



등록특허 10-2396525



(19) 대한민국특허청(KR)

(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2022년05월10일

(11) 등록번호 10-2396525

(24) 등록일자 2022년05월06일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

G11C 11/16 (2006.01) H01L 43/08 (2006.01)

H01L 43/12 (2006.01)

(52) CPC특허분류

G11C 11/1695 (2013.01)

G11C 11/161 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2021-0007764

(22) 출원일자 2021년01월20일

심사청구일자 2021년01월20일

(56) 선행기술조사문헌

US20150071431 A1*

*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자

고려대학교 산학협력단

서울특별시 성북구 안암로 145, 고려대학교 (안암동5가)

(72) 발명자

이경진

서울특별시 노원구 중계로 195 신안동진아파트 105동 305호

박중선

서울특별시 강동구 올림픽로112길 28

(74) 대리인

특허법인 누리

전체 청구항 수 : 총 10 항

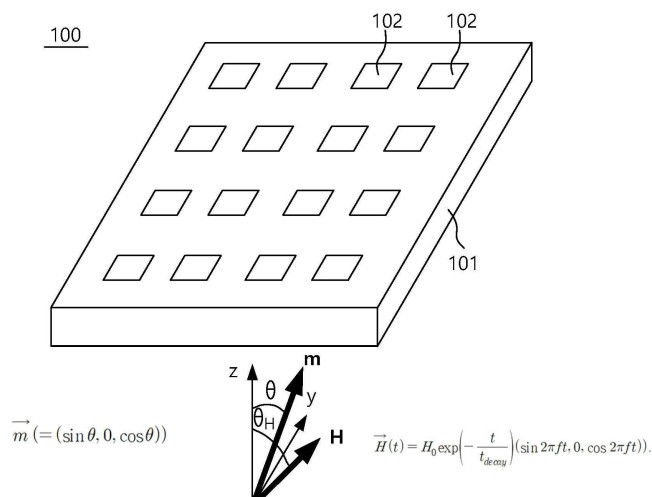
심사관 : 윤석채

(54) 발명의 명칭 물리적 복제 방지 기능 자기 메모리 소자의 동작 방법

(57) 요약

본 발명의 일 실시예에 따른 물리적 복제 방지 기능 자기 메모리 소자는, 기판 상에 배치되고 고정 자성층, 자유 자성층, 및 상기 고정 자성층과 상기 자유 자성층 사이에 개재된 터널절연층 또는 비자성 도전층을 포함하는 복수의 자기 저항 셀들;을 포함한다. 상기 물리적 복제 방지 기능 자기 소자의 동작 방법은, 상기 복수의 자기 저항 셀에 시간에 따라 감쇄하는 외부 자기장을 인가하여 복수의 자기 저항 셀들의 자유 자성층의 자화 방향을 랜덤화한다.

대표도 - 도1



(52) CPC특허분류

H01L 43/08 (2013.01)

H01L 43/12 (2021.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711121367
과제번호	2020M3F3A2A01082591
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	차세대지능형반도체기술개발(R&D)
연구과제명	저전력 스핀토크 소자 기반 보안칩 개발
기 여 율	1/1
과제수행기관명	고려대학교
연구기간	2020.07.01 ~ 2020.12.31

명세서

청구범위

청구항 1

기관 상에 배치되고 고정 자성층, 자유 자성층, 및 상기 고정 자성층과 상기 자유 자성층 사이에 개재된 터널절연층 또는 비자성 도전층을 포함하는 복수의 자기 저항 셀들;을 포함하는 물리적 복제 방지 기능 자기 소자의 동작 방법에 있어서,

상기 복수의 자기 저항 셀에 시간에 따라 감쇄하는 외부 자기장을 인가하여 복수의 자기 저항 셀들의 자유 자성층의 자화 방향을 랜덤화하고,

상기 외부 자기장은 상기 자유 자성층의 자화 용이축을 포함하는 평면 내에서 시간에 따라 회전 주파수(f)로 회전하고,

상기 외부 자기장의 세기는 시간에 따라 감쇄 상수를 가지고 지수 함수적으로 감소하는 것을 특징으로 하는 물리적 복제 방지 기능 자기 메모리 소자의 동작 방법.

청구항 2

삭제

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 회전 주파수(f)는 수 십 Hz 내지 수 백 Hz이고,

상기 감쇄 상수는 상기 회전 주파수의 역수($1/f$)보다 큰 것을 특징으로 하는 물리적 복제 방지 기능 자기 메모리 소자의 동작 방법.

청구항 4

제1 항에 있어서,

상기 회전 주파수(f)는 120 Hz이고,

상기 감쇄 상수는 1 sec인 것을 특징으로 하는 물리적 복제 방지 기능 자기 메모리 소자의 동작 방법.

청구항 5

기관 상에 배치되고 고정 자성층, 자유 자성층, 및 상기 고정 자성층과 상기 자유 자성층 사이에 개재된 터널절연층 또는 비자성 도전층을 포함하는 복수의 자기 저항 셀들;을 포함하는 물리적 복제 방지 기능 자기 소자의 동작 방법에 있어서,

상기 복수의 자기 저항 셀에 시간에 따라 감쇄하는 외부 자기장을 인가하여 복수의 자기 저항 셀들의 자유 자성층의 자화 방향을 랜덤화하고,

상기 외부 자기장의 세기는 감쇄 상수를 가지고 시간에 따라 지수 함수적으로 감소하고,

상기 기관은 상기 자유 자성층의 자화 용이축 방향과 상기 외부 자기장에 의하여 정의된 평면에 수직한 회전축을 중심으로 일정한 주파수로 회전하는 것을 특징으로 하는 물리적 복제 방지 기능 자기 메모리 소자의 동작 방법.

청구항 6

제1항에 있어서,

상기 고정 자성층 및 상기 자유 자성층은 막면에 수직 방향으로 자화된 것을 특징으로 하는 물리적 복제 방지

기능 자기 메모리 소자의 동작 방법.

청구항 7

제1항에 있어서,

상기 고정 자성층 및 상기 자유 자성층은 막면에 수평 방향으로 자화된 것을 특징으로 하는 물리적 복제 방지 기능 자기 메모리 소자의 동작 방법.

청구항 8

기관 상에 배치되고 고정 자성층, 자유 자성층, 및 상기 고정 자성층과 상기 자유 자성층 사이에 개재된 터널절연층 또는 비자성 도전층을 포함하는 복수의 자기 저항 셀들;을 포함하는 물리적 복제 방지 기능 자기 소자의 동작 방법에 있어서,

상기 복수의 자기 저항 셀에 시간에 따라 감쇄하는 외부 자기장을 인가하여 복수의 자기 저항 셀들의 자유 자성층의 자화 방향을 랜덤화하고,

상기 외부 자기장을 인가하는 자기장 인가부;

일정한 방향의 외부 자기장을 시간에 따라 그 세기를 감소시키는 전자석;

상기 기관을 지지하고 상기 기관을 회전시키는 모터;

상기 전자석에 흐르는 전류를 제어하고 상기 모터를 제어하는 제어부; 및

상기 기관과 상기 모터의 회전축을 연결시키고 상기 기관을 지지하는 기관 회전부를 포함하는 것을 특징으로 하는 물리적 복제 방지 기능 자기 메모리 소자의 동작 방법.

