구가 되지 않는경우, 실제 메모리나 논리 소자로 응용이 어려우며, 본 연구에서는 복수의 키랄성 자구벽이 횡축 방향 자기장 펄스에 의한 영향을 검증한다. Fig. 1의 inset은 독자들의 이해를 돕기 위해 비대칭 횡축 자기장 펄스의 개형을 보여주는 것이다.

횡축 자기장 펄스의 세기는 100 mT~200 mT까지 다양하게 변화를 주었으며 펄스의 상승시간(rise time)은 10 ps으로 고정했으며, 펄스의 유지시간(duration time)과 하강시간(fall time)은 변수로 놓고 시뮬레이션을 수행했다. 뿐만 아니라 자구벽을 고정시키기 위해서 물리적 노치(notch)를 사용했으며 노치의 크기는 5 × 5 m^{2}이고 간격은 50 nm로 나노선의 폭과 같다. 자기장 펄스 인가는 동일 시스템에 최소 1회부터 최대 2회까지 수행했다.

III. 횡축 자기장 펄스 인가 키랄 자구벽 이동 연구

1. 노치가 없는 나노선에서 키랄 자구벽들의 이동

Fig. 2는 노치가 없는 나노선에서 3개의 키랄 자구벽들이

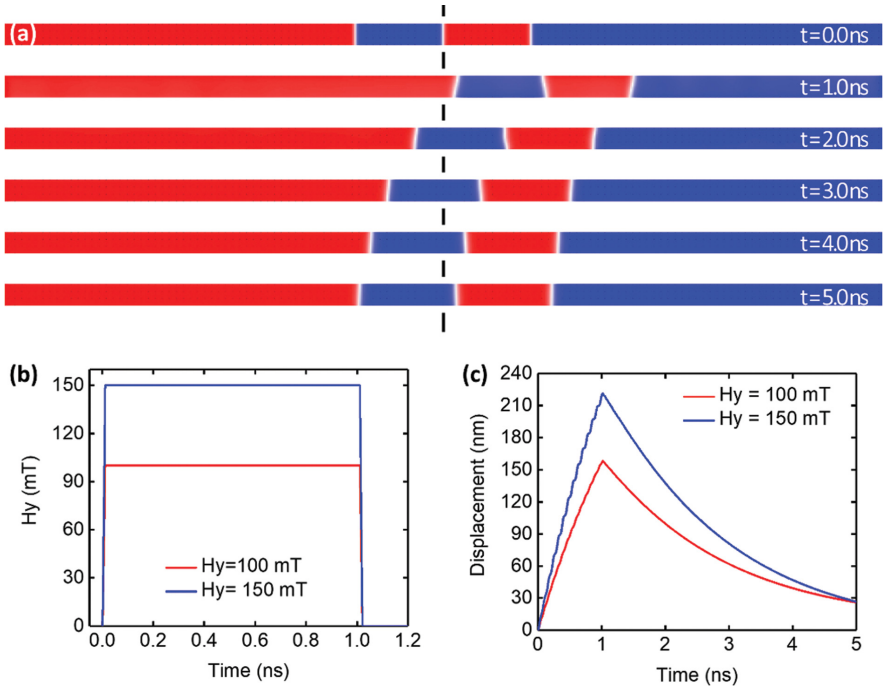

Fig. 2. (Color online) Micromagnetic simulation results for transverse magnetic field pulse induced synchronized chiral magnetic domain wall motions (a) magnetization snapshots from 0.0 ns to 5.0 ns (1.0 ns time step) (b) transverse magnetic field pulse profile (rise time = 10 ps, duration time = 1000 ps, and fall time = 100 ps) (c) chiral magnetic domain wall displacements as a function of time for Hy = 100 mT (red line) and Hy = 150 mT (blue line).

