(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2009-0059250
(43) 공개일자 2009년06월11일

(51) Int. Cl.
G11B 9/02 (2006.01) *G11C 11/22* (2006.01)
(21) 출원번호 10-2007-0126001
(22) 출원일자 2007년12월06일
심사청구일자 2007년12월06일

(71) 출원인
고려대학교 산학협력단
서울 성북구 안암동5가1 고려대학교 내
포항공과대학교 산학협력단
경상북도 포항시 남구 효자동 산31 포항공과대학교내
(72) 발명자
이경진
서울 성북구 종암동 삼성래미안아파트 104동 1301호
이현우
경북 포항시 남구 지곡동 756 교수숙소 9동 1902호
정순욱
경북 포항시 남구 지곡동 포항공과대학교 대학원 아파트 1동1303호
(74) 대리인
현종철

전체 청구항 수 : 총 19 항

(54) 나노선 및 이를 이용한 전류 인가 자벽 이동을 이용한메모리 소자

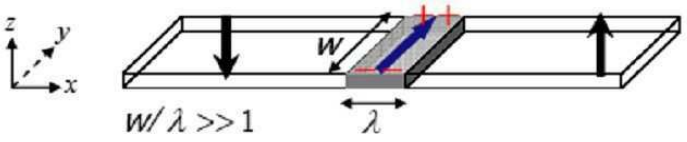
(57) 요 약

나노선 및 이를 이용한 전류 인가 자벽 이동을 이용한 메모리 소자가 개시된다.

본 발명에 따른 나노선은, 수직 자기 이방성을 가지는 나노선에 있어서, 상기 나노선의 구성 물질인 강자성체의 단위면적당 포화 자화양, 자벽 두께 및 스핀 분극률에 의해 연산 되는 전류 밀도 Q가 $3\times10^{8} A/cm^{2} \le Q \le 10^{9} A/cm^{2}$일 때, 상기 나노선의 자벽 두께 λ, 상기 나노선의 선 폭 W 및 상기 나노선의 두께 T에 따른 W/λ 및 T/λ가 $\frac{1.39}{\sqrt{T/\lambda}}+4.51 \le \frac{W}{\lambda} \le \frac{1.53}{\sqrt{T/\lambda}}+4.44$에 의해 구성된다.

본 발명에 의하면, 수직이방성을 가지는 나노선에서 주어진 재료에 대하여 자벽이동을 시키기 위한 임계전류밀도가 상용화를 위해 요구되는 특정값 이하를 만족하는 최적의 나노선 폭 및 두께를 결정하여, 전류 구동 자벽 이동을 이용한 메모리 소자를 구동할 수 있는 전류 밀도가 $10^{7} A/cm^{2}$ 이하가 되도록 설계할 수 있어서, 현재 상용되고 있는 나노선에서의 자벽 이동을 시키기 위한 전류 밀도보다 적어도 10배 이상 낮은 값을 가지므로, 고 전력 소모 및 주울열에 의한 소자의 오작동 문제를 해결할 수 있으며, 저렴한 비용으로 메모리 소자를 제작할 수 있는 효과가 있다.

대 표 도 - 도3a



특허청구의 범위

청구항 1

수직 자기 이방성을 가지는 나노선에 있어서,

상기 나노선의 구성 물질인 강자성체의 단위면적당 포화 자화양, 자벽 두께 및 스핀 분극률에 의해 연산 되는 전류 밀도 Q가 $3\times10^{8}A/cm^{2} \le Q \le 10^{9}A/cm^{2}$일 때, 상기 나노선의 자벽 두께 λ, 상기 나노선의 선폭 W 및 상기 나노선의 두께 T에 따른 W/λ 및 T/λ가 하기의 식 1에 따라 구성되는 나노선.

$$\frac{1.39}{\sqrt{T/\lambda}}+4.51 \le \frac{W}{\lambda} \le \frac{1.53}{\sqrt{T/\lambda}}+4.44 \quad (1)$$

청구항 2

제 1 항에 있어서,

상기 나노선의 구성 물질은 Fe, Co, Ni 및 이들의 혼합물 중에서 선택된 어느 하나로 이루어지는 것을 특징으로 하는 나노선.

청구항 3

제 1 항에 있어서,

상기 나노선의 구성 물질은 희토류 금속을 포함하는 것을 특징으로 하는 나노선.

청구항 4

수직 자기 이방성을 가지는 나노선에 있어서,

상기 나노선의 구성 물질인 강자성체의 단위면적당 포화 자화양, 자벽 두께 및 스핀 분극률에 의해 연산 되는 전류 밀도 Q가 $10^{8}\ A/cm^{2} < Q \le 3\times10^{8}\ A/cm^{2}$일 때, 상기 나노선의 자벽 두께 λ, 상기 나노선의 선 폭 W 및 상기 나노선의 두께 T에 따른 W/λ 및 T/λ가 하기의 식 2에 따라 구성되는 나노선.

$$\frac{1.27}{\sqrt{T/\lambda}}+4.55 \le \frac{W}{\lambda} \le \frac{1.68}{\sqrt{T/\lambda}}+4.37 \quad (2)$$

청구항 5

제 4 항에 있어서,

상기 나노선의 구성 물질은 Fe, Co, Ni 및 이들의 혼합물 중에서 선택된 어느 하나로 이루어지는 것을 특징으로 하는 나노선.

청구항 6

제 4 항에 있어서,

상기 나노선의 구성 물질은 희토류 금속을 포함하는 것을 특징으로 하는 나노선.

청구항 7

수직 자기 이방성을 가지는 나노선에 있어서,

상기 나노선의 구성 물질인 강자성체의 단위면적당 포화 자화양, 자벽 두께 및 스핀 분극률에 의해 연산 되는

전류 밀도 Q가 $3\times10^{7}\ \mathrm{A/cm^2} < Q \leq 10^{8}\ \mathrm{A/cm^2}$일 때, 상기 나노선의 자벽 두께 λ, 상기 나노선의 선 폭 W 및 상기 나노선의 두께 T에 따른 W/λ 및 T/λ가 하기의 식 3에 따라 구성되는 나노선.

$$\frac{0.91}{\sqrt{T/\lambda}}+4.68 \leq \frac{W}{\lambda} \leq \frac{2.18}{\sqrt{T/\lambda}}+4.14 \quad (3)$$

청구항 8

제 7 항에 있어서,

상기 나노선의 구성 물질은 Fe, Co, Ni 및 이들의 혼합물 중에서 선택된 어느 하나로 이루어지는 것을 특징으로 하는 나노선.

청구항 9

제 7 항에 있어서,

상기 나노선의 구성 물질은 희토류 금속을 포함하는 것을 특징으로 하는 나노선.

청구항 10

수직 자기 이방성을 가지는 나노선에 있어서,

상기 나노선의 구성 물질인 강자성체의 단위면적당 포화 자화양에 의해 연산 되는 전류 밀도 Q가 $10^{7}\ \mathrm{A/cm^2} < Q \leq 3\times10^{7}\ \mathrm{A/cm^2}$일 때, 상기 나노선의 자벽 두께 λ, 상기 나노선의 선 폭 W 및 상기 나노선의 두께 T에 따른 W/λ 및 T/λ가 하기의 식 4에 따라 구성되는 나노선.

$$\frac{0.014}{\sqrt{T/\lambda}}+4.92 \leq \frac{W}{\lambda} \leq \frac{4.23}{\sqrt{T/\lambda}}+3.19 \quad (4)$$

청구항 11

제 10 항에 있어서,

상기 나노선의 구성 물질은 Fe, Co, Ni 및 이들의 혼합물 중에서 선택된 어느 하나로 이루어지는 것을 특징으로 하는 나노선.

청구항 12

제 10 항에 있어서,

상기 나노선의 구성 물질은 희토류 금속을 포함하는 것을 특징으로 하는 나노선.

청구항 13

수직 자기 이방성을 가지는 나노선에 있어서,

상기 나노선의 구성 물질인 강자성체의 단위면적당 포화 자화양, 자벽 두께 및 스핀 분극률에 의해 연산 되는 전류 밀도 Q가 $7\times10^{6}\ \mathrm{A/cm^2} < Q \leq 10^{7}\ \mathrm{A/cm^2}$일 때, 상기 나노선의 자벽 두께 λ, 상기 나노선의 선 폭 W 및 상기 나노선의 두께 T에 따른 W/λ 및 T/λ가 하기의 식 5에 따라 구성되는 나노선.

$$\frac{0}{\sqrt{T/\lambda}}+4.05 \leq \frac{W}{\lambda} \leq \frac{9.89}{\sqrt{T/\lambda}}+1.22 \quad (5)$$

청구항 14

제 13 항에 있어서,

상기 나노선의 구성 물질은 Fe, Co, Ni 및 이들의 혼합물 중에서 선택된 어느 하나로 이루어지는 것을 특징으로 하는 나노선.

청구항 15

제 13 항에 있어서,

상기 나노선의 구성 물질은 희토류 금속을 포함하는 것을 특징으로 하는 나노선.

청구항 16

수직 자기 이방성을 가지는 나노선에 있어서,

상기 나노선의 구성 물질인 강자성체의 단위면적당 포화 자화양, 자벽 두께 및 스핀 분극률에 의해 연산 되는 전류 밀도 Q가 $Q \leq 7\times10^{6}\ \mathrm{A/cm^2}$일 때, 상기 나노선의 자벽 두께 λ, 상기 나노선의 선 폭 W 및 상기 나노선의 두께 T에 따른 W/λ 및 T/λ가 하기의 식 6에 따라 구성되는 나노선.

$$\frac{W}{\lambda} \leq \frac{13.5}{\sqrt{T/\lambda}}+0.296 \quad (6)$$

청구항 17

제 16 항에 있어서,

상기 나노선의 구성 물질은 Fe, Co, Ni 및 이들의 혼합물 중에서 선택된 어느 하나로 이루어지는 것을 특징으로 하는 나노선.

청구항 18

제 16 항에 있어서,

상기 나노선의 구성 물질은 희토류 금속을 포함하는 것을 특징으로 하는 나노선.

청구항 19

제 1 항 내지 제 18 항 중 어느 한 항에 따른 나노선을 포함하는 전류 인가 자벽 이동을 이용한 메모리 소자.

명 세 서

발명의 상세한 설명

기 술 분 야

<1> 본 발명은 나노선에 관한 것으로서, 더욱 상세하게는 강자성체로 구성된 나노선에 전류를 인가하여 자벽을 이동시킴으로써 낮은 전류 밀도로 저장장치를 구성할 수 있는 나노선 및 이를 이용한 전류 인가 자벽 이동을 이용한 메모리 소자에 관한 것이다.

배 경 기 술

<2> 강자성체는 외부에서 강한 자기장을 걸어주었을 때 그 자기장의 방향으로 강하게 자화된 뒤 외부 자기장이 사라져도 자화가 남아 있는 물질을 말한다. 이런 경우 물질을 이루는 각각의 원자가 하나의 자석과 같다.