청구항 9

기관 상에 배치되고 고정 자성층, 자유 자성층, 및 상기 고정 자성층과 상기 자유 자성층 사이에 개재된 터널절연층 또는 비자성 도전층을 포함하는 복수의 자기 저항 셀들;을 포함하는 물리적 복제 방지 기능 자기 소자의 동작 방법에 있어서,

상기 복수의 자기 저항 셀에 시간에 따라 감쇄하는 외부 자기장을 인가하여 복수의 자기 저항 셀들의 자유 자성층의 자화 방향을 랜덤화하고,

상기 외부 자기장을 인가하는 자기장 인가부;

제1 방향의 제1 자기장을 형성하는 제1 전자석;

상기 제1 방향과 수직한 제2 방향의 제2 자기장을 형성하는 제2 전자석; 및

상기 제1 자기장과 상기 제2 자기장의 벡터 합인 외부 자기장을 상기 제1 방향과 상기 제2 방향에 의하여 정의된 평면에서 시간에 따라 감소하면서 회전하도록 상기 제1 전자석과 상기 제2 전자석에 흐르는 전류를 제어하는 제어부를 포함하고,

상기 제1 방향과 상기 제2 방향에 의하여 정의된 평면은 상기 자유 자성층의 자화 용이축을 포함하는 평면인 것을 특징으로 하는 물리적 복제 방지 기능 자기 메모리 소자의 동작 방법.

청구항 10

제1 방향의 제1 자기장을 형성하는 제1 전자석;

상기 제1 방향과 수직한 제2 방향의 제2 자기장을 형성하는 제2 전자석; 및

상기 제1 자기장과 상기 제2 자기장의 합인 외부 자기장이 상기 제1 방향과 상기 제2 방향에 의하여 정의된 평면에서 시간에 따라 감소하면서 회전하도록 상기 제1 전자석과 상기 제2 전자석에 흐르는 전류를 제어하는 제어부를 포함하고,

물리적 복제 방지 기능 자기 소자는 복수의 터널 접합 셀들을 포함하고,

상기 외부 자기장은 복수의 터널 접합 단위셀들의 자유 자성층의 자화 방향을 랜덤화하고,

상기 제1 방향과 상기 제2 방향에 의하여 정의된 평면은 상기 자유 자성층의 자화 용이축을 포함하는 평면인 것을 특징으로 하는 물리적 복제 방지 기능 자기 메모리 소자에 정보를 기록하는 장치.

청구항 11

일정한 방향의 외부 자기장을 시간에 따라 그 세기를 감소시키는 전자석;

기관을 지지하고 상기 기관을 회전시키는 모터;

상기 전자석에 흐르는 전류를 제어하고 상기 모터를 제어하는 제어부; 및

상기 기관을 장착하고 상기 모터의 회전축을 연결시키는 기관 회전부를 포함하고,

물리적 복제 방지 기능 자기 메모리 소자는 상기 기관 상에 배치된 복수의 터널 접합 셀들을 포함하고,

상기 외부 자기장은 복수의 터널 접합 단위셀들의 자유 자성층의 자화 방향을 랜덤화하고,

상기 기관은 상기 자유 자성층의 자화 용이축 방향과 상기 외부 자기장에 의하여 정의된 평면에 수직인 회전축을 중심으로 일정한 주파수(f)로 회전하는 것을 특징으로 하는 물리적 복제 방지 기능 자기 메모리 소자에 정보를 기록하는 장치.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 자기 메모리 소자의 동작 방법에 관한 것으로서, 더욱 상세하게는 자기 메모리 소자를 이용하여 물리적 복제 방지 기능 (Physically Unclonable Function: PUF)을 구현하는 동작 방법과 이를 위한 장치에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 최근 스마트 기기를 금융 거래나 무인 자동차 분야에 활용하는 등 다양한 IoT 환경에서 정보 전송이 빈번히 이루어지고 있다. 이에 따라 해킹으로부터 안전한 보안 기술, 특히 정보 유출의 위험성이 높은 소프트웨어 기반의 암호화 기술 대신 IoT 소자들에 적합한 하드웨어 기반의 암호화 기술에 대한 요구가 높아져 가고 있다.

[0003] 하드웨어의 고유 지문이라고 표현되는 PUF 기술은 칩의 고유 ID 또는 보안 Key 등의 보안 정보를 외부에서 입력하지 않고 예측 불가능한 무작위적인 방식으로 디지털 값을 생성하는 것을 의미한다. 무작위적인 특성으로 인해 PUF에 의해 생성된 보안 정보를 해킹하거나 복제하는 것이 불가능하여, IoT 소자용 하드웨어 기반 암호기술로 적합하다.

[0004] PUF 기능을 갖기 위해 소자는 다음 세 가지 조건을 만족해야 한다.

[0005] (i) 무작위성: 소자에 기록된 정보 패턴은 외부에서 예측 불가능한 수준으로 무작위적이어야 한다.

[0006] (ii) 무연관성: 동일한 방식으로 서로 다른 소자들에 무작위적인 정보 패턴을 기록할 때, 각 소자들의 정보 패턴이 서로 다르고 연관성이 없어야 한다.

[0007] (iii) 신뢰성: 소자에 기록된 정보는 오랜 시간 유지되어, 항상 동일한 값을 출력해야 한다.

[0008] 기존에 연구된 PUF는 구현 방법에 따라 크게 물리적 특성 기반 PUF, 자연 기반 PUF, 메모리 기반 PUF로 나뉜다. 기존의 물리적 특성 기반 PUF는 PUF의 반응(response)가 전도성 레이어의 물리적 상태에 의해 결정되는 PUF를 의미한다. 물리적 특성 기반 PUF의 대표적인 예로 VIA PUF가 있다 [김동규, 김지훈, "하드웨어 디바이스 및 그 인증 방법", 10-2017-0095163, 2017.08]. VIA는 두 metal 레이어를 수직으로 연결하는 역할을 하는데, VIA hole size에 따라 metal 레이어 간 연결 상태가 open/short로 달라진다. 이 방식으로 PUF를 구현하기 위해서는 open/short 확률이 50%가 되어야 하지만, 실제 공정에서 open/short가 될 확률이 50%가 되도록 VIA hole size를 조절하는 것은 어렵다.

[0009] 기존의 자연 기반 PUF는 입력 신호의 자연 속도가 공정 편차에 의해 달라지는 특성을 이용한 것이다. 자연 기반 PUF의 대표적인 예로 Arbiter PUF가 있다 [홍석희, 김현민, "DES 암호화 시스템", 출원일 2012.12.26, 출원번호

호 10-2012-0153387, 등록일 2014.03.12, 등록번호 10-1373576].