y 축 방향 횡축 자기장 펄스에 의하여 어떻게 움직이는지를 나타낸 것이다. 먼저 횡축 자기장 펄스의 이력(profile)은 Fig. 2(b)와 같다. 펄스의 크기는 +150 mT와 +200 mT로 고정했으며 펄스의 상승시간, 지속시간, 하강시간은 각각 0.01 ns, 1 ns, 그리고 0.1 ns으로 고정했다. Fig. 2(c)는 시간에 따른 자구벽들의 변위(displacement)를 나타낸 것이다. 펄스인가 시작점부터 자구벽들은 한쪽 방향으로 이동하는 것을 알 수 있다. 이것은 자구벽들이 같은 키랄성을 가지고 있기 때문에 가능한 현상이다. Fig. 2(c)는 횡축 자기장 펄스에 의한 자구벽 이동에 관한 많은 정보를 주는데 예를 들어 자기장 펄스의 세기가 200 mT인 경우, 카이랄 자구벽의 최대 변위는 약 220 nm다. 펄스 인가 시간이 1.11 ns(duration time = 1 ns + fall time = 0.1 ns + rise time = 0.01 ns)인 것으로 고려하면 자구벽 이동 속도는 약 200 m/s 수준으로 메모리 소자로 사용하기에 어려움이 없다[17]. 뿐만 아니라 상기 자구벽 이동 속도의 경우 각종 물질 상수의 함수이기 때문에 물질 상수의 조절에 의하여 자구벽 이동 속도를 크게 증가 또는 감소시키는 것이 가능하다. 1.11 ns 이후에 횡축 자기장 펄스 인가가 끝나는 시점부터 시스템은 반대 방향의 토크를 받게 되고 키랄 자구벽들은 다시 반대 방향으로 이동하게 된다. 만약 초기상태와 자구벽 이동 상태가 동일하다면 같은 세기의 토크가 인가되기 때문에 대칭성에 의하여 자구벽들은 초기 위치로 되돌아와야 한다. 하지만, 총 시뮬레이션 시간 5 ns 동안 자구벽의 이동 변위들을 살펴본 결과 펄스인가가 끝나고 상당한 시간이 지났지만, 자구벽들은 초기 위치로 돌아오지 않는다는 사실을 발견했다(Fig. 2(a) 참고). 그 이유는 키랄 자구벽 이동시 발생하는 자구벽의 경사각(tilting angle) 때문이다. DMI에 의하여 자구벽이 이동할 때 경사각이 발생하고 초기 상태와 펄스 인가 후의 평형상태가 동등하지 않는다. 그러므로 펄스 인가 전후의 시스템에 인가되는 토크의 세기가 다르기 때문에 자구벽들은 초기상태로 회귀하지 않는다[13]. 마지막으로 Fig. 2(c)의 자구벽 변위를 살펴보면 초기에 자구벽 이동이 시작되고 자구벽의 변위가 지속적으로 증가만 하는 것이 아니라 주기적인 요동(fluctuation)이 있다는 사실을 밝혀냈다. 이는 횡축 자기장 인가 자구벽 이동이라는 물리현상이 세차운동 토크와 감쇠현상 토크와의 경쟁에서 발생하는데, 이 주기에 맞춰서 요동이 발생하는 것으로 이해할 수 있다[12,13]. 다른 하나의 요인으로는 펄스의 하강시간이 상승시간에 비하여 10배가 더 긴 100 ps을 사용했기 때문에 초기상태로 회귀하는데 많은 시간이 걸리게 된다.

2. 노치가 있는 나노선에서 키랄 자구벽들의 이동

횡축 자기장 인가 키랄성 자구벽 이동에서 자구벽의 변위를 통제하는 방법에는 크게 두 가지가 있다. 먼저 노치를 사용하는 것이다. 노치는 자구벽의 이동을 통제하는 대표적인 도구로써 노치가 있는 경우 자구벽은 노치에 걸리는 pinning 현상이 발생하고, 또 강한 외부 자극(예: 자기장 또는 전류)을 인가해야만 노치에서 빠져나오는 depinning 현상이 발생하게 된다[12]. 다른 한가지요인은 횡축 자기장의 하강시간을 조절하여 시스템에 인가되는 토크를 조절함으로써 일정 변위를 가지고 움직인 자구벽들이 다시 회귀하는 현상을 억제하는 것이다. 본 연구에서는 두 가지 방법을 모두 사용하여 자구벽 이동 현상에 관한 연구를 수행했다.

Fig. 3은 서로 다른 세기의 비대칭 횡축 자기장 펄스 인가에 의하여 복수의 키랄 자구벽이 이동하여 노치에 pinning되는 현상을 보여주는 시뮬레이션 결과들이다. 먼저 3개의 서로 다른 자구벽이 원점을 대칭으로 ± 100 nm에 위치해 있다. 여기서 말하는 비대칭은 자기장 펄스의 상승시간과 하강시간이 극단적으로 다른 것을 의미하고, 본 시뮬레이션에서 사용된 펄스의 상승시간과 하강시간은 10 ps과 1000 ps이고 펄스