<3> 즉, 강자성체는 자석과 같은 성질을 갖는 물질을 말하며, 철, 코발트, 니켈 및 그 합금이 대표적이다. 강자성체에서는 개개의 원자가 자석과 같은 역할을 하는데, 이들 원자들은 외부의 자기장이 걸려 있지 않은 상황에서는 상대적으로 덜 규칙적으로 정렬해 있기 때문에 전체적으로 자석과 같은 효과는 없다. 그러나 외부에서 자석을 갖다대면 그 원자들이 외부 자기장의 방향으로 배열하려 하기 때문에 자석에 달라붙게 된다. 이렇게 외부 자기장의 영향으로 원자들이 일정한 방향으로 배열하는 것을 '자화'라고 하며, 자화된 물질은 그 자신이 자석처럼 다른 강자성체를 잡아당길 수 있다.

<4> 강자성체에서는 여러 전자들의 스핀이 같은 방향으로 평행하게 정렬되어 있어서 자화의 원인인 자기모멘트가 합성되어 커져 있는 것으로 알려져 있다. 또 자기구역은 평행을 이룬 스핀의 집단이 모여 있는 것으로 여겨지고 있으며, 자기장 안에서는 자기장 방향과 맞는 방향으로 스핀이 정렬되어 있는 자기구역이 생성 또는 확장되고, 자기장이 없어진 후에도 그 방향으로 장시간 향하고 있기 때문에 잔류자화가 나타난다. 따라서 온도를 높이면 열운동 때문에 그 배열이 흐트러져, 강자성을 잃고 상자성체가 된다. 이 온도를 퀴리온도라 한다. 영구자석을 비롯하여 투자재료, 자기변형재료 등으로 사용된다.

<5> 한편, 강자성체로 구성된 나노선에 전류를 인가하여 자벽을 이동시키는 것을 이용한 메모리 소자는 최근 IBM에서 제안된 신개념 메모리 소자이다.

<6> 도 1은 종래의 강자성체로 구성된 나노선의 메모리 소자를 도시한 것이다.

<7> 도 1을 참조하면, 종래의 강자성체로 이루어진 나노선(100)에 자화 방향이 나노선의 막면에 수평인 서로 다른 방향의 자화를 가지는 자구(110, 120)의 자화 방향을 기록하고, 전류인가 자벽 이동이라는 물리적 형상을 이용하여 자구를 이동시킨다.

<8> 한편, 도 1에서 볼 수 있는 바와 같이 종래의 강자성체로 이루어진 나노선(100)은 선폭(W)이 수 nm에서 수백 nm를 가지고, 두께(T) 역시 수 nm에서 수백 nm를 가진다

<9> 이때, 나노선에 가까이 위치하는 기록 및 재생소자(130,140,150)에 의해 자구의 정보가 기록 및 재생된다. 이 기술의 장점은 정보 기록 및 재생 소자의 위치가 고정되어 있고, 정보가 담긴 자구의 위치를 전기적으로 움직일 수 있다는 점에 있다.

<10> 기존의 하드디스크는 높은 기록 밀도, 비휘발성이라는 장점에도 불구하고 기계적으로 움직이는 헤드 때문에 충격에 약하고 고전력을 소비하는 문제로 인해 모바일 저장장치로 활용이 제한되어 왔다.

<11> 또한, 모바일 저장장치로 많이 활용되고 있는 플래쉬메모리는 각 저장 단위 당 CMOS 트랜지스터가 하나씩 삽입되어야 하기 때문에 제조공정이 매우 비싸다는 한계를 가지고 있다.

<12> 그러나, 본 발명이 속하는 전류인가 자벽 이동 메모리 소자는 각 저장 단위 당이 아니라 각 나노선 당 하나의 CMOS 트랜지스터가 필요하며, 각 나노선이 많은 양의 정보를 저장할 수 있기 때문에 플래쉬메모리의 고가격문제를 해결할 수 있고, 또한 하드디스크의 핵심적인 역할을 하는 기계적인 회전 운동이 기계적 운동이 없는 자벽 이동으로 대체되었기 때문에 기존 하드디스크의 장점인 높은 저장밀도와 비휘발성의 장점을 유지하면서도 충격에 강하고 저전력을 소비하는 저장장치로 매우 큰 장점이 있다.

<13> 기계적인 부분을 전기적인 부분으로 대체하여 하드디스크의 저장밀도와 비휘발성의 장점을 가지면서도 동시에 충격에 강하고 저전력을 소비하는 저장장치로 매우 큰 장점이 있다.

<14> 이 기술에 있어서 가장 핵심이 되는 부분은 전류에 의해 자벽이 이동되는 현상인데, 80년대 L. Berger에 의해서 처음 이론적으로 제안된 이후, 최근 Yamaguchi, Klaui, Parkin 등의 여러 연구진에서 실험적으로 자벽의 이동이 관측되었다.

<15> 그러나, 지금까지 보고된 실험연구에서, 자기장을 인가하지 않고 전류만을 이용하여 자벽 이동을 시키기위한 임계전류밀도는 약 $10^8 A/cm^2$으로, 상용화를 위해 요구되는 $10^7 A/cm^2$에 비해 10 내지 100배 이상 크다.

<16> 이와 같이, 임계 전류 밀도가 크게 되면, 전류 인가를 위하여 매우 높은 전력이 소모되며, 또한 주울 열 발생으로 인하여 자벽 이동을 조절할 수 없다는 문제가 있다.

발명의 내용

해결 하고자하는 과제

<17> 본 발명이 해결하고자 하는 첫 번째 과제는 강자성체로 구성된 나노선에 낮은 밀도의 전류를 인가했을 때도 자벽이 이동하도록 하는 조건을 확립하여 낮은 전류 밀도로 저장장치를 구성할 수 있는 나노선을 제공하는 것이다.

<18> 그리고, 본 발명이 해결하고자 하는 두 번째 과제는 상기 나노선을 포함하는 전류 인가 자벽 이동을 이용한 메모리 소자를 제공하는 것이다.

과제 해결수단

<19> 상기 첫 번째 과제를 해결하기 위하여 본 발명은,

<20> 수직 자기 이방성을 가지는 나노선에 있어서, 상기 나노선의 구성 물질인 강자성체의 단위면적당 포화 자화양, 자벽 두께 및 스핀 분극률에 의해 연산 되는 전류 밀도 Q가 $3\times10^{8}A/cm^{2} \le Q \le 10^{9}A/cm^{2}$일 때, 상기 나노선의 자벽 두께 λ, 상기 나노선의 선 폭 W 및 상기 나노선의 두께 T에 따른 W/λ 및 T/λ가

$$\frac{1.39}{\sqrt{T/\lambda}}+4.51 \le \frac{W}{\lambda} \le \frac{1.53}{\sqrt{T/\lambda}}+4.44$$

에 의해 구성되는 나노선을 제공한다.

<21> 상기 첫 번째 과제를 해결하기 위하여 본 발명은,

<22> 수직 자기 이방성을 가지는 나노선에 있어서, 상기 나노선의 구성 물질인 강자성체의 단위면적당 포화 자화양, 자벽 두께 및 스핀 분극률에 의해 연산 되는 전류 밀도 Q가 $10^{8}\ A/cm^{2} < Q \le 3\times10^{8}\ A/cm^{2}$일 때, 상기 나노선의 자벽 두께 λ, 상기 나노선의 선 폭 W 및 상기 나노선의 두께 T에 따른 W/λ 및 T/λ가

$$\frac{1.27}{\sqrt{T/\lambda}}+4.55 \le \frac{W}{\lambda} \le \frac{1.68}{\sqrt{T/\lambda}}+4.37$$

에 의해 구성되는 나노선을 제공한다.

<23> 상기 첫 번째 과제를 해결하기 위하여 본 발명은,

<24> 수직 자기 이방성을 가지는 나노선에 있어서, 상기 나노선의 구성 물질인 강자성체의 단위면적당 포화 자화양, 자벽 두께 및 스핀 분극률에 의해 연산 되는 전류 밀도 Q가 $3\times10^{7}\ A/cm^{2} < Q \le 10^{8}\ A/cm^{2}$일 때, 상기 나노선의 자벽 두께 λ, 상기 나노선의 선 폭 W 및 상기 나노선의 두께 T에 따른 W/λ 및 T/λ가

$$\frac{0.91}{\sqrt{T/\lambda}}+4.68 \le \frac{W}{\lambda} \le \frac{2.18}{\sqrt{T/\lambda}}+4.14$$

<25> 에 의해 구성되는 나노선을 제공한다.

<26> 상기 첫 번째 과제를 해결하기 위하여 본 발명은,

<27> 수직 자기 이방성을 가지는 나노선에 있어서, 상기 나노선의 구성 물질인 강자성체의 단위면적당 포화 자화양, 자벽 두께 및 스핀 분극률에 의해 연산 되는 전류 밀도 Q가 $10^{7}\ A/cm^{2} < Q \le 3\times10^{7}\ A/cm^{2}$일 때, 상기 나노선의 자벽 두께 λ, 상기 나노선의 선 폭 W 및 상기 나노선의 두께 T에 따른 W/λ 및 T/λ가

$$\frac{0.014}{\sqrt{T/\lambda}}+4.92 \le \frac{W}{\lambda} \le \frac{4.23}{\sqrt{T/\lambda}}+3.19$$

에 의해 구성되는 나노선을 제공한다.

<28> 상기 첫 번째 과제를 해결하기 위하여 본 발명은,

<29> 수직 자기 이방성을 가지는 나노선에 있어서, 상기 나노선의 구성 물질인 강자성체의 단위면적당 포화 자화양, 자벽 두께 및 스핀 분극률에 의해 연산 되는 전류 밀도 Q가 $7\times10^{6}\ \mathrm{A/cm^{2}} < Q \leq 10^{7}\ \mathrm{A/cm^{2}}$일 때, 상기 나노선의 자벽 두께 λ, 상기 나노선의 선 폭 W 및 상기 나노선의 두께 T에 따른 W/λ 및 T/λ가 $\frac{0}{\sqrt{T/\lambda}}+4.05 \leq \frac{W}{\lambda} \leq \frac{9.89}{\sqrt{T/\lambda}}+1.22$ 에 의해 구성되는 나노선을 제공한다.

<30> 상기 첫 번째 과제를 해결하기 위하여 본 발명은,

<31> 수직 자기 이방성을 가지는 나노선에 있어서, 상기 나노선의 구성 물질인 강자성체의 단위면적당 포화 자화양, 자벽 두께 및 스핀 분극률에 의해 연산 되는 전류 밀도 Q가 $Q \leq 7\times10^{6}\ \mathrm{A/cm^{2}}$일 때, 상기 나노선의 자벽 두께 λ, 상기 나노선의 선 폭 W 및 상기 나노선의 두께 T에 따른 W/λ 및 T/λ가 $\frac{W}{\lambda} \leq \frac{13.5}{\sqrt{T/\lambda}}+0.296$ 에 의해 구성되는 나노선을 제공한다.

<32> 한편, 상기 나노선의 구성 물질은 Fe, Co, Ni 및 이들의 혼합물 중에서 선택된 어느 하나로 구성될 수 있다.

<33> 아울러, 상기 나노선의 구성 물질은 희토류 금속을 포함할 수 있다.