- [0010] 아비터(Arbiter) PUF는 여러 개의 멀티플렉서(multiplexer; MUX)로 구현된 서로 다른 두 경로(path)를 가지며, 두 경로(path) 간의 지연 속도 차이를 이용하는 구조이다. 이러한 구조는 많은 챌린지-리스폰스(challenge-response) 쌍을 가진다는 장점이 있지만, 온도 변화, 공급 전압의 편차, 노후화, 외부 잡음과 같은 환경적인 요인에 의해 출력 값이 달라지므로 신뢰성이 떨어진다는 단점이 있다.
- [0011] 기존의 메모리 기반 PUF는 두 개의 교차 연결된 인버터 구조를 이용한 것이다. 메모리 기반 PUF의 대표적인 예로는 SRAM 기반 PUF가 있으나, 일반적인 6T SRAM의 경우 외부 환경의 변화에 의한 비트-플리핑(bit-flipping)과 같은 문제가 존재한다.
- [0012] 온도 변화, 공급 전압의 편차, 외부 잡음 등에 의하여 SRAM 셀(cell)의 초기값이 영향을 받을 수 있으며, 이는 PUF의 신뢰성을 떨어뜨리는 문제를 발생시킨다.
- [0013] 따라서 기존의 구현 방식으로는 PUF 기능을 갖기 위해 소자는 (i) 무작위성, (ii) 무연관성, 그리고 (iii) 신뢰성을 모두 만족하는 것이 어렵다.
- [0014] 본 발명에서는 자기 메모리 소자를 이용하여, (i) 무작위성, (ii) 무연관성, 그리고 (iii) 신뢰성의 조건을 모두 만족하는 PUF 구현 방식과 이를 위한 장치를 제공한다.

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0015] 본 발명의 일 목적은, 자기 메모리 소자를 이용하여 PUF 구현을 위한 세 가지 요구 조건 [(i) 무작위성, (ii) 무연관성, (iii) 신뢰성]을 동시에 만족하는 자기 메모리 기반 PUF 구현 방식을 제공하는 것이다.
- [0016] 또한, 자기 메모리 기반 PUF 구현 방식을 실현할 수 있는 장치를 제공하는 것이다.

과제의 해결 수단

- [0017] 본 발명의 일 실시예에 따른 물리적 복제 방지 기능 자기 메모리 소자는, 기판 상에 배치되고 고정 자성층, 자유 자성층, 및 상기 고정 자성층과 상기 자유 자성층 사이에 개재된 터널절연층 또는 비자성 도전층을 포함하는 복수의 자기 저항 셀들;을 포함한다. 상기 물리적 복제 방지 기능 자기 소자의 동작 방법은, 상기 복수의 자기 저항 셀에 시간에 따라 감쇄하는 외부 자기장을 인가하여 복수의 자기 저항 셀들의 자유 자성층의 자화 방향을 랜덤화한다.
- [0018] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 외부 자기장은 상기 자유 자성층의 자화 용이축을 포함하는 평면 내에서 시간에 따라 회전 주파수(f)로 회전할 수 있다. 상기 외부 자기장의 세기는 시간에 따라 감쇄 상수를 가지고 지수 함수적으로 감소할 수 있다.
- [0019] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 회전 주파수(f)는 수 십 Hz 내지 수 백 Hz이고, 상기 감쇄 상수는 상기 회전 주파수의 역수(1/f)보다 클 수 있다.
- [0020] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 회전 주파수(f)는 120 Hz이고, 상기 감쇄 상수는 1 sec일 수 있다.
- [0021] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 외부 자기장의 세기는 감쇄 상수를 가지고 시간에 따라 지수 함수적으로 감소하고, 상기 기판은 상기 자유 자성층의 자화 용이축 방향과 상기 외부 자기장에 의하여 정의된 평면에 수직인 회전축을 중심으로 일정한 주파수로 회전할 수 있다.
- [0022] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 고정 자성층 및 상기 자유 자성층은 막면에 수직 방향으로 자화될 수 있다.
- [0023] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 고정 자성층 및 상기 자유 자성층은 막면에 수평 방향으로 자화될 수 있다.
- [0024] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 외부 자기장을 인가하는 자기장 인가부는, 일정한 방향의 외부 자기장을 시간에 따라 그 세기를 감소시키는 전자석; 상기 기판을 지지하고 상기 기판을 회전시키는 모터; 상기 전자석에 흐르는 전류를 제어하고 상기 모터를 제어하는 제어부; 및 상기 기판과 상기 모터의 회전축을 연결시키고 상기 기판을 지지하는 기판 회전부를 포함할 수 있다.

[0025] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 외부 자기장을 인가하는 자기장 인가부는, 제1 방향의 제1 자기장을 형성하는 제1 전자석; 상기 제1 방향과 수직한 제2 방향의 제2 자기장을 형성하는 제2 전자석; 및 상기 제1 자기장과 상기 제2 자기장의 벡터 합인 외부 자기장을 상기 제1 방향과 상기 제2 방향에 의하여 정의된 평면에서 시간에 따라 감소하면서 회전하도록 상기 제1 전자석과 상기 제2 전자석에 흐르는 전류를 제어하는 제어부를 포함할 수 있다. 상기 제1 방향과 상기 제2 방향에 의하여 정의된 평면은 상기 자유 자성층의 자화 용이축을 포함하는 평면일 수 있다.

[0026] 본 발명의 일 실시예에 따른 물리적 복제 방지 기능 자기 메모리 소자에 정보를 기록하는 장치는, 제1 방향의 제1 자기장을 형성하는 제1 전자석; 상기 제1 방향과 수직한 제2 방향의 제2 자기장을 형성하는 제2 전자석; 및 상기 제1 자기장과 상기 제2 자기장의 합인 외부 자기장이 상기 제1 방향과 상기 제2 방향에 의하여 정의된 평면에서 시간에 따라 감소하면서 회전하도록 상기 제1 전자석과 상기 제2 전자석에 흐르는 전류를 제어하는 제어부를 포함한다. 물리적 복제 방지 기능 자기 소자는 복수의 터널 접합 셀들을 포함하고, 상기 외부 자기장은 복수의 터널 접합 단위셀들의 자유 자성층의 자화 방향을 랜덤화하고, 상기 제1 방향과 상기 제2 방향에 의하여 정의된 평면은 상기 자유 자성층의 자화 용이축을 포함하는 평면이다.

[0027] 본 발명의 일 실시예에 따른 물리적 복제 방지 기능 자기 메모리 소자에 정보를 기록하는 장치는, 일정한 방향의 외부 자기장을 시간에 따라 그 세기를 감소시키는 전자석; 기판을 지지하고 상기 기판을 회전시키는 모터; 상기 전자석에 흐르는 전류를 제어하고 상기 모터를 제어하는 제어부; 및 상기 기판을 장착하고 상기 모터의 회전을 연결시키는 기판 회전부를 포함한다. 물리적 복제 방지 기능 자기 메모리 소자는 상기 기판 상에 배치된 복수의 터널 접합 셀들을 포함한다. 상기 외부 자기장은 복수의 터널 접합 단위셀들의 자유 자성층의 자화 방향을 랜덤화한다. 상기 기판은 상기 자유 자성층의 자화 용이축 방향과 상기 외부 자기장에 의하여 정의된 평면에 수직한 회전축을 중심으로 일정한 주파수(f)로 회전한다.

발명의 효과

[0028] 본 발명의 실시예들에 따른 자기 메모리 소자의 동작 방법은 자기 메모리 소자를 이용하여 PUF 기능을 물리적 복제 방지 기능을 수행할 수 있다. 구체적으로, 시변 자기장이 복제 방지 기능 자기 메모리 소자에 인가된 경우, PUF의 세 가지 조건 [(i) 무작위성, (ii) 무연관성, (iii) 신뢰성을 동시에 만족한다.