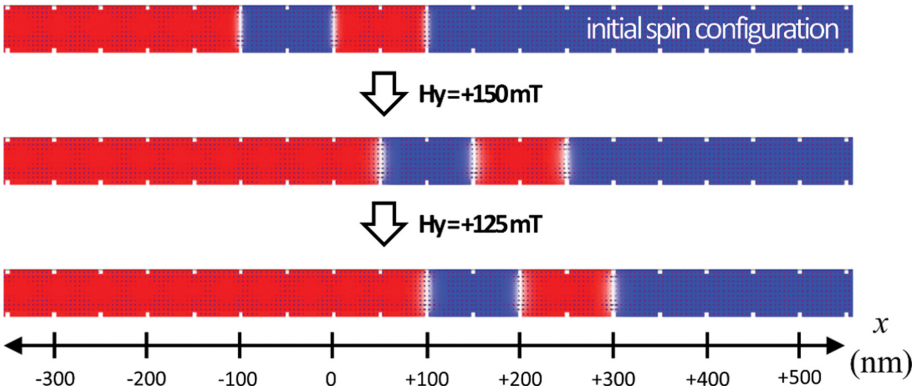

Fig. 3. (Color online) Multiple chiral domain wall motions by applying two individual transverse magnetic field pulses (Hy = 150 mT and Hy = 125 mT). The rise time, duration time, and fall time of magnetic field pulses are 10 ps, 1000 ps, and 1000 ps, respectively. The magnetization snapshots are taken after t = 5 ns.

지속시간은 1000 ps이다. 첫번째 펄스의 세기는 +150 mT이며 총 시뮬레이션 시간은 5 ns이다. 첫번째 펄스가 인가되고 자구벽들은 최대 3개의 노치를 지난 지점에 위치해 있었으며 상대적으로 긴 하강시간으로 인하여 펄스 인가 종료 후에도 그 위치를 유지할 수 있었다. 첫번째 펄스의 세기를 +150 mT로 설정한 이유는 초기상태에서 자구벽은 노치에 pinning되어 있는 상태이기 때문에 depinning 현상이 일어나기에 충분한 자기장을 인가해야 하기 때문에 +150 mT를 인가했다. 뿐만 아니라 키랄 자구벽들이 노치를 통과하는 과정은 pinning과 depinning이 모두 일어나는 현상이기 때문에 최소 거리(노치와 노치 사이의 간격 = 50 nm) 이상을 이동하기 위해서는 초기 depinning 현상이 일어나는 자기자보다 더 큰 자기장을 인가해야만 한다. Fig. 3에서 보듯이 두번째 펄스의 세기는 +125 mT로 첫번째 펄스와 크게 차이가 없지만 키랄 자구벽들이 이동한 거리는 50 nm이다. 자기장의 세기는 유사했지만 결국 키랄 자구벽들은 두번째 노치까지 도달하지 못하고 첫번째 노치에 pinning되어 멈춘 것을 의미한다.

결론적으로 횡축 자기장 펄스 인가 키랄 자구벽 이동 현상에서 중요한 요인으로 작용하는 것은 비대칭 자기장의 세기, 상승시간과 하강시간 뿐만 아니라 노치의 크기 및 이에 따른 depinning 현상이 일어나는 자기장의 세기다. 이러한 변수들을 잘 조절하면 원하는 위치와 방향으로 키랄 자구벽들을 이동하는 것이 가능하게 된다.

3. 자기장 펄스 인가 키랄 자구벽 생성 및 이동

마지막으로 횡축 자기장 인가 키랄 자구벽 이동 현상이 메모리 또는 논리회로 소자로 응용 가능한지에 대해서 알아보도록 하겠다. 먼저 메모리나 다른 분야로 응용 가능하기 위해서는 (i) 동일한 물리 현상(자기장 펄스 인가)으로 자구벽을 생성하고, (ii) 만들어진 자구벽을 이동시키고, (iii) 새로운 자구벽을 다시 생성하는 과정들이 순차적 이루어져야 가능하다. DMI를 포함하는 나노선의 경우 한 가지 큰 장점이 있는데 그것은 바로 복수의 자구벽을 생성하면 키랄성에 의하여 자구벽의 자화 방향이 자연스럽게 결정된다는 것이다. 다시 말해서 서로 다른 두개의 자구 사이에 존재하는 자구벽은 항상 일정한 방향을 갖는다는 것을 의미한다. 뿐만 아니라 펄스 자기장의 방향은 전류를 어떤 방향으로 인가하는가에 따라서 제어가 가능하다는 사실도 자기장 펄스인가 키랄 자구벽 생성 또는 이동을 가능하게 만들어준다.