<34> 상기 두 번째 과제를 해결하기 위하여 본 발명은,

<35> 상기 나노선을 포함하는 전류 인가 자벽 이동을 이용한 메모리 소자를 제공한다.

효 과

<36> 본 발명에 의하면, 수직이방성을 가지는 나노선에서 주어진 재료에 대하여 자벽이동을 시키기 위한 임계전류밀도가 상용화를 위해 요구되는 특정값 이하를 만족하는 최적의 나노선 폭 및 두께를 결정하여, 전류 구동 자벽 이동을 이용한 메모리 소자를 구동할 수 있는 전류 밀도가 $10^{7}A/cm^{2}$ 이하가 되도록 설계할 수 있어서, 현재 상용되고 있는 나노선에서의 자벽 이동을 시키기 위한 전류 밀도보다 적어도 10배 이상 낮은 값을 가지므로, 고 전력 소모 및 주울열에 의한 소자의 오작동 문제를 해결할 수 있으며, 저렴한 비용으로 메모리 소자를 제작할 수 있는 효과가 있다.

발명의 실시를 위한 구체적인 내용

<37> 본 발명은 종래에 따른 자화 방향이 나노선의 막면에 수평인 방식이 아닌 자화방향이 나노선의 막면에 수직인 방식을 채용하고 나노선의 구조를 최적화하여 자기장을 인가하지 않고 전류만을 이용하여 자벽 이동을 시키기 위한 임계 전류 밀도를 $10^{7}A/cm^{2}$ 이하의 수준으로 낮추는 것이다.

<38> 본 발명의 도 2에 도시된 바와 같이 종래의 자화 방향이 나노선의 막면에 수평인 방식이 아닌 자화 방향이 나노선의 막면에 수직인 방식을 채용한다.

<39> 도 2는 본 발명에 따른 강자성체로 구성된 나노선의 메모리 소자를 도시한 것이다.

<40> 도 2를 참조하면, 종래의 강자성체로 이루어진 나노선(200)에 자화 방향이 나노선의 막면에 수평인 서로 다른 방향의 자화를 가지는 자구(210, 220)의 자화 방향을 기록하고, 전류인가 자벽 이동이라는 물리적 형상을 이용하여 자구를 이동시킨다.

<41> 한편, 도 1에서 볼 수 있는 바와 같이 종래의 강자성체로 이루어진 나노선(200)은 선폭(W)이 수 nm에서 수백 nm를 가지고, 두께(T) 역시 수 nm에서 수백 nm를 가진다

<42> 이때, 나노선에 가까이 위치하는 기록 및 재생소자(230,240,250)에 의해 자구의 정보가 기록 및 재생된다. 이 기술은 정보 기록 및 재생 소자의 위치가 고정되어 있고, 정보가 담긴 자구의 위치를 전기적으로 움직일 수 있다는 점이다.

<43> 강자성 물질로 이루어진 나노선에서, 전류에 의한 자화 거동은 하기의 수학식 1에 따른 운동방정식으로 기술된다.

수학식 1

<44>
$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\gamma \mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}} + \frac{\alpha}{M_s} \mathbf{M} \times \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} + \mathbf{T}_{\text{st}}$$

<45> 상기 수학식 1에서 $\mathbf{M}$은 자화 벡터를 의미하며, γ는 자이로 마그네틱 상수(gyro magnetic coefficient)를 의미하고, $\mathbf{H}_{\text{eff}}$는 모든 유효 자기장 벡터를 의미하며, α는 길버트(Gilbert) 감쇠 상수이며, M_s는 강자성체의 포화 자기량를 의미한다.

<46> 한편, 인가 전류에 의한 스핀토크 $\mathbf{T}_{\text{st}}$는 하기의 수학식 2에 의해 결정된다.

수학식 2

<47>
$$\mathbf{T}_{\text{st}} = -\frac{b_J}{M_s^2} \mathbf{M} \times \left(\mathbf{M} \times \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial x} \right) - \frac{\beta b_J}{M_s} \mathbf{M} \times \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial x}$$

<48> 상기 수학식 2에서, b_J는 $P\mu_B J/eM_s$이며, 여기서 P는 강자성체의 스핀분극율로 0 내지 1의 값을 가지며, $\mu_B (= 9.274 \times 10^{-24} J/T)$는 보어 자자(磁子)(Bohr magneton)을 나타내고, J는 전류 밀도, $e(= 1.6 \times 10^{-19} C)$는 전자의 전하량, M_s는 강자성체의 포화 자기량이다.

<49> 상기 수학식 2에서 첫 번째 항은 단열적(adiabatic) 스핀토크이고, 두 번째 항은 비단열적(non-adiabatic) 스핀토크이며, 상수 β는 상기 단열적 스핀토크에 대한 비단열적 스핀토크의 상대적 크기이다.

<50> 현재 상수 β의 크기에 대해서는 명확한 값이 알려져 있지 않다.

<51> 한편, 자벽이동을 위한 임계 전류 밀도(Intrinsic $J_c = J_c^{in}$)는 하기의 수학식 3과 같은 수식으로 주어진다.

수학식 3

<52>
$$J_c^{in} = \frac{e\gamma\lambda}{P\mu_B}|K_d| = \frac{e\gamma\lambda M_S^2}{2P\mu_B}|N_d| = Q|N_d|$$

<53> 상기 수학식 3에서 $\gamma(= 1.76 \times 10^7 Oe^{-1}\sec^{-1})$는 gyro-magnetic ratio이며, λ는 나노선 두께 방향의 자화 성분의 자벽 근방에서의 분포를 $M_s \tanh[(x-X_{dw})/\lambda]$로 근사화하였을 경우 얻어지는 값으로 자벽의 두께를 나타내며 이는 강자성체의 자기적 성분에 의하여 결정된다.

<54> 한편, 여기서 X_{dw}는 자벽 중심의 위치를 가리키는데, 상기 λ는 하기의 수학식 4에 의한 관계를 가진다.

수학식 4

$$\lambda = \sqrt{\frac{A}{K_U - N_\perp M_S^2/2}}$$

<55>

<56> 상기 수학식 4에서, A는 강자성체의 유효교환상수이며, K_u는 수직자기이방성 에너지밀도이며, $N_\perp$는 나노선 두께방향의 감자 계수(demagnetization factor)이며, N_d는 상기 K_d에 상응하는 자벽 감자 계수로 자벽을 구성하는 자화 벡터의 쌍극 상호 작용(dipole - dipole interaction)에 의해 결정된다.

<57> 그리고, Q는 상기 수학식 3에 기술된 바와 같이, M_s, P 등 나노선을 구성하는 물질에 의해 결정되는 양으로 강자성체의 단위면적당 포화 자화양, 자벽 두께 및 스핀 분극률에 의해 연산 되는 전류 밀도 Q가 $10^6\ \mathrm{A/cm^2} < \mathrm{Q} < 10^9\ \mathrm{A/cm^2}$의 범위 내의 값을 가진다.

<58> 상기 수학식 3은 전류에 의한 스핀 토크(spin toque)의 크기가 자벽 이방성 에너지를 극복하면 자벽이 이동함을 의미한다.

<59> 상기 수학식 3으로부터 본 발명에 따른 자화 방향이 나노선의 막면에 수직인 방식을 채용하여 자기장을 인가하지 않고 전류만을 이용하여 자벽이동을 시키기 위한 임계전류 밀도 J_c를 $10^7 A/cm^2$ 이하인 값으로 만족시키기 위해서는 N_d가 하기의 수학식 5의 요건을 만족하면 된다.

수학식 5

$$|N_d| = \frac{J_c^{in}}{Q} < \frac{10^7}{Q}$$

<60>

<61> 여기서, N_d는 자벽의 감자 계수이기 때문에, 나노선 폭인 W, 나노선의 두께 T와 자벽의 두께 λ가 결정되면 정해지는 물리량이다.

<62> 즉 하기의 수학식 6과 수학식 7에 기술된 바와 같이 N_d는 T/λ과 W/λ만의 함수이다.

<63> 따라서, 자성물질에 따라 전류 밀도 Q가 결정되면, 상기 수학식 5로 인하여 J_c를 $10^7 A/cm^2$ 이하인 값으로 만족시키기 위한 N_d, 즉 나노선의 구조와 관련된 T/λ과 W/λ이 결정된다.

<64> 본 발명은, 주어진 자성물질에 대하여 상기 수학식 5에 근거하여 $J_c{}^{in} < 10^7 A/cm^2$를 만족하는 최적 나노선 구조, 즉 T/λ과 W/λ의 최적 범위에 대한 것이다.

<65> 전술한 바와 같이, 주어진 물질에서 나노선 폭인 W, 나노선의 두께 T를 조절하는 것에 의해 N_d를 임계값 이하로 만들면, 임계전류 밀도를 상용화 가능한 수준인 $10^7 A/cm^2$로 설정할 수 있다.

<66> 한편, N_d는 하기의 수학식 6 내지 수학식 8에 의해 연산될 수 있다.

<67> 편, 수학식 6 내지 수학식 8에 개시된 w는 본 발명에 전체적으로 기술된 W에 대응되고, t는 T에 대응된다.

수학식 6

$$N_d = N_{dx} - N_{dy}$$

$$N_{dx} = \frac{1}{2S\lambda}\int d^3x \int d^3x' K_{xx}(\mathbf{r}-\mathbf{r}')\mathrm{sech}(x'/\lambda)\,\mathrm{sech}(x/\lambda)$$

$$N_{dy} = \frac{1}{2S\lambda}\int d^3x \int d^3x' K_{yy}(\mathbf{r}-\mathbf{r}')\mathrm{sech}(x'/\lambda)\,\mathrm{sech}(x/\lambda)$$

<68>

<69> 상기 수학식 6에서 볼 수 있는 바와 같이 N_d는 N_{d_x}와 N_{d_y}의 차에 의해 연산되고 상기 N_{d_x}와 N_{d_y}에 관한 값도 마찬가지로 수학식 6에 의해 연산되어 진다.