[0029] 복제 방지 기능 자기 메모리 소자는 종래의 반도체 소자와 함께 직접화될 수 있다. 이로써, 기존 반도체 소자 등에서 구현이 어려웠던 PUF 구현이 가능해진다. 소자들 간의 정보 전송에 대한 보안과 소자 자체의 기능에 대한 보안이 갈수록 중요해지는 상황에서, 본 발명은 외부에서 파악하는 것이 불가능한 PUF 보안성을 탑재한 자기 메모리 소자를 제공함으로써 기존 컴퓨터, 휴대폰은 물론 IoT 디바이스, 전기자동차 등의 정보 전송·저장, 전자제품의 정품인증, 복제방지 등 보안 유지가 필수적인 다양한 응용 분야에 적용이 가능하다.

도면의 간단한 설명

[0030] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 PUF 자기 메모리 소자를 설명하는 개념도이다.

도 2는 외부 자기장이 없는 경우 자기 터널 접합 셀의 자유 자성층의 자화 방향을 나타내는 도면이다.

도 3은 외부 자기장이 있는 경우 ($\theta_H = 60^\circ$), 자기 터널 접합 셀의 자유 자성층의 자화 방향을 나타내는 도면이다.

도 4는 외부 자기장이 있는 경우($\theta_H = 60^\circ$), θ 에 따른 자기 에너지 밀도 $E(\theta)$ 를 나타내는 시뮬레이션 결과이다.

도 5는 외부 자기장이 있는 경우 ($\theta_H = 240^\circ$), 자기 터널 접합 셀의 자유 자성층의 자화 방향을 나타내는 도면이다.

도 6은 외부 자기장이 있는 경우($\theta_H = 240^\circ$), θ 에 따른 자기 에너지 밀도 $E(\theta)$ 를 나타내는 시뮬레이션 결과이다.

도 7은 시간에 따라 회전하는 외부 자기장(H)이 인가된 경우, 시간에 따른 평균적인 자화방향을 몬테 카를로 모델로 계산한 결과이다.

도 8은 외부 자기장의 세기가 시간에 따라 감소하면서 시간에 따라 회전하는 외부 자기장이 인가된 경우, 시간

에 따른 평균적인 자화방향을 몬테 카를로 모델로 계산한 결과이다.

도 9는 본 발명의 다른 실시예에 따른 시변 외부 자기장을 생성하는 장치를 설명하는 개념도이다.

도 10은 본 발명의 다른 실시예에 따른 시변 외부 자기장을 생성하는 방법을 설명하는 개념도이다.

도 11 및 도 12는 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 외부 자기장을 생성하는 방법을 설명하는 개념도들이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0031] 이하, 첨부한 도면을 참조하여 본 발명의 실시예들에 대해 상세히 설명한다. 본 발명은 다양한 변경을 가할 수 있고 여러 가지 형태를 가질 수 있는 바, 특정 실시예들을 도면에 예시하고 본문에 상세하게 설명하고자 한다. 그러나, 이는 본 발명을 특정한 개시 형태에 대해 한정하려는 것이 아니며, 본 발명의 사상 및 기술 범위에 포함되는 모든 변경, 균등물 내지 대체물을 포함하는 것으로 이해되어야 한다. 첨부된 도면에 있어서, 대상물들의 크기와 양은 본 발명의 명확성을 기하기 위하여 실제보다 확대 또는 축소하여 도시한 것이다.
- [0032] 제1, 제2 등의 용어는 다양한 구성요소들을 설명하는데 사용될 수 있지만, 상기 구성요소들은 상기 용어들에 의해 한정되어서는 안 된다. 상기 용어들은 하나의 구성요소를 다른 구성요소로부터 구별하는 목적으로만 사용된다. 예를 들어, 본 발명의 권리 범위를 벗어나지 않으면서 제1 구성요소는 제2 구성요소로 명명될 수 있고, 유사하게 제2 구성요소도 제1 구성요소로 명명될 수 있다.
- [0033] 본 출원에서 사용한 용어는 단지 특정한 실시예를 설명하기 위해 사용된 것으로, 본 발명을 한정하려는 의도가 아니다. 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다. 본 출원에서, "포함하다" 또는 "구비하다" 등의 용어는 명세서 상에 기재된 특징, 단계, 기능, 구성요소 또는 이들을 조합한 것이 존재함을 지정하려는 것이지, 다른 특징들이나 단계, 기능, 구성요소 또는 이들을 조합한 것들의 존재 또는 부가 가능성을 미리 배제하지 않는 것으로 이해되어야 한다.
- [0034] 한편, 다르게 정의되지 않는 한, 기술적이거나 과학적인 용어를 포함해서 여기서 사용되는 모든 용어들은 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 일반적으로 이해되는 것과 동일한 의미를 가지고 있다. 일반적으로 사용되는 사전에 정의되어 있는 것과 같은 용어들은 관련 기술의 문맥 상 가지는 의미와 일치하는 의미를 가지는 것으로 해석되어야 하며, 본 출원에서 명백하게 정의하지 않는 한, 이상적이거나 과도하게 형식적인 의미로 해석되지 않는다.
- [0035] 본 발명의 일 실시예에 따른 자기 메모리 소자는 별도의 칩으로 패키징되거나, 메모리 소자, 로직 소자, 또는 통신 소자와 함께 직접화될 수 있다.
- [0036] 본 발명의 일 실시예에 따른 자기 메모리 소자는 자기터널 접합 구조 또는 거대자기저항 구조일 수 있다.
- [0037] 자기터널 접합 자기 메모리 소자는 자성 특성을 갖는 두 개의 자성층들 사이에 개재된 터널 절연층을 포함하는 자기터널접합 구조를 가질 수 있다. 자기터널접합 구조들은 매트릭스 형태로 배열된다. 자기터널접합 구조들 각각은 정보를 저장하는 단위 셀로 동작한다.
- [0038] 자유 자성층/터널절연층/고정 자성층을 갖는 자기 터널 접합 구조는 단위 셀을 제공한다. 자유 자성층은 외부 자극(전류 또는 외부 자기장)에 의해 자화방향이 변한다. 고정 자성층은 자화방향이 고정된 고정 자성층이다.
- [0039] 자기터널접합 구조는 자유 자성층과 고정 자성층 사이의 상대적인 자화 방향에 따라 전기 저항이 달라지는 터널 자기저항 효과를 발생시킨다. 터널 자기저항 효과는 자기터널접합 구조에서 업스핀과 다운스핀을 갖는 전자들 각각이 터널 절연층을 터널링해 흐르는 정도가 서로 다르기 때문에 발생한다. 결과적으로, 상기 터널 자기저항 효과로 인하여 자유 자성층과 고정 자성층 사이의 상대적인 자화방향이 자기 터널 접합 단위 셀에 흐르는 전류를 제어할 수 있다.
- [0040] 자기 메모리 소자는 외부 자기장 혹은 전류를 이용하여 상기 자유 자성층의 자화방향을 스위칭하여 결정한다. 자유 자성층과 고정 자성층 사이의 상대적 자화방향에 따른 저항의 차이가 정보로 사용된다. 예를 들어 상기 자유 자성층과 고정 자성층 사이의 상대적 자화방향이 평행인 상태를 정보 "0"으로, 반평행인 상태를 정보 "1"로 사용한다. 기록된 자기적 정보는 자유 자성층과 고정 자성층의 자기이방성에 의해 오랜 시간 그대로 유지되는 비휘발성 특성을 갖는다.
- [0041] 자기 메모리 소자의 정보 저장시간(τ)은, 열에너지에 저항하여 평균적으로 자화방향이 유지되는 시간으로 주어지며 하기 [수학식 1]과 같다.