Fig. 4는 십자가 모양의 전도성 나노선 위에 수직자기이방성을 가지는 나노선이 위치해 있는 것을 나타내고 모든 자화는 –z 축으로 정렬되어 있는 상태다. 먼저 –y 축 방향으로 전류를 인가하는 경우 펄스 전류에 의하여 +z 축 방향으로 강한 Oersted 자기장 펄스가 발생하고 이 자기장은 나노선의 일부분에만 작용하기 때문에 자구벽을 만들 수 있다. 자기장의 세기는 전도성 나노선에 인가되는 전류의 양에 비례하기 때문에 전류밀도를 낮추기 위해서는 넓고 두꺼운 전도성 나노선이 더 유리하다. 일단 자구벽이 생기면 이번에는 +x 축 방향으로 강한 펄스 전류를 인가하여 –y 축 방향으로 강한 Oersted 자기장 펄스를 생성한다. 이때 인가되는 자기장 펄스는 나노선의 전 영역에 고르게 인가되기 때문에 여러 개의 자구벽도 한 방향으로 균일한 변위만큼 이동시킬 수 있다. 자

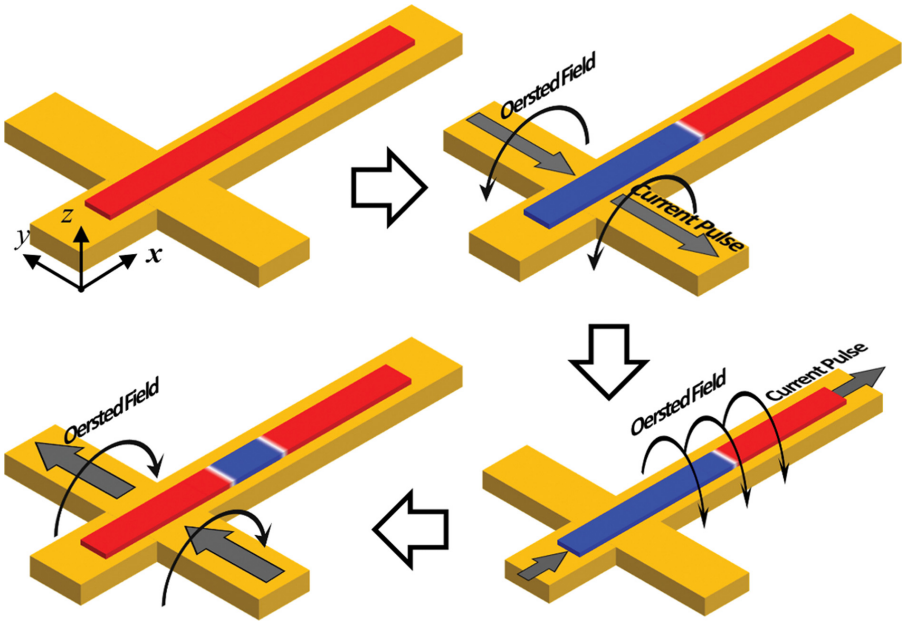

Fig. 4. (Color online) The sequential demonstration of magnetic field pulse induced multiple chiral domain wall nucleation and motion.

구벽이 충분히 이동하면 이번에는 +y 축 방향으로 강한 펄스 전류를 인가하면 이번에는 첫번째 자구벽을 만든 때와는 다르게 자기장이 –z 축 방향으로 국소적인 영역에만 인가되게 된다. 이런 방법으로 두번째 키랄 자구벽을 생성한다. 앞에서 설명한 것과 같이 복수의 자구벽은 모두 동일한 키랄성을 자동으로 가지게 된다. 이런 방법을 순차적으로 지속하면 자구벽을 생성하고 이동하는 것이 가능하게 되고 이는 횡축 자기장 인가 키랄 자구벽 이동을 기반으로 메모리 소자 또는 논리 회로 소자 제작이 가능하다는 사실을 시사한다. 마지막으로 그림으로 표현하지는 않았지만 ± z 축 방향으로 국소적 자기장 펄스 인가가 가능한 시스템이기 때문에 영역내에 존재하는 모든 자구벽을 Oersted 자기장 펄스로 소멸시키는 것이다 가능하다. 상기 사실들을 바탕으로 횡축 자기장 펄스 인가 카릴 자구벽 이동 현상 기반 디바이스 제작은 가능하게 된다.