수학식 7

$$\mathcal{N}_{dx} = -\frac{1}{2S\lambda^2}\int dx F(x)\left[\frac{2x}{\lambda\,\sinh(x/\lambda)} - \frac{4x\cosh^2(x/\lambda)}{\lambda\,\sinh^3(x/\lambda)} + \frac{4\cosh(x/\lambda)}{\sinh^2(x/\lambda)}\right]$$

$$F(x) = \frac{4}{3}\left[|x|^3 + \left(x^2+w^2+t^2\right)^{3/2} - \left(x^2+w^2\right)^{3/2} - \left(x^2+t^2\right)^{3/2}\right]$$

$$+4wt\left[w\ln\left(\frac{t+\sqrt{x^2+w^2+t^2}}{\sqrt{x^2+w^2}}\right) + t\ln\left(\frac{w+\sqrt{x^2+w^2+t^2}}{\sqrt{x^2+t^2}}\right) - x\tan^{-1}\left(\frac{wt}{x\sqrt{x^2+w^2+t^2}}\right)\right]$$

$$+2\left[t^2\sqrt{x^2+t^2} + w^2\sqrt{x^2+w^2} - t^2\sqrt{x^2+w^2+t^2} - w^2\sqrt{x^2+w^2+t^2}\right]$$

$$+2\left[tx^2\ln\left(\frac{t+\sqrt{x^2+t^2}}{|x|}\right) + wx^2\ln\left(\frac{w+\sqrt{x^2+w^2}}{|x|}\right)\right]$$

$$-2\left[t\left(x^2+w^2\right)\ln\left(\frac{t+\sqrt{x^2+w^2+t^2}}{\sqrt{x^2+w^2}}\right) + w\left(x^2+t^2\right)\ln\left(\frac{w+\sqrt{x^2+w^2+t^2}}{\sqrt{x^2+t^2}}\right)\right]$$

<70>

<71> 한편, N_{d_x}에 관한 값은 $F(x)$의 값을 이용하여 연산되어 진다. $F(x)$의 연산에 관한 것은 상기 수학식 7과 같다. 수학식 7의 N_{d_x}는 x에 대한 적분이 $-\infty$에서 $+\infty$까지 수행되므로, T/λ과 W/λ에 의해 완벽하게 결정된다.

수학식 8

$$\mathcal{N}_{dy} = -\frac{1}{2S\lambda}\int dx G(x)\frac{2x}{\sinh(x/\lambda)}$$

$$G(x) = 4\left[|x| + \sqrt{x^2+w^2+t^2} - \sqrt{x^2+w^2} - \sqrt{x^2+t^2}\right]$$

$$+4\left[t\ln\left(\frac{t+\sqrt{x^2+t^2}}{|x|}\right) - t\ln\left(\frac{t+\sqrt{x^2+w^2+t^2}}{\sqrt{x^2+w^2}}\right)\right]$$

<72>

<73> 아울러, N_{d_y}에 관한 값은 $G(x)$의 값을 이용하여 연산 된다. 상기 $G(x)$의 연산에 관한 것은 수학식 8과 같다. 수학식 8의 N_{d_y}도 수학식 7의 N_{d_x}와 마찬가지로, x에 대한 적분이 $-\infty$에서 $+\infty$까지 수행되므로, T/λ과 W/λ에 의해 완벽하게 결정된다.

<74> 도 3a 및 도 3c는 자화 방향이 나노선의 막면에 수직인 나노선에서 가능한 두가지 형태의 자벽을 도시한 것이다.

<75> 여기서, x 축은 나노선의 길이 방향을 의미하고, y 축은 나노선의 폭 방향을 의미하며, z 축은 나노선의 두께 방향을 의미한다. 그리고, 상기 도 3a 및 도 3b에서의 λ는 일정방향으로 자화된 자벽의 두께를 의미하며, W는 주어진 물질에서 나노선 폭을, T는 주어진 물질에서 나노선의 두께를 의미한다.

<76> 도 3a는 자화 방향을 근거로 하여 도 3a에 따른 자화형태를 ZYZ 자벽으로 지칭하며, 이는 $W/\lambda \gg 1$인 경우에 안정한 자벽이다. 이에 대응되는 종래의 자화 방향이 나노선의 막면에 수평인 나노선에서는 도 3b에 도시된 바와 같다.

<77> 도 3c는 자화 방향을 근거로 하여 도 3c에 따른 자화형태를 ZXZ 자벽으로 지칭하며, 이는 $W/\lambda \ll 1$인 경우에 안정한 자벽이다. 이에 대응되는 종래의 자화 방향이 나노선의 막면에 수평인 나노선에서은 도 3d에 도시된 바와 같다.

<78> 도 3e는 나노선의 두께 T가 10nm, 나노선의 폭 W가 77nm, 나노선의 포화 자기량 M_s가 400emu/cm^3, 유효 교환상수 A가 1.3×10^{-6}erg/cm인 경우에 수직 자기 이방성 밀도 K_u에 따른 자벽의 두께 λ의 변화를 도시하고 있다.

<79> 도 3e로부터 주어진 나노선의 두께 T와 나노선의 폭 W에서 K_u를 변화시킴으로 인하여 자벽의 두께 λ를 조절하는 것이 가능하다.

<80> 도 3f는 나노선의 두께 T가 10nm, 수직 자기 이방성 밀도 K_u가 1.5×10^{6}erg/cm^3, 나노선의 포화 자기량 M_s가 400emu/cm^3, 유효 교환 상수 A가 1.3×10^{-6}erg/cm인 경우에 나노선의 폭 W에 따른 상기 수학식 3에서의 자벽 이방성 에너지 밀도 K_d의 변화를 도시하고 있다.

<81> 도 3f로부터 주어진 물질 및 구조를 가지는 나노선에서 나노선의 선폭 W를 변화시키는 것에 의해 자벽 이방성 에너지 밀도 K_d가 0의 값이 되도록 설정하는 것이 가능하며, 이때, 상기 자벽 이방성 에너지 밀도 K_d가 0이 되는 지점은 상기 ZYZ의 자벽과 ZXZ 자벽의 에너지가 같은 지점이다.

<82> 따라서, 상기 수학식 6내지 수학식 8에 의거하여 주어진 나노선 물질에서 나노선의 두께 T와 나노선의 폭 W을 조절함으로 인하여 자벽의 감자 계수 N_d또는 자벽 이방성 에너지 밀도 K_d를 0에 가깝게 설계할 수 있으며, 결과적으로 상기 수학식 3에 의거하여 자벽 이동을 위한 임계 전류 밀도 J_c를 현저히 작은 값으로 낮출 수 있다.

<83> 그러면, 임의의 자성물질에 대해, 상기 수학식 5를 이용하여 $J_c^{in} < 10^7 A/cm^2$를 만족하는 자벽의 감자 계수 N_d의 최대값을 정할 수 있다.

<84> 상기 자벽의 감자 계수 N_d가 결정되면, 이를 만족시키는 T/λ과 W/λ의 최적 범위를 결정할 수 있고, 상기 T/λ과 W/λ의 범위는 하기의 수학식 9에 의해 결정할 수 있다.

수학식 9

<85>
$$\frac{a_1}{\sqrt{T/\lambda}} + b_1 \leq \frac{W}{\lambda} \leq \frac{a_2}{\sqrt{T/\lambda}} + b_2$$

<86> 나노선을 구성하는 물질에 의해 전류 밀도 Q가 결정되면, 이에 따라 $J_c^{in} < 10^7 A/cm^2$를 만족하는 T/λ과 W/λ의 범위를 결정할 수 있다.

<87> 도 4는 나노선을 구성하는 물질에 의해 전류 밀도 Q의 범위가 $3\times10^8\ \mathrm{A/cm^2} < Q \leq 10^9\ \mathrm{A/cm^2}$이고, $J_c^{in} < 10^7 A/cm^2$를 만족하는 T/λ과 W/λ의 범위를 도시한 것이다.

<88> 여기서, 수직 자기 이방성을 가지는 강자성체로 구성된 나노선의 구성 물질은 Fe, Co, Ni 및 이들의 혼합물로부터 선택된 어느 하나일 수 있으며, 또한 상기 구성물질은 희토류 금속 중 하나 이상이 포함될 수 있다.

<89> 상기 도 4에서 위쪽 곡선(410)과 아래쪽 곡선(420) 사이의 영역이 $J_c^{in} < 10^7 A/cm^2$를 만족하는 T/λ과 W/λ의 범위가 된다.

<90> 상기 수학식 9와 도 4를 매칭하여 상기 수학식 9의 a_1, a_2, b_1, b_2의 값을 구하면 하기의 수학식 10과 같고, 하기의 수학식 10에 의하여 전류 밀도 Q의 범위가 $3\times10^8\ \mathrm{A/cm^2} < Q \leq 10^9\ \mathrm{A/cm^2}$이고, $J_c^{in} < 10^7 A/cm^2$를 만족하는 T/λ과 W/λ의 범위를 정할 수 있다.

수학식 10

<91> $$\frac{1.39}{\sqrt{T/\lambda}}+4.51 \leq \frac{W}{\lambda} \leq \frac{1.53}{\sqrt{T/\lambda}}+4.44$$

<92> 따라서, 상기 전류 밀도 Q가 정해지면 상기 수학식 10에 의하여 정해진 범위내에서 나노선의 T/λ과 W/λ를 설정하면, 전류 구동 자벽 이동을 이용한 메모리 소자를 구동할 수 있는 전류 밀도가 $10^7 A/cm^2$이하가 되도록 설계할 수 있다.

<93> 도 5는 나노선을 구성하는 물질에 의해 전류 밀도 Q의 범위가 $10^8\ \mathrm{A/cm^2} < Q \leq 3\times10^8\ \mathrm{A/cm^2}$이고, $J_c^{in} < 10^7 A/cm^2$를 만족하는 T/λ과 W/λ의 범위를 도시한 것이다.

<94> 여기서, 수직 자기 이방성을 가지는 강자성체로 구성된 나노선의 구성 물질은 Fe, Co, Ni 및 이들의 혼합물로부터 선택된 어느 하나일 수 있으며, 또한 상기 구성물질은 희토류 금속 중 하나 이상이 포함될 수 있다.

<95> 상기 도 5에서 위쪽 곡선(510)과 아래쪽 곡선(520) 사이의 영역이 $J_c^{in} < 10^7 A/cm^2$를 만족하는 T/λ과 W/λ의 범위가 된다.

<96> 상기 수학식 9와 도 5를 매칭하여 상기 수학식 9의 a_1, a_2, b_1, b_2의 값을 구하면 하기의 수학식 11과 같고, 하기의 수학식 11에 의하여 전류 밀도 Q의 범위가 $10^8\ \mathrm{A/cm^2} < Q \leq 3\times10^8\ \mathrm{A/cm^2}$이고, $J_c^{in} < 10^7 A/cm^2$를 만족하는 T/λ과 W/λ의 범위를 정할 수 있다.

수학식 11

<97> $$\frac{1.27}{\sqrt{T/\lambda}}+4.55 \leq \frac{W}{\lambda} \leq \frac{1.68}{\sqrt{T/\lambda}}+4.37$$

<98> 따라서, 상기 전류 밀도 Q가 정해지면 상기 수학식 11에 의하여 정해진 범위내에서 나노선의 T/λ과 W/λ를 설정하면, 전류 구동 자벽 이동을 이용한 메모리 소자를 구동할 수 있는 전류 밀도가 $10^7 A/cm^2$이하가 되도록 설계할 수 있다.

<99> 도 6은 나노선을 구성하는 물질에 의해 전류 밀도 Q의 범위가 $3\times10^7\ \mathrm{A/cm^2} < Q \leq 10^8\ \mathrm{A/cm^2}$이고, $J_c^{in} < 10^7 A/cm^2$를 만족하는 T/λ과 W/λ의 범위를 도시한 것이다.

<100> 여기서, 수직 자기 이방성을 가지는 강자성체로 구성된 나노선의 구성 물질은 Fe, Co, Ni 및 이들의 혼합물로부터 선택된 어느 하나일 수 있으며, 또한 상기 구성물질은 희토류 금속 중 하나 이상이 포함될 수 있다.