[0042] [수학식 1]

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{K_{eff}V}{k_B T}\right) = \tau_0 \exp\left(\frac{H_{K,eff}M_S V}{2k_B T}\right)$$

[0043]

[0044] 여기서, τ_0 는 시도 주파수의 역수로 1 ns 정도이며, K_{eff} 는 자유 자성층의 유효 자기이방성 에너지 밀도, V 는 자유 자성층의 부피, k_B 는 볼츠만 상수($=1.381 \times 10^{-16}$ erg/K), T 는 켈빈 온도이다. K_{eff} 는 자유 자성층의 포화 자화(M_S) 및 유효 자기이방성 자기장($H_{K,eff}$)의 곱으로 표시된다.

[0045] 또한, $K_{eff}V/k_B T$ 가 자기 메모리 소자의 열적 안정성(Δ)으로 정의된다. 예를 들어 상온에서 $\Delta = 40$ 의 조건이 만족되면, 기록된 정보는 평균적으로 약 7.5년 유지되어 비휘발성 메모리로서의 응용이 가능하다. 따라서 $\Delta > 40$ 의 조건이 만족된 자기 메모리 소자는, PUF 구현을 위한 세 가지 요구 조건 중 iii) 신뢰성 조건을 만족한다.

[0046] 자기 메모리를 이용하여 PUF를 구현하기 위해서는 (iii) 신뢰성과 함께 (i) 무작위성, 그리고 (ii) 무연관성의 조건을 동시에 만족하여야 한다. 그러나, 지금까지의 자기 메모리 개발은 규칙성이 있는 정해진 정보를 효율적으로 기록하는 방식에 대해 집중적으로 진행되어 왔기 때문에, 무작위성 및 무연관성을 갖는 정보 기록 구현 방식이 부재한 상황이다.

[0047] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 PUF 자기 메모리 소자를 설명하는 개념도이다.

[0048] 도 1을 참조하면, 본 발명의 실시 예들에 따른 PUF 자기 메모리 소자(100)는, 기판(101) 상에 배치되고 고정 자성층(116), 자유 자성층(112), 및 상기 고정 자성층(116)과 상기 자유 자성층(112) 사이에 개재된 터널절연층(114) 또는 비자성 도전층을 포함하는 복수의 자기 저항 셀들(102);을 포함한다. 상기 복수의 자기 저항 셀들에 시간에 따라 감쇄하는 외부 자기장(H)을 인가하여 복수의 자기 저항 셀들의 자유 자성층(112)의 자화 방향을 랜덤화한다.

[0049] 기판(101)은 반도체 기판일 수 있다. 구체적으로 상기 기판은 실리콘 기판이고, 로직 회로 영역, 통신회로 영역을 더 포함할 수 있다.

[0050] 상기 자기 저항 셀이 자기 터널 접합 셀로 가정하여 설명한다. PUF 자기 메모리 소자(100)는 N개의 자기 터널 접합 셀들(102)을 포함한다. 전자석은 시간에 따라 감쇄하는 외부 자기장(H)을 자기 터널 접합 셀들(102)에 인가한다. 상기 외부 자기장(H)은 상기 자유 자성층의 자화 용이축을 포함하는 평면 내에서 시간에 따라 회전 주파수(f)로 회전하고, 상기 외부 자기장의 세기는 시간에 따라 감쇄 상수를 가지고 지수 함수적으로 감소할 수 있다.

[0051] 자기 정보가 기록된 자유 자성층에 외부 자기장(H)을 인가하면, 자기적 에너지는 자화의 크기 및 방향과 자기장의 크기 및 방향에 의해 변한다.

[0052] 도 2는 외부 자기장이 없는 경우 자기 터널 접합 셀의 자유 자성층의 자화 방향을 나타내는 도면이다.

[0053] 도 2를 참조하면, 상기 고정 자성층(116) 및 자유 자성층(112)이 수직 자기 이방성을 가질 수 있다. 자유 자성층의 자화 방향은 자화 용이축과 평행 또는 반평행에 따라 정보를 저장한다. 자유 자성층과 고정 자성층이 평행한 경우 정보"0"을 나타내고, 자유 자성층과 고정 자성층이 반평행한 경우 정보 "1"을 나타낼 수 있다.

[0054] 도 3은 외부 자기장이 있는 경우 ($\Theta_H = 60^\circ$), 자기 터널 접합 셀의 자유 자성층의 자화 방향을 나타내는 도면이다.

[0055] 도 4는 외부 자기장이 있는 경우($\Theta_H = 60^\circ$), Θ 에 따른 자기 에너지 밀도 $E(\Theta)$ 를 나타내는 시뮬레이션 결과이다.

[0056] 도 3 및 도 4를 참조하면, 상기 자유 자성층(112)의 자화 용이축이 +z축이고 외부 자기장(H)이 인가된 경우, 상기 자유 자성층(112)의 자화 단위 벡터는 다음과 같이 주어진다.

[0057] $\vec{m} = (\sin \theta, 0, \cos \theta)$

[0058] 상기 자유 자성층(112)의 자화 단위 벡터는 자유 자성층(112)의 자화 방향을 포함하는 평면(xz 평면) 내에서 자

유 자성층(112)의 자화 용이축(z축)을 기준으로 소정의 각도(θ)를 가질 수 있다. 외부 자기장(H)은 고정 자성층의 자화 방향을 변경하지 않는다. 외부 자기장의 벡터는 다음과 같이 표시된다.

$$\vec{H} (= H_0 (\sin \theta_H, 0, \cos \theta_H))$$

[0059]

외부 자기장의 벡터는 자유 자성층(112)의 자화 방향을 포함하는 평면(xz 평면) 내에서 자유 자성층(112)의 자화 용이축(z축)을 기준으로 소정의 각도(θ_H)로 표시될 수 있다. θ_H 는 외부 자기장과 자화 용이축 사이의 각도이다.

[0060]

외부 자기장의 벡터가 X-Z 평면 내에 있고 자화 용이축 (magnetic easy axis)이 +Z 방향인 경우, 상기 자유 자성층의 자화 방향에 따른 자기 에너지 밀도 ($E(\theta)$)는 다음과 같이 주어진다.

[0061]

[수학식 2]

$$E(\theta) = K_{eff} \sin^2 \theta - H_0 M_S \cos(\theta - \theta_H)$$

[0062]

여기서, H_0 는 외부 자기장의 세기이며, M_S 는 자유 자성층(112)의 포화 자화이다. K_{eff} 는 자유 자성층(112)의 유효 자기이방성 에너지 밀도이다. θ 는 자유 자성층(112)의 자화 용이축(z축)과 자화 방향 사이의 각도이다. θ_H 는 자유 자성층(112)의 자화 용이축(z축)과 외부 자기장 사이의 각도이다.

[0063]

도 3 및 도 4를 참조하면, $K_{eff} = 2.5 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$, $H_0 = 1250 \text{ Oe}$, $M_S = 1000 \text{ emu/cm}^3$, $\theta_H = 60$ 도이다. 이 경우, 방향 1 (11도)과 방향 2(166도)로 표시된 각도들이 각각 국부적 최소에너지이다. 따라서 외부 자기장(H)이 있는 경우($\theta_H = 60$ 도), 자유 자성층(112)의 자화방향은 이 두 방향 중 하나를 향한다.