IV. 결　　론

DMI가 포함된 나노선에서 복수의 자구벽을 만드는 경우 DMI에 의하여 여러 개의 자구벽들은 모두 같은 키랄성을 갖게 된다. 여기에 횡축 방향 자기장 펄스를 인가하는 경우 세차운동 토크에 의하여 복수의 자구벽들은 모두 한쪽 방향으로 이동하게 된다. 한편 댐핑 토크에 의하여 자구 및 자구벽들의 움직임은 제어를 받게 되는데, 두 개의 토크의 경쟁으로 인하여 자구벽들은 일정한 변위를 가지게 된다. 본 연구에서는 자기장 펄스의 하강시간에 변화를 통하여 시스템이 받는 두 개의 토크의 세기를 통제하였고, 자구벽들을 고정시키기 위하여 사각형 노치를 사용했다. 연속적인 횡축 자기장 펄스 인가에 의하여 연속적인 자구벽 이동을 관찰했다. 마지막으로 십자가형 전도성 나노선 위에 존재하는 수직자기이방성 및 DMI를 포함하는 나노선에서 자구벽을 만들고 이동시키는 기술에 대해서 설명했다. 상기 기술은 차세대 비휘발성 메모리 소자 또는 논리 회로 소자로서 응용가치가 크다고 할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2018년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2018R1D1A1B07051237).

References

[1] S. S. P. Parkin, M. Hayashi, and L. Thomas, Science **320**, 190 (2008).
[2] S.-W. Jung, W. Kim, T.-D. Lee, K.-J. Lee, and H.-W. Lee, Appl. Phys. Lett. **92**, 202508 (2008).
[3] T. A. Moore, I. M. Miron, G. Gaudin, G. Serret, S. Auffret, B. Rodmacq, A. Schuhl, S. Pizzini, J. Vogel, and M. Bonfim, Appl. Phys. Lett. **93**, 262504 (2008).
[4] I. M. Miron, T. Moore, H. Szambolics, L. D. Buda-Prejbeanu, S. Auffret, B. Rodmacq, S. Pizzini, J. Vogel, M. Bonfim, A. Schuhl, and G. Gaud, Nat. Mater. **10**, 419 (2011).
[5] P. P. J. Haazen, E. Murè, J. H. Franken, R. Lavrijsen, H. J. M. Swagten, and B. Koopmans, Nat. Mater. **12**, 299 (2013).
[6] J. Ryu, K.-J. Lee, and H.-W. Lee, Appl. Phys. Lett. **102**, 172404 (2013).
[7] J. Cho, N.-H. Kim, S. Lee, J.-S. Kim, R. Lavrijsen, A. Solignac, Y. Yin, D.-S. Han, N. J. J. van Hoof, H. J. M. Swagten, B. Koopmans, and C.-Y. You, Nat. Commun. **6**, 7635 (2015).
[8] G. Chen, T. Ma, A. T. N'Diaye, H. Kwon, C. Won, Y. Wu, and A. K. Schmid, Nat. Commun. **4**, 2671 (2013).
[9] K.-J. Kim, J.-C. Lee, and S.-B. Choe, J. Magn. **14**, 101 (2009).
[10] Y. Zhang, S. Luo, X. Yang, and Chang Yang, Sci. Rep. **7**, 2047 (2017).
[11] J.-S. Kim, H.-K. Hwang, and C.-Y. You, J. Magn. Magn. Mater. **445**, 103 (2018).
[12] J.-S. Kim, H.-J. Lee, J.-I. Hong, and C.-Y. You, J. Magn. Magn. Mater. **445**, 45 (2018).
[13] J. Cho, K.-W. Kim, M.-J. Lee, H.-J. Lee, and J.-S. Kim, J. Phys.: Condens. Matter **33**, 015803 (2021).
[14] http://math.nist.gov/oommf.
[15] J. Jung, J. Cho, H.-C. Choi, K. Lee, C.-Y. You, S.-B. Choe, and J.-S. Kim, Appl. Phys. Lett. **118**, 2624 (2021).
[16] K. Lee, J. Cho, C.-K. Lee, J. Kim, C.-Y. You, M. Byun, and J.-S. Kim, J. Magn. Magn. Mater. **512**, 167057 (2020).
[17] D. Kumar, T. Jin, S. Al Risi, R. Sbiaa, W. S. Lew, and S. N. Piramanayagam, IEEE Tans. Magn. **55**, 2300708 (2019).