<101> 도 6에서 위쪽 곡선(610)과 아래쪽 곡선(620) 사이의 영역이 $J_c^{in} < 10^7 A/cm^2$를 만족하는 T/λ과 W/λ의 범위가 된다.

<102> 상기 수학식 9와 도 6을 매칭하여 상기 수학식 9의 a_1, a_2, b_1, b_2의 값을 구하면 하기의 수학식 12과 같

고, 하기의 수학식 12에 의하여 전류 밀도 Q의 범위가 $3\times10^{7}\ \mathrm{A/cm^2} < Q \leq 10^{8}\ \mathrm{A/cm^2}$이고, $J_c^{in} < 10^{7} A/cm^{2}$를 만족하는 T/λ과 W/λ의 범위를 정할 수 있다.

수학식 12

$$\frac{0.91}{\sqrt{T/\lambda}} + 4.68 \leq \frac{W}{\lambda} \leq \frac{2.18}{\sqrt{T/\lambda}} + 4.14$$

<103>

<104> 따라서, 상기 전류 밀도 Q가 정해지면 상기 수학식 12에 의하여 정해진 범위내에서 나노선의 T/λ과 W/λ를 설정하면, 전류 구동 자벽 이동을 이용한 메모리 소자를 구동할 수 있는 전류 밀도가 $10^{7} A/cm^{2}$이하가 되도록 설계할 수 있다.

<105> 도 7은 나노선을 구성하는 물질에 의해 전류 밀도 Q의 범위가 $10^{7}\ \mathrm{A/cm^2} < Q \leq 3\times10^{7}\ \mathrm{A/cm^2}$이고, $J_c^{in} < 10^{7} A/cm^{2}$를 만족하는 T/λ과 W/λ의 범위를 도시한 것이다.

<106> 여기서, 수직 자기 이방성을 가지는 강자성체로 구성된 나노선의 구성 물질은 Fe, Co, Ni 및 이들의 혼합물로부터 선택된 어느 하나일 수 있으며, 또한 상기 구성물질은 희토류 금속 중 하나 이상이 포함될 수 있다.

<107> 도 7에서 위쪽 곡선(710)과 아래쪽 곡선(720) 사이의 영역이 $J_c^{in} < 10^{7} A/cm^{2}$를 만족하는 T/λ과 W/λ의 범위가 된다.

<108> 상기 수학식 9와 도 7을 매칭하여 상기 수학식 9의 a_1, a_2, b_1, b_2의 값을 구하면 하기의 수학식 13과 같고, 하기의 수학식 13에 의하여 전류 밀도 Q의 범위가 $10^{7}\ \mathrm{A/cm^2} < Q \leq 3\times10^{7}\ \mathrm{A/cm^2}$이고, $J_c^{in} < 10^{7} A/cm^{2}$를 만족하는 T/λ과 W/λ의 범위를 정할 수 있다.

수학식 13

$$\frac{0.014}{\sqrt{T/\lambda}} + 4.92 \leq \frac{W}{\lambda} \leq \frac{4.23}{\sqrt{T/\lambda}} + 3.19$$

<109>

<110> 따라서, 상기 전류 밀도 Q가 정해지면 상기 수학식 13에 의하여 정해진 범위내에서 나노선의 T/λ과 W/λ를 설정하면, 전류 구동 자벽 이동을 이용한 메모리 소자를 구동할 수 있는 전류 밀도가 $10^{7} A/cm^{2}$이하가 되도록 설계할 수 있다.

<111> 도 8은 나노선을 구성하는 물질에 의해 전류 밀도 Q의 범위가 $7\times10^{6}\ \mathrm{A/cm^2} < Q \leq 10^{7}\ \mathrm{A/cm^2}$이고, $J_c^{in} < 10^{7} A/cm^{2}$를 만족하는 T/λ과 W/λ의 범위를 도시한 것이다.

<112> 여기서, 수직 자기 이방성을 가지는 강자성체로 구성된 나노선의 구성 물질은 Fe, Co, Ni 및 이들의 혼합물로부터 선택된 어느 하나일 수 있으며, 또한 상기 구성물질은 희토류 금속 중 하나 이상이 포함될 수 있다.

<113> 도 8에서 위쪽 곡선(810)과 아래쪽 곡선(820) 사이의 영역이 $J_c^{in} < 10^{7} A/cm^{2}$를 만족하는 T/λ과

W/λ의 범위가 된다.

<114> 상기 수학식 9와 도 8을 매칭하여 상기 수학식 9의 a_1, a_2, b_1, b_2의 값을 구하면 하기의 수학식 14와 같고, 하기의 수학식 14에 의하여 전류 밀도 Q의 범위가 $7\times10^6\ \mathrm{A/cm^2} < Q \leq 10^7\ \mathrm{A/cm^2}$이고, $J_c^{in} < 10^7 A/cm^2$를 만족하는 T/λ과 W/λ의 범위를 정할 수 있다.

수학식 14

<115>
$$\frac{0}{\sqrt{T/\lambda}} + 4.05 \leq \frac{W}{\lambda} \leq \frac{9.89}{\sqrt{T/\lambda}} + 1.22$$

<116> 따라서, 상기 전류 밀도 Q가 정해지면 상기 수학식 14에 의하여 정해진 범위내에서 나노선의 T/λ과 W/λ를 설정하면, 전류 구동 자벽 이동을 이용한 메모리 소자를 구동할 수 있는 전류 밀도가 $10^7 A/cm^2$이하가 되도록 설계할 수 있다.

<117> 도 9는 나노선을 구성하는 물질에 의해 전류 밀도 Q의 범위가 $Q \leq 7\times10^6\ \mathrm{A/cm^2}$이고, $J_c^{in} < 10^7 A/cm^2$를 만족하는 T/λ과 W/λ의 범위를 도시한 것이다.

<118> 여기서, 수직 자기 이방성을 가지는 강자성체로 구성된 나노선의 구성 물질은 Fe, Co, Ni 및 이들의 혼합물로부터 선택된 어느 하나일 수 있으며, 또한 상기 구성물질은 희토류 금속 중 하나 이상이 포함될 수 있다.

<119> 도 9에서 곡선(910)의 아래쪽 영역이 $J_c^{in} < 10^7 A/cm^2$를 만족하는 T/λ과 W/λ의 범위가 된다.

<120> 상기 수학식 9와 도 9를 매칭하여 상기 수학식 9의 a_1, a_2, b_1, b_2의 값을 구하면 하기의 수학식 15와 같고, 하기의 수학식 15에 의하여 전류 밀도 Q의 범위가 $Q \leq 7\times10^6\ \mathrm{A/cm^2}$이고, $J_c^{in} < 10^7 A/cm^2$를 만족하는 T/λ과 W/λ의 범위를 정할 수 있다.

수학식 15

<121>
$$\frac{W}{\lambda} \leq \frac{13.5}{\sqrt{T/\lambda}} + 0.296$$

<122> 따라서, 상기 전류 밀도 Q가 정해지면 상기 수학식 15에 의하여 정해진 범위내에서 나노선의 T/λ과 W/λ를 설정하면, 전류 구동 자벽 이동을 이용한 메모리 소자를 구동할 수 있는 전류 밀도가 $10^7 A/cm^2$이하가 되도록 설계할 수 있다.

<123> 이와 같이 강자성체로 구성된 나노선에서 나노선의 두께 T와 나노선의 폭 W를 조절하여 자벽 이방성 에너지 밀도 K_d를 낮추는 방법은 자화방향이 나노선의 막면에 수직인 방식을 가지는 경우에도 역시 성립된다.

<124> 이는, 도 3e 및 도 3f에 도시된 바와 같이, XYX 자벽과 XZX 자벽의 에너지가 같은 지점에서 자벽 이방성 에너지 밀도 K_d가 0이 되기 때문으로, 기본적인 원리는 자화 방향이 나노선의 막면에 수직인 방식과

자화 방향이 나노선의 막면에 수평인 방식이 상호 동일하다.

<125> 그러나, 실제 나노선을 제작하게 되면, 공정상의 문제로 인하여 전체적인 나노선의 두께 T와 나노선의 폭 W에 따른 임계전류 밀도 J_c의 분포를 가지게 된다.

<126> 도 10a 내지 도 10c는 각각의 수직 자기 이방성 밀도 K_u에 따라 전류 구동 자벽 이동을 이용한 메모리 소자를 구동할 수 있는 전류 밀도가 $10^7 A/cm^2$ 이하가 되도록 설계하기 위하여 구성되는 나노선의 두께 T와 나노선의 폭 W에 대한 컨투어(contour)를 도시한 것이다.

<127> 도 10a 내지 도 10c를 참조하면, 각각의 수직 자기 이방성 밀도 K_u에 따라 메모리 소자를 구동할 수 있는 전류 밀도가 $10^7 A/cm^2$ 이하가 되도록 설계하기 위하여 구성되는 나노선의 두께 T와 나노선의 폭 W이 다른 값을 가짐을 확인할 수 있으며, 상기 컨투어에 해당되는 나노선의 두께 T와 나노선의 폭 W으로 나노선을 구성하면, 메모리 소자를 구동할 수 있는 전류 밀도가 $10^7 A/cm^2$ 이하가 되도록 설계할 수 있다.

<128> 도 11은 자화 방향이 나노선의 막면에 수평인 방식으로 제작된 메모리 소자(IA)(1110)와 본 발명에 따른 메모리 소자(PA)(1120)의 임계전류 밀도 J_c와 나노선의 폭 W의 관계를 나타낸 그래프이다.

<129> 도 11을 참조하면, 종래의 나노선의 막면에 수평인 방식으로 제작된 메모리 소자(IA)의 경우, $Jc < 10^6\ A/cm^2$를 얻기 위해서는 나노선의 폭 또는 두께를 0.1nm 이하의 정밀도록 제작하여야 하는데, 이는 실제 공정상 오차가 많이 발생하여 제작이 불가능하다,

<130> 이에 비하여 본 발명에 따른 메모리 소자(PA)의 경우, 3nm 이하의 정밀도로 제작을 하면 $Jc < 10^6\ A/cm^2$을 달성할 수 있다.

<131> 그리고, 종래의 나노선의 막면에 수평인 방식으로 제작된 메모리 소자(IA)의 경우, $J_c^{in} < 10^7 A/cm^2$를 얻기 위해서는 나노선의 폭 또는 두께를 1nm 이하의 정밀도록 제작하여야 하는데, 마찬가지로, 실제 공정상 오차가 많이 발생하여 제작이 불가능하다,

<132> 이에 비하여 본 발명에 따른 메모리 소자(PA)의 경우, 27nm 이하의 정밀도로 제작을 하면 $J_c^{in} < 10^7 A/cm^2$를 달성할 수 있다.

<133> 한편, 도 11에 도시된 그래프는 스핀 분극률 P가 0.7이고, 단위 면적당 포화 자기량 M_s가 $400 emu/cm^3$이고, 수직 자기 이방성 밀도인 K_u가 $1.5\times10^6 erg/cm^3$이며, 유효 교환 상수 A가 $1.3\times10^{-6} erg/cm^3$이며, 나노선의 두께 T가 10nm이다.