[0064]

상온과 같이 열에너지가 주어지는 상황에서는 열적 섭동에 의해 시간(t) 동안 방향 1에서 방향 2로 스위칭될 확률 $P_{1 \rightarrow 2}$ 과 반대로 방향 2에서 방향 1로 스위칭될 확률 $P_{2 \rightarrow 1}$ 이 둘 다 0이 아니다.

[0065]

방향 1에서 방향 2로 스위칭될 확률 $P_{1 \rightarrow 2}$ 과 방향 2에서 방향 1로 스위칭될 확률 $P_{2 \rightarrow 1}$ 은 다음과 같이 주어진다.

[0066]

[수학식 3]

$$P_{1 \rightarrow 2} = \frac{r_1}{r_1 + r_2} (1 - \exp(-(r_1 + r_2)t))$$

$$P_{2 \rightarrow 1} = \frac{r_2}{r_1 + r_2} (1 - \exp(-(r_1 + r_2)t))$$

$$r_1 = \frac{1}{\tau_0} \exp\left(-\frac{E_{B1}}{k_B T}\right)$$

$$r_2 = \frac{1}{\tau_0} \exp\left(-\frac{E_{B2}}{k_B T}\right)$$

[0067]

여기서, E_{B1} 은 방향 1에서 방향 2로 넘어가기 위해 극복해야 하는 제1 에너지 장벽의 크기이며, E_{B2} 은 방향 2에서 방향 1로 넘어가기 위해 극복해야 하는 제2 에너지 장벽의 크기이다. τ_0 는 시도주파수의 역수로 1 ns 정도이다.

[0068]

도 4를 참조하면, $E_{B1} > E_{B2}$ 이므로 $P_{1 \rightarrow 2} < P_{2 \rightarrow 1}$ 이다. 그 결과, 상기 자유 자성층의 자화는 방향 1을 선호한다. 이런 상황에서, N개의 자기 터널 접합 셀들 중에서, 방향 1을 향하는 셀들이 방향 2를 향하는 셀들에 비해 많다. 이 상황에서 외부 자기장(H)을 제거하면, 방향 1은 0 도에 가깝기 때문에 자화 방향이 +Z 방향으로 정렬되고, 방향 2는 180도에 가깝기 때문에 자화 방향이 -Z 방향으로 정렬된다.

[0069]

따라서, 상기 자유 자성층(112)의 자화 방향이 +Z 방향으로 정렬된 셀들의 수가 -Z 방향으로 정렬된 셀들의 수보다 많다.

[0070]

이 상황은 자유층의 자화방향이 무작위적이어야 한다는 PUF 조건 (i) 무작위성을 만족시키지 못한다.

[0071]

- [0074] 도 5는 외부 자기장이 있는 경우 ($\Theta_H = 240^\circ$), 자기 터널 접합 셀의 자유 자성층의 자화 방향을 나타내는 도면이다.
- [0075] 도 6은 외부 자기장이 있는 경우($\Theta_H = 240^\circ$), Θ 에 따른 자기 에너지 밀도 $E(\Theta)$ 를 나타내는 시뮬레이션 결과이다.
- [0076] 도 5 및 도 6을 참조하면, $E_{B1} > E_{B2}$ 이고, 방향 1은 191° 이고, 방향 2는 346° 이다. 따라서, 외부 자기장(H)을 제거한 후, 상기 자유 자성층(112)의 자화 방향이 $-Z$ 방향으로 정렬된 셀들의 수가 $+Z$ 방향으로 정렬된 셀들의 수 보다 많다. 즉, 도 4와는 반대의 경우가 발생한다.
- [0077] 도 4와 도 6에서 설명한 예들에 따르면, 외부 자기장(H)의 방향에 따라, 상기 자유 자성층(112)의 자화 방향이 $+Z$ 또는 $-Z$ 로 정렬된 셀들의 수가 조절될 수 있다.
- [0078] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 자기 메모리 소자에 시간에 따라 회전하는 자기장(H)을 인가하면, 매 순간 외부 자기장(H)이 선호하는 방향 1과 방향 2이 변한다. 그 결과 $P_{1 \rightarrow 2}$ 과 $P_{2 \rightarrow 1}$ 역시 매 순간 변한다. 즉, 어느 시점에는 $P_{1 \rightarrow 2} < P_{2 \rightarrow 1}$ 이 만족되지만, 또 다른 시점에는 $P_{1 \rightarrow 2} > P_{2 \rightarrow 1}$ 이 만족된다. 열적 섭동이 갖는 무작위적 특성에 의해 방향 1에서 방향 2로 스위칭하는 과정과 방향 2에서 방향 1로 스위칭하는 과정이 모두 어느 정도의 무작위성을 갖고 발생한다. 충분한 시간 동안 시간에 따라 회전하는 외부 자기장(H)을 상기 자기 메모리 소자(100)에 인가하면, N개의 자기 터널 접합 셀들(102)은 "0" 또는 "1"의 정보를 무작위적으로 저장할 수 있다.
- [0079] 본 발명의 실시 예들에 따른 시간에 따라 변하는 외부 자기장(H)의 한 종류는 외부 자기장의 크기는 고정되고 방향만 시간에 따라 변하는 상황이다. 즉 외부 자기장 벡터 $H(t)$ 는 다음과 같이 주어질 수 있다.
- [0080] [수학식 4]
- [0081]
$$\vec{H}(t) = H_0 (\sin 2\pi f t, 0, \cos 2\pi f t)$$
- [0082] 여기서, H_0 는 외부 자기장의 세기이고, f 는 자기장이 회전하는 회전 주파수이다.
- [0083] 도 7은 시간에 따라 회전하는 외부 자기장(H)이 인가된 경우, 시간에 따른 평균적인 자화방향을 몬테 카를로(Monte-Carlo) 모델로 계산한 결과이다.
- [0084] 도 7을 참조하면, 자기터널 접합 셀들(102)의 개수 $N = 10,000$ 인 경우, 자기 메모리 소자에 [수학식 4]로 정의된 시변 외부 자기장을 인가한다. 시간에 따른 평균적인 자화방향 $\langle m \rangle$ 은 다음과 같이 주어진다.
- [0085]
$$\langle m \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N m_i$$
- [0086] 시간에 따른 평균적인 자화방향 $\langle m \rangle$ 은 메트로폴리탄 알고리즘에 기반한 몬테 카를로 모델로 계산되었다. 자기 터널 접합 셀들(102)의 자화방향이 $+Z$ 에 가까우면, $m_i = +1$ 로 정의한다. 자기 터널 접합 셀들(102)의 자화방향이 $-Z$ 에 가까우면 $m_i = -1$ 로 정의한다.
- [0087] $\langle m \rangle = 1$ 이면 모든 자기 터널 접합 셀들의 자화가 $+Z$ 로 정렬된 것이다. $\langle m \rangle = -1$ 이면 모든 자기 터널 접합 셀들의 자화가 $-Z$ 로 정렬된 것이다.
- [0088] $\langle m \rangle = 0$ 이면 $N/2$ 개의 자기 터널 접합 셀들은 $+Z$ 방향으로 정렬된 반면, 나머지 $N/2$ 개의 자기 터널 접합 셀들은 $-Z$ 방향으로 정렬된다. 특정 자기 터널 접합 셀의 자화가 $+Z$ 방향인지 $-Z$ 방향인지의 확률이 50%이므로 무작위성이 극대화된 경우이다. 즉 $\langle m \rangle$ 이 0에 가까워질수록 무작위성이 커지게 된다.
- [0089] 도 7을 참조하면, 외부 자기장이 인가되기 직전의 초기 조건으로, 열적 안정성(Δ)= 40, $H_0 = 586$ Oe, 회전 주파수(f) = 120 Hz 이고, $t = 0$ 에서 $\langle m \rangle = 1$ 로 설정된다. 이 경우, 외부 자기장이 인가된 직 후, 초기 시간에는 $\langle m \rangle$ 이 급격하게 감소한다. 그러나, 외부 자기장의 자기장 회전 주파수를 따라 $\langle m \rangle$ 은 일정하게 진동한다. 이는 외부 자기장이 $+Z$ 를 향하는 시점에는 자화방향이 $+Z$ 를 선호한다. 한편, 외부 자기장(H)이 $-Z$ 를 향하는 시점에는 자화방향이 $-Z$ 를 선호한다.
- [0090] 일정한 진동이 나타나는 상황에서 임의의 시간에 자기장을 제거하면 $\langle m \rangle$ 은 진동 폭 중 하나의 값을 갖는다.