<134> 이때, 형성되는 자벽의 두께 λ는 13nm가 되고, 이 경우 강자성체의 단위면적당 포화 자화양, 자벽 두께 및 스핀 분극률에 의해 연산 되는 전류 밀도 Q는 대략 $8.9\times10^7 A/cm^2$의 값을 가진다.

<135> 이 경우, 강자성체는 도 6에 도시된 범위에 해당하며, 이 범위는 상기 수학식 12에 기술되어 있으므로, 이값을 대입하면, 나노선의 폭 W가 $73.5803nm < W < 85.1894nm$의 범위 내의 모든 값에 대하여 임계 전류

밀도 J_c가 본 발명에서 구현하고자 하는 범위인 $J_c^{in} < 10^7 A/cm^2$을 만족한다.

<136> 이는, 도 11을 참조하면, $J_c^{in} < 10^7 A/cm^2$를 만족하는 나노선의 폭 W의 범위는 $67nm < W < 95nm$이다. 이 범위는 상기 전류 밀도 Q인 $8.9 \times 10^7 A/cm^2$에 의해 연산되는 나노선의 폭 범위를 포함하므로, 이 결과로 보아 본 발명의 수학식 12에 의해 기술되는 나노선의 폭 W의 범위에 대한 정당성이 입증된다.

<137> 이와 같이 본 발명에 따른 메모리 소자(PA)의 경우, 훨씬 넓은 나노선의 폭 또는 두께에서 낮은 임계전류 밀도를 가지는 이유는 본 발명에 따른 메모리 소자(PA)가 종래의 나노선의 막면에 수평인 방식으로 제작된 메모리 소자(IA)에 비하여 자벽 이방성 에너지 밀도 K_d가 나노선의 폭 또는 나노선의 두께에 상대적으로 훨씬 둔감하게 작용하기 때문이다.

<138> 실제로 나노선을 제작하게 되면, 공정상의 불균일도 및 물질의 불균일성으로 인하여 자벽이동에 대해 다양한 피닝 포텐셜(pinning potential)이 존재하게 된다.

<139> 또한 전술한 바와 같이 상기 수학식 1과 2의 β와 자벽 이동시 자벽의 에너지 손실을 결정하는 길버트 댐핑(Gilbert damping) 상수인 α에 임계전류 밀도가 둔감한 특성을 가지는 것이 본 발명에 요구된다.

<140> 도 12a 및 도 12b는 자화 방향이 나노선의 막면에 수평인 방식으로 제작된 메모리 소자(IA)와 본 발명에 따른 메모리 소자(PA)의 임계전류 밀도 J_c와 피닝 포텐셜(pinning potential) V_o를 도시한 그래프이다.

<141> 도 12a 및 도 12b를 참조하면, α 및 β 값에 따라 임계전류 밀도 J_c와 피닝 포텐셜(pinning potential) V_o의 관계를 도시하고 있다.

<142> 도 12a의 경우, 종래의 자화 방향이 나노선의 막면에 수평인 방식으로 제작된 메모리 소자(1210)의 경우, α 값이 0.1일 때 임계 전류 밀도 J_c가 피닝 포텐셜, α 및 β에 대해 매우 민감하며, 실질적인 피닝 포텐셜 값 V_o인 10^5 erg/cm^{3}에서 임계 전류 밀도 J_c가 $10^8 A/cm^2$ 이상의 임계 전류 밀도 값을 나타내어 실용화가 불가능하다.

<143> 이에 비해 본 발명에 따른 메모리 소자(1220)의 경우, 나노선의 두께 T가 10nm이고, 나노선의 폭 W가 81nm일 때, 실제적인 피닝 포텐셜 값인 10^5 erg/cm^{3}에서 임계 전류 밀도가 10^6~10^7 A/cm^{2}을 나타내어 임계 전류 밀도 값이 10배 내지 100배 정도 우수함을 알 수 있다.

<144> 도 12b의 경우, 종래의 자화 방향이 나노선의 막면에 수평인 방식으로 제작된 메모리 소자(1210)의 경우, α 값이 0.01일 때 실질적인 피닝 포텐셜 값인 10^5 erg/cm^{3}에서 임계 전류 밀도가 $10^9 A/cm^2$ 정도의 임계 전류 밀도 값을 나타내어 실용화가 불가능하다.

<145> 이에 비해 본 발명에 따른 메모리 소자(1220)의 경우, 나노선의 두께 T가 10nm이고, 나노선의 폭 W가 81nm일 때, 실제적인 피닝 포텐셜 값인 10^5 erg/cm^{3}에서 임계 전류 밀도가 10^6~10^7 A/cm^{2}을 나타내어 임계 전류 밀도 값이 100배 내지 1000배 정도 우수함을 알 수 있다.

<146> 도 12a 및 도 12b를 참조하면, 종래의 자화 방향이 나노선의 막면에 수평인 방식으로 제작된 메모리 소자(1210)의 경우, 본 발명에 따른 메모리 소자(1220)보다 임계 전류 밀도 J_c가 피닝 포텐셜 V_0, α 및 β에 대해 매우 민감하며, 실질적인 피닝 포텐셜 값인 $10^5\ \mathrm{erg/cm^3}$에서 임계 전류 밀도가 $10^7 A/cm^2$ 이상의 임계 전류 밀도 값을 나타내어 본 발명에 따른 메모리 소자의 임계전류 밀도 값이 월등히 우수한 수치를 나타냄을 알 수 있다.

<147> 본 발명은 도면에 도시된 일 실시예를 참고로 하여 설명하였으나 이는 예시적인 것에 불과하며 당해 분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 이로부터 다양한 변형 및 실시예의 변형이 가능하다는 점을 이해할 것이다. 그러나, 이와 같은 변형은 본 발명의 기술적 보호범위내에 있다고 보아야 한다. 따라서, 본 발명의 진정한 기술적 보호범위는 첨부된 특허청구범위의 기술적 사상에 의해서 정해져야 할 것이다.

도면의 간단한 설명

<148> 도 1은 종래의 강자성체로 구성된 나노선의 메모리 소자를 도시한 것이다.

<149> 도 2는 본 발명에 따른 강자성체로 구성된 나노선의 메모리 소자를 도시한 것이다.

<150> 도 3a는 자화 방향이 나노선의 막면에 수직인 나노선에서 가능한 자벽의 일 예를 도시한 것이다.

<151> 도 3b는 도 3b에 대응되는 종래의 나노선의 막면에 수평인 나노선에서의 자벽을 도시한 것이다.

<152> 도 3c는 자화 방향이 나노선의 막면에 수직인 나노선에서 가능한 자벽의 다른 예를 도시한 것이다.

<153> 도 3d는 도 3c에 대응되는 종래의 나노선의 막면에 수평인 나노선에서의 자벽을 도시한 것이다.

<154> 도 3e는 수직 자기 이방성 밀도 K_u에 따른 자벽의 두께 λ의 변화를 도시한 것이다.

<155> 도 3f는 나노선의 폭 W에 따른 자벽 이방성 에너지 밀도 K_d의 변화를 도시한 것이다.

<156> 도 4 내지 도 9는 나노선을 구성하는 물질에 의해 결정되는 전류 밀도 Q의 범위에 따라 $J_c^{in} < 10^7 A/cm^2$를 만족하는 T/λ과 W/λ의 범위를 도시한 그래프이다.

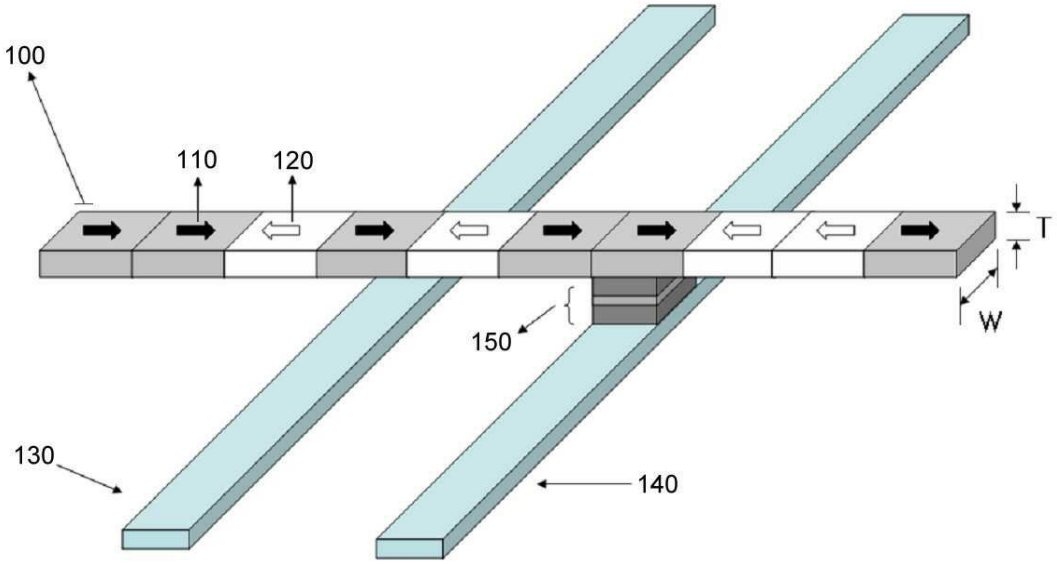
<157> 도 10a 내지 도 10c는 전류 밀도가 $10^7 A/cm^2$ 이하가 되도록 구성되는 나노선의 두께 T와 나노선의 폭 W에 대한 컨투어(contour)를 도시한 것이다.

<158> 도 11은 자화 방향이 나노선의 막면에 수평인 방식으로 제작된 메모리 소자(IA)와 본 발명에 따른 메모리 소자(PA)의 임계전류 밀도 J_c와 나노선의 폭 W의 관계를 나타낸 그래프이다.

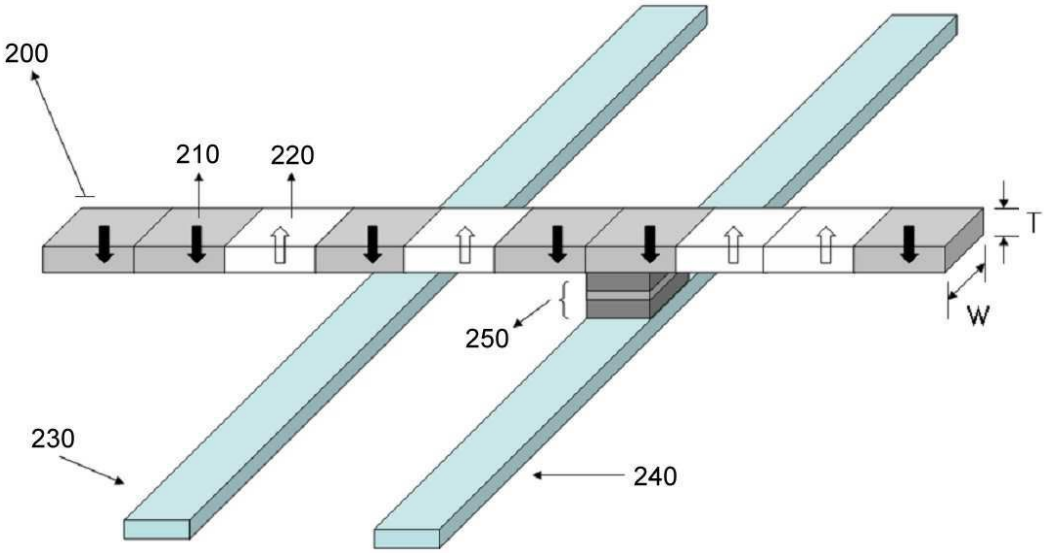
<159> 도 12a 및 도 12b는 자화 방향이 나노선의 막면에 수평인 방식으로 제작된 메모리 소자(IA)와 본 발명에 따른 메모리 소자(PA)의 임계전류 밀도 J_c와 피닝 포텐셜(pinning potential) V_0를 도시한 그래프이다.

도면

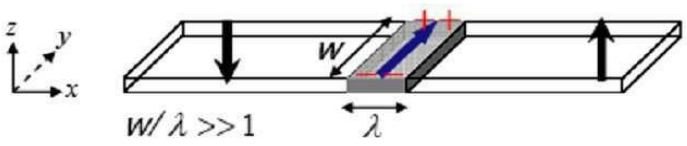
도면1



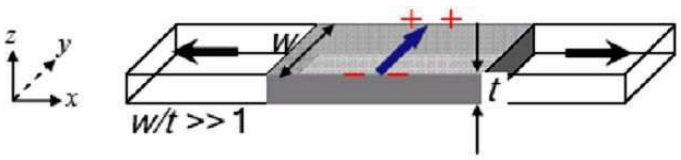
도면2



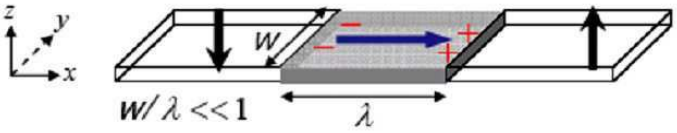
도면3a



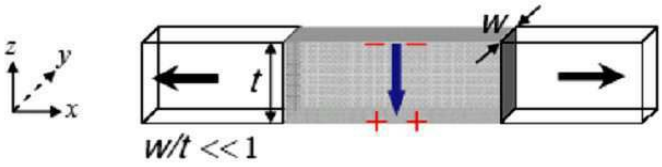
도면3b



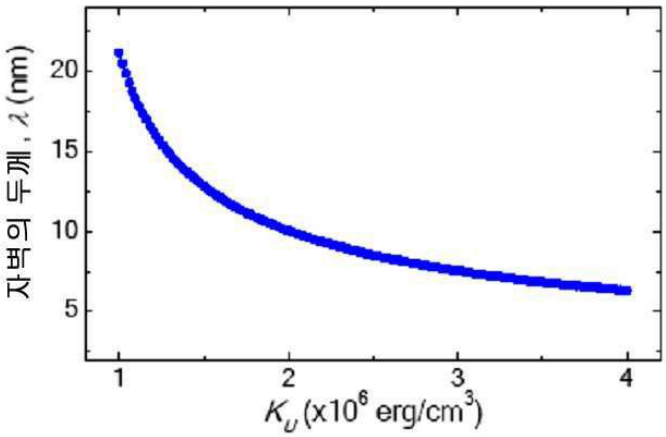
도면3c



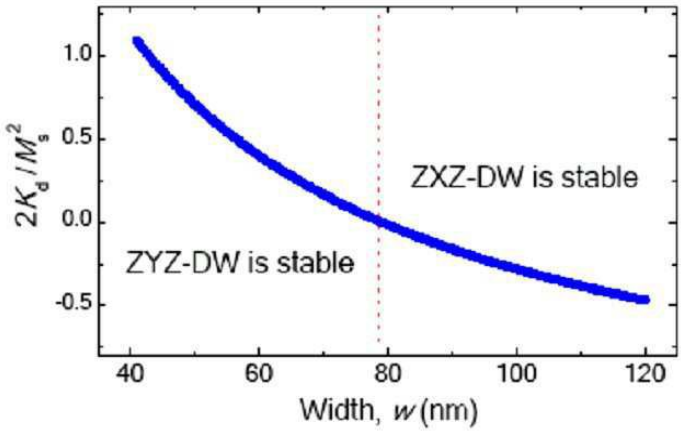
도면3d



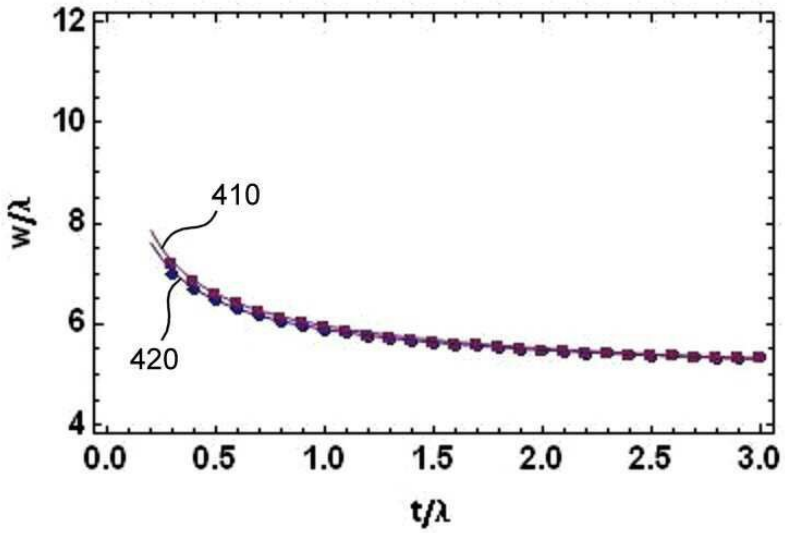
도면3e



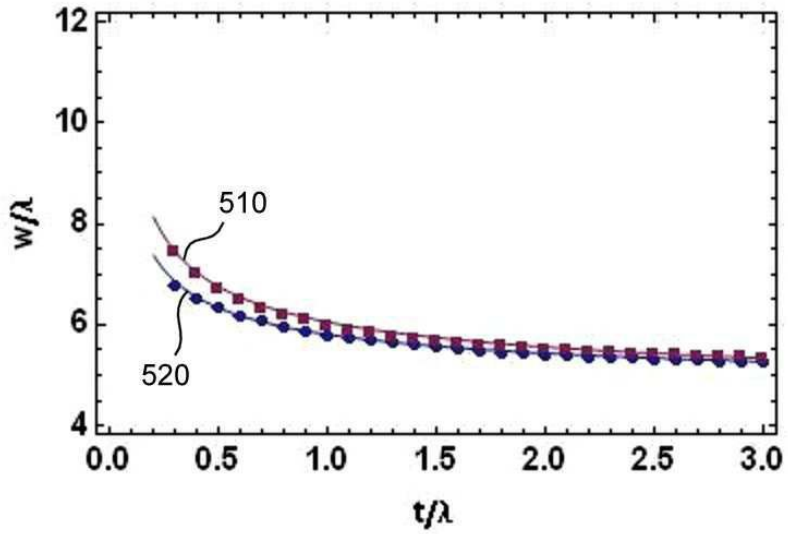
도면3f


1.0
0.5
0.0
-0.5
$2K_d/M_s^2$
ZXZ-DW is stable
ZYZ-DW is stable
40
60
80
100
120
Width, w (nm)

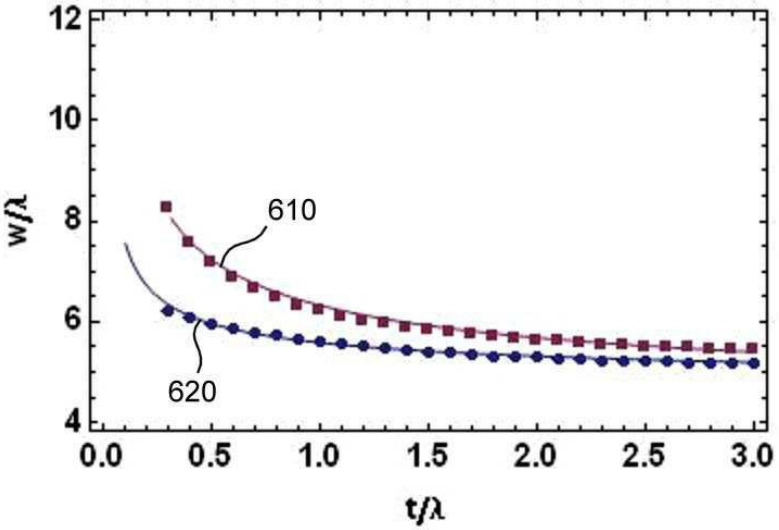
도면4


12
10
8
6
4
w/λ
410
420
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0
2.5
3.0
t/λ

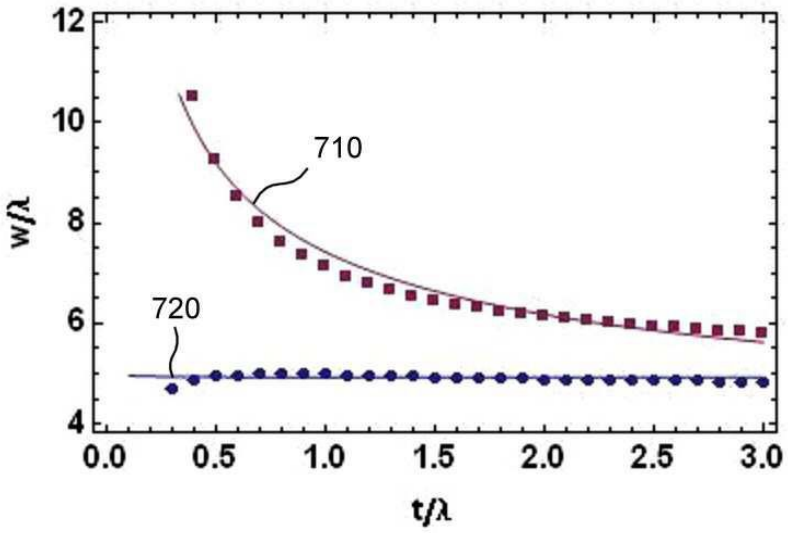
도면5


12
10
8
6
4
w/λ
510
520
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0
2.5
3.0
t/λ

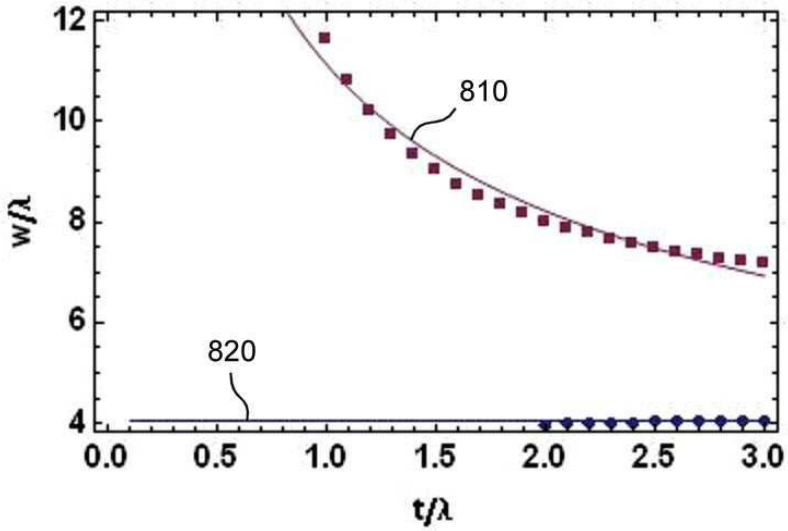
도면6


12
10
8
6
4
w/λ
610
620
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0
2.5
3.0
t/λ