[0091] 도 7을 참조하면, $\langle m \rangle$ 이 +0.25와 -0.25 사이를 시간에 따라 진동한다. 만약 $\langle m \rangle = 0.25$ 인 순간 외부 자기장을 제거하면, $\langle m \rangle = 0$ 인 경우에 비해 무작위성이 감소한다.

[0092] 이러한 문제를 개선하기 위해, 즉 $\langle m \rangle$ 이 최대한 0에 가까워져서 $m_i = +1$ 인 자기 터널 접합 셀들과 $m_i = -1$ 인 자기 터널 접합 셀들이 각각 50%에 가까운 상황을 구현하여 무작위성을 극대화하기 위해, [수학식 5]와 같이 자기장 벡터 $H(t)$ 의 시간에 따른 변화가 주어질 수 있다.

[0093] [수학식 5]

$$\vec{H}(t) = H_0 \exp\left(-\frac{t}{t_{\text{decay}}}\right) (\sin 2\pi f t, 0, \cos 2\pi f t)$$

[0094]

[0095] 여기서 t_{decay} 는 외부 자기장 세기가 시간에 따라 지수함수적으로 감소하는 감쇄 시간을 나타낸다.

[0096] 도 8은 외부 자기장의 세기가 시간에 따라 감소하면서 시간에 따라 회전하는 외부 자기장이 인가된 경우, 시간에 따른 평균적인 자화방향을 몬테 카를로 모델로 계산한 결과이다.

[0097] 도 8을 참조하면, 외부 자기장(H)이 인가되기 직전의 초기 조건으로, $\Delta = 40$, $H_0 = 586$ Oe, $f = 120$ Hz, $t_{\text{decay}} = 1$ 초이고, $t = 0$ 에서 $\langle m \rangle = 1$ 로 설정된다.

[0098] [수학식 5]의 시변 자기장이 인가된 경우, $\langle m \rangle$ 의 시간에 따른 변화가 표시된다. 이 경우, 외부 자기장이 인가된 직후, 초기 시간대에 $\langle m \rangle$ 이 빠르게 감소한다.

[0099] 그러나, 시간이 지남에 따라 $\langle m \rangle$ 이 진동하는 현상이 사라지고 $\langle m \rangle$ 이 0에 매우 가까운 값을 갖는다. 이는 시간이 충분히 지난 상황에서 외부 자기장의 세기가 약해지고, 그 결과 외부 자기장에 의해 특정 방향이 선호되는 현상이 사라진다. 즉, 상기 자기 메모리 소자는 무작위성을 만족한다.

[0100] 도 8을 참조하면, PUF는 (ii)무연관성을 만족하여야 한다. 무연관성은 동일한 방식으로 서로 다른 소자들에 무작위적인 정보 패턴을 기록할 때, 각 소자들의 정보 패턴이 서로 다르고 연관성이 없어야 한다. 이 경우, 무연관성을 만족되는지를 확인하기 위해, 동일한 방식을 두 개의 다른 소자(소자 1 및 소자 2)에 적용하여 얻은 $\langle m \rangle$ 의 시간에 따른 변화를 도시하였다. 두 개의 다른 소자에 동일한 시변 자기장을 인가하였기 때문에, 시간에 따른 $\langle m \rangle$ 변화가 매우 비슷하다. 하지만, 열적 섭동의 영향으로 $\langle m \rangle$ 에 약간의 차이가 발생한다.

[0101] 두 소자에 기록된 정보의 연관성을 확인하기 위해 두 소자의 $\langle m \rangle$ 이 모두 0에 가까 $t = 0.5$ 초에서, 연관 계수(c_{12})를 다음과 같이 정의하였다

$$c_{12} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N m_{1,i} m_{2,i}$$

[0102]

[0103] 여기서 $m_{1,i}$ 는 소자 1의 i 번째 셀의 정보이고, $m_{2,i}$ 는 소자 2의 i 번째 셀의 정보이다. 두 소자의 정보 패턴이 완벽하게 연관된 경우, $c_{12} = 1$ 이고 완벽하게 무관한 경우 $c_{12} = 0$ 이다.

[0104] 도 8을 참조하면, 계산된 $c_{12} = 0.0184$ 로 0에 매우 가깝다. 이는 이 실시예 설명된 방식을 적용하는 경우 (ii) 무연관성을 만족한다. 따라서 이 실시예의 경우 (i) 무작위성, (ii) 무연관성, (iii)신뢰성의 세 가지 PUF 조건을 모두 만족한다.

[0105] 본 발명의 PUF 자기 메모리 소자를 동작시키기 위하여, 수백 0e ~ 수천 0e의 크기를 갖는 외부 자기장을 빠른 속도로 회전시키는 장치가 요구된다.

[0106] 도 9는 본 발명의 다른 실시예에 따른 시변 외부 자기장을 생성하는 장치를 설명하는 개념도이다.

[0107] 도 9를 참조하면, 복제 방지 기능 자기 메모리 소자에 정보를 기록하는 장치(200)는, 제1 방향(x축 방향)의 제1 자기장(H_x)을 형성하는 제1 전자석(120a, 120b); 상기 제1 방향과 수직인 제2 방향(z축 방향)의 제2 자기장(H_z)을 형성하는 제2 전자석(220a, 220b); 및 상기 제1 자기장(H_x)과 상기 제2 자기장(H_z)의 합인 외부 자기장(H)이 상기 제1 방향과 상기 제2 방향에 의하여 정의된 평면(xz 평면)에서 시간에 따라 감소하면서 회전하도록 상기 제1 전자석과 상기 제2 전자석에 흐르는 전류를 제어하는 제어부(130)를 포함한다. 물리적 복제 방지 기능 자기

소자(100)는 복수의 터널 접합 셀들(102)을 포함한다. 상기 외부 자기장(H)은 복수의 터널 접합 단위셀들(102)의 자유 자성층(112)의 자화 방향을 랜덤화한다. 상기 제1 방향과 상기 제2 방향에 의하여 정의된 평면은 상기 자유 자성층(112)의 자화 용이축(z축)을 포함하는 평면이다.