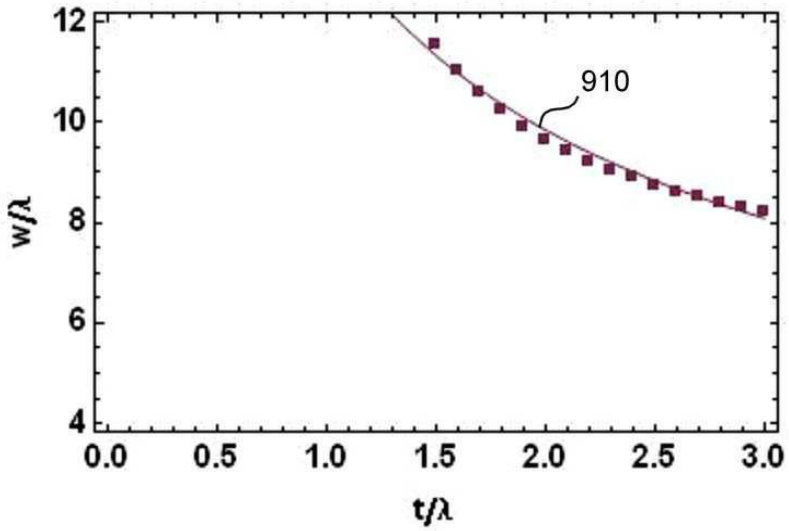
도면7


12
10
8
6
4
w/λ
710
720
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0
2.5
3.0
t/λ

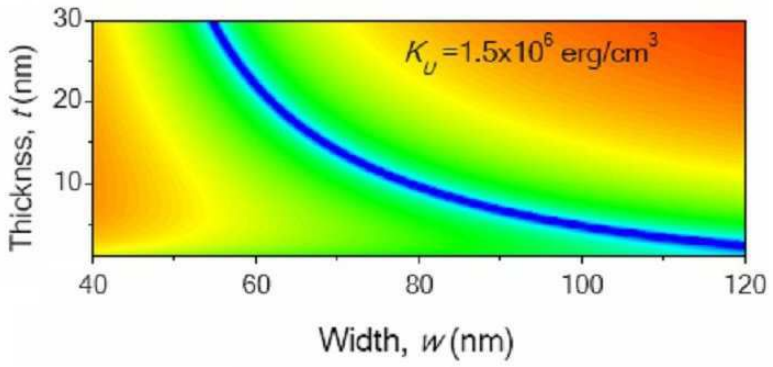
도면8


12
10
8
6
4
w/λ
810
820
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0
2.5
3.0
t/λ

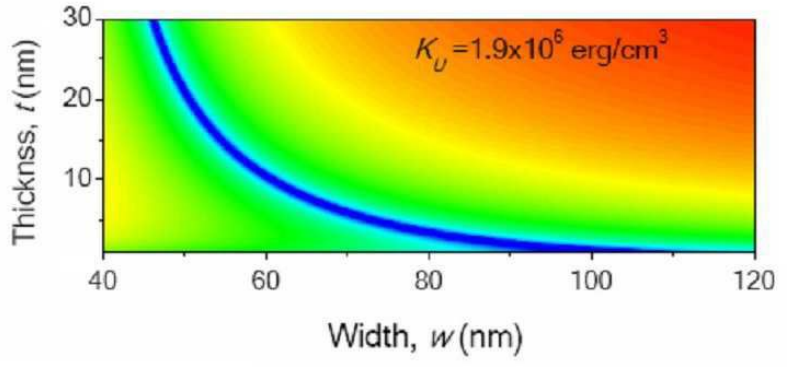
도면9



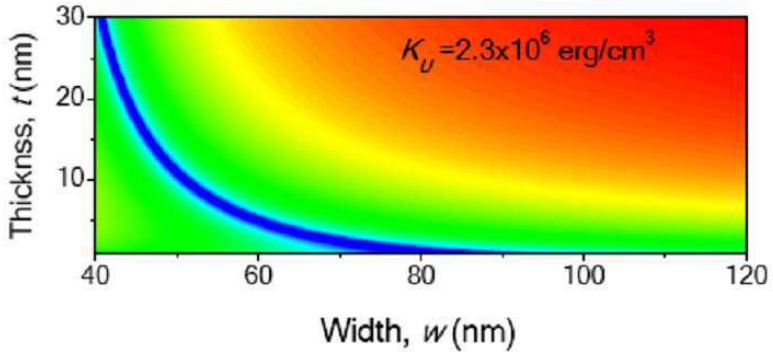
도면10a



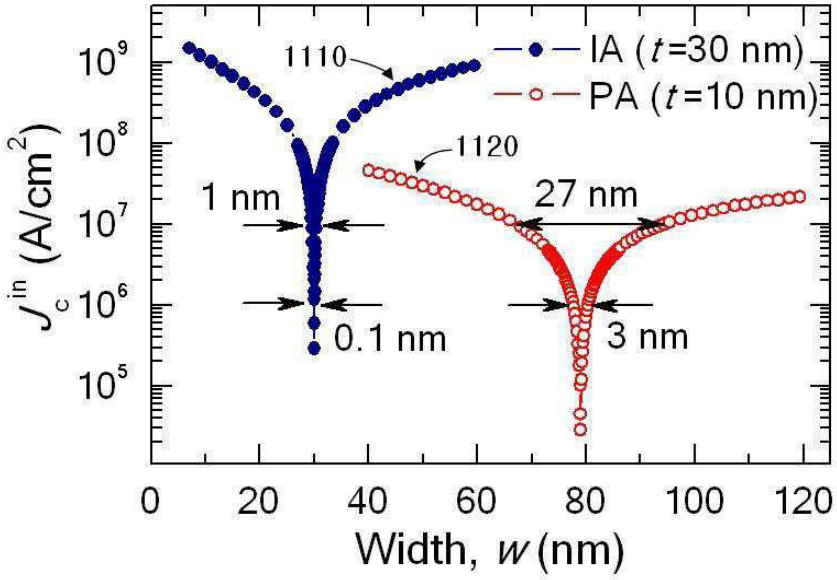
도면10b



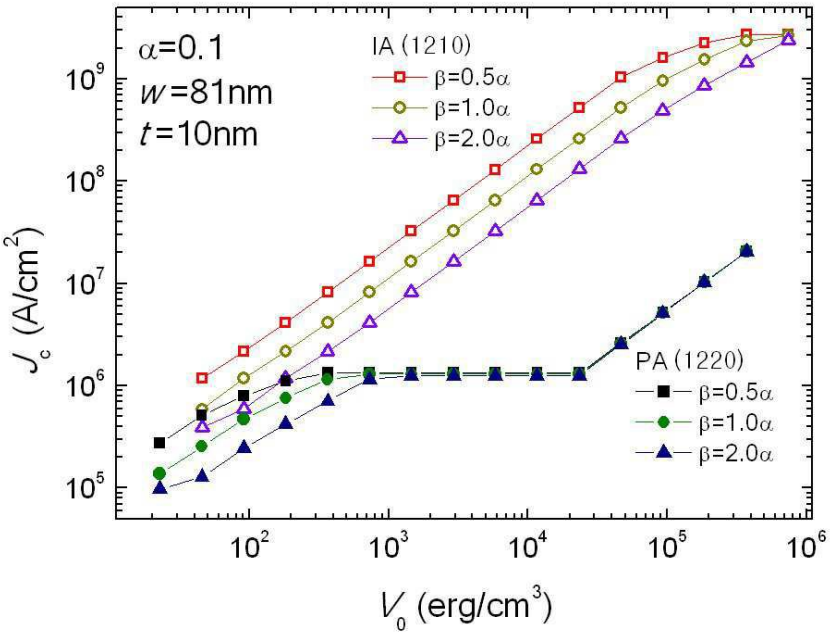
도면10c


K_u=2.3x10^6 erg/cm^3
Thicknss, t(nm)
30
20
10
40
60
80
100
120
Width, w(nm)

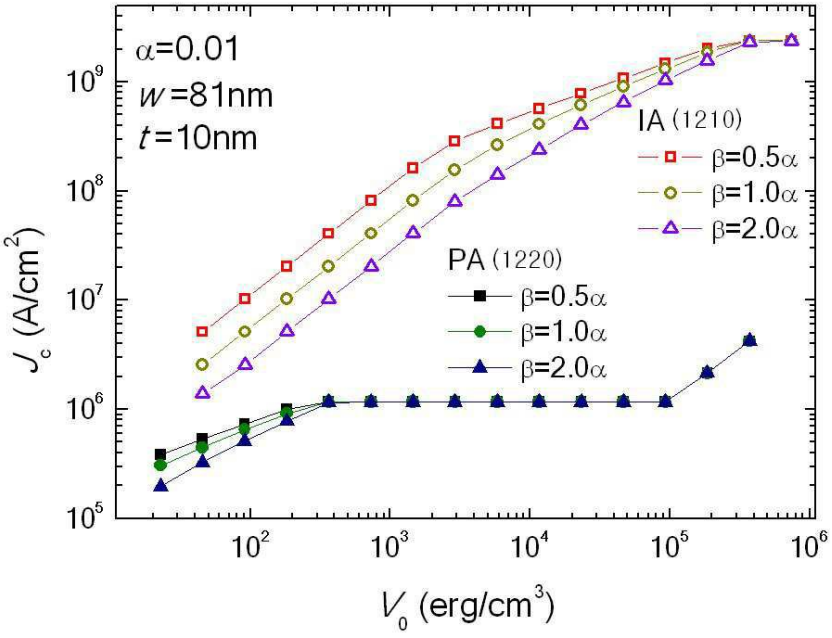
도면11


IA (t=30 nm)
PA (t=10 nm)
1110
1120
1 nm
0.1 nm
27 nm
3 nm
J_c^{in} (A/cm^2)
10^9
10^8
10^7
10^6
10^5
0
20
40
60
80
100
120
Width, w(nm)

도면12a


α=0.1
w=81nm
t=10nm
IA (1210)
β=0.5α
β=1.0α
β=2.0α
PA (1220)
β=0.5α
β=1.0α
β=2.0α
J_c (A/cm^2)
V_0 (erg/cm^3)

도면12b


α=0.01
w=81nm
t=10nm
IA (1210)
β=0.5α
β=1.0α
β=2.0α
PA (1220)
β=0.5α
β=1.0α
β=2.0α
J_c (A/cm^2)
V_0 (erg/cm^3)