[0108] 상기 제1 전자석(120a, 120b)은 한 쌍의 헬름홀츠 코일을 포함하고 x축 방향으로 서로 이격되어 배치될 수 있다. 또한, 상기 제2 전자석(220a, 220b)은 한 쌍의 헬름홀츠 코일을 포함하고, z축 방향으로 서로 이격되어 배치될 수 있다. 상기 제1 전자석(120a, 120b)은 H_x 성분을 생성하고, 상기 제2 전자석(220a, 220b)은 H_z 성분을 생성할 수 있다. 상기 외부 자기장(H)은 시간에 따라 감소하면서 회전할 수 있다. H_x 성분 및 H_z 성분은 시간(t)에 따라 감소하면서 다음과 같이 주어질 수 있다.

$$H_x = H_0 \exp\left(-\frac{t}{t_{decay}}\right) \sin 2\pi f t$$

$$H_z = H_0 \exp\left(-\frac{t}{t_{decay}}\right) \cos 2\pi f t$$

[0109]

[0110] t_{decay} 는 외부 자기장 세기가 시간에 따라 지수함수적으로 감소하는 감쇄 시간이고, f는 회전 주파수이다.

[0111] PUF 자기 메모리 소자(100)는, 기판(101) 상에 배치되고 고정 자성층(116), 자유 자성층(112), 및 상기 고정 자성층(116)과 상기 자유 자성층(112) 사이에 개재된 터널절연층(114)을 포함하는 복수의 자기 터널 접합 셀들(102);을 포함한다. 상기 복수의 자기 터널 접합 셀들에 시간에 따라 감쇄하면서 회전하는 외부 자기장(H)을 인가하면, 복수의 자기 터널 접합 셀들(102)의 자유 자성층(112)의 자화 방향은 랜덤화되고 무연관성을 가진다.

[0112] 상기 고정 자성층(116)과 상기 자유 자성층(112)는 수직 자기 이방성을 가지며, 상기 자유 자성층(112)의 자화 용이축은 +z축 방향일 수 있다.

[0113] 도 10은 본 발명의 다른 실시예에 따른 시변 외부 자기장을 생성하는 방법을 설명하는 개념도이다.

[0114] 도 10을 참조하면, 복제 방지 기능 자기 메모리 소자에 정보를 기록하는 장치(300)는, 제1 방향(x축 방향)의 제1 자기장(H_x)을 형성하는 제1 전자석(120a, 120b); 상기 제1 방향과 수직한 제2 방향(y축 방향)의 제2 자기장(H_y)을 형성하는 제2 전자석(220a, 220b); 및 상기 제1 자기장(H_x)과 상기 제2 자기장(H_y)의 합인 외부 자기장(H)이 상기 제1 방향과 상기 제2 방향에 의하여 정의된 평면(xy 평면)에서 시간에 따라 감소하면서 회전하도록 상기 제1 전자석과 상기 제2 전자석에 흐르는 전류를 제어하는 제어부(130)를 포함한다. 물리적 복제 방지 기능 자기 소자(100)는 복수의 터널 접합 셀들(102)을 포함한다. 상기 외부 자기장(H)은 복수의 터널 접합 단위셀들(102)의 자유 자성층(112)의 자화 방향을 랜덤화한다. 상기 제1 방향과 상기 제2 방향에 의하여 정의된 평면(xy 평면)은 상기 자유 자성층(112)의 자화 용이축(y축)을 포함하는 평면이다.

[0115] 상기 제1 전자석(120a, 120b)은 한 쌍의 헬름홀츠 코일(Helmholtz Coil)을 포함하고 x축 방향으로 서로 이격되어 배치될 수 있다. 또한, 상기 제2 전자석(220a, 220b)은 한 쌍의 헬름홀츠 코일(Helmholtz Coil)을 포함하고, y축 방향으로 서로 이격되어 배치될 수 있다. 상기 제1 전자석(120a, 120b)은 H_x 성분을 생성하고, 상기 제2 전자석(220a, 220b)은 H_y 성분을 생성할 수 있다. 상기 외부 자기장(H)은 시간에 따라 감소하면서 회전할 수 있다.

[0116] PUF 자기 메모리 소자(100)는, 기판(101) 상에 배치되고 고정 자성층(116), 자유 자성층(112), 및 상기 고정 자성층(116)과 상기 자유 자성층(112) 사이에 개재된 터널절연층(114)을 포함하는 복수의 자기 터널 접합 셀들(102);을 포함한다. 상기 복수의 자기 터널 접합 셀들에 시간에 따라 감쇄하면서 회전하는 외부 자기장(H)을 인가하면, 복수의 자기 터널 접합 셀들(102)의 자유 자성층(112)의 자화 방향은 랜덤화되고 무연관성을 가진다.

[0117] 상기 고정 자성층(116)과 상기 자유 자성층(112)는 면내 자기 이방성을 가지며, 상기 자유 자성층(112)의 자화 용이축은 y축 방향일 수 있다.

[0118] 도 11 및 도 12는 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 외부 자기장을 생성하는 방법을 설명하는 개념도들이다.

[0119] 도 11 및 도 12를 참조하면, 물리적 복제 방지 기능 자기 메모리 소자에 정보를 기록하는 장치(400)은, 일정한 방향(x축 방향)의 외부 자기장(H)을 시간에 따라 그 세기를 감소시키는 전자석(120a, 120b); 기판(101)을 지지하

고 상기 기관(101)을 회전시키는 모터(140); 상기 전자석에 흐르는 전류를 제어하고 상기 모터를 제어하는 제어부(130); 및 상기 기관을 장착하고 상기 모터의 회전축을 연결시키는 기관 회전부(150)를 포함한다. 물리적 복제 방지 기능 자기 메모리 소자(100)는 상기 기관(101) 상에 배치된 복수의 터널 접합 셀들(102)을 포함한다. 상기 외부 자기장(H)은 복수의 터널 접합 단위셀들(102)의 자유 자성층의 자화 방향을 랜덤화한다. 상기 기관(101)은 상기 자유 자성층의 자화 용이축 방향(z축 방향)과 상기 외부 자기장(H)에 의하여 정의된 평면(xz 평면)에 수직인 회전축(y축)을 중심으로 일정한 주파수(f)로 회전한다.

[0120] 외부 자기장(H)을 시간에 고속으로 회전시키기 위하여, 자기 터널 접합 셀들이 배치된 기관(101)이 고속으로 회전할 수 있다. 즉, 상기 기관과 함께 회전하는 회전 좌표계(X'Y'Z' 좌표계)에서 관측하면, 상기 외부 자기장(H)은 시간에 따라 회전할 수 있다.

[0121] 상기 전자석(120a, 120b)에 전류가 인가되면, 고정 좌표계의 +X 방향의 외부 자기장(H)이 발생한다. 상기 모터(140)의 회전에 의해 자기 메모리 소자(100) 또는 기관(101)이 회전하면, 자기 메모리 소자(100)는 시간에 따라 회전하는 외부 자기장을 경험한다. 상기 제어부(130)는 상기 전자석(120a, 120b)에 흐르는 전류를 시간에 따라 감소시킨다. 상기 전자석(120a, 120b)은 한 쌍의 헬름홀츠 코일일 수 있다. 이에 따라, 자기 메모리 소자는 [수학식 5]에서 기술한 시변 자기장을 경험한다.

[0122] 본 발명의 변형된 실시예에 따르면, 상기 전자석에 일정한 전류를 공급하여 일정한 세기의 외부 자기장을 발생시키는 경우에도, 자기 메모리 소자가 전자석의 중심에서 외부로 빠지면서 회전하면, 자기 메모리 소자는 외부 자기장의 크기가 시간에 따라 감소하면서 외부 자기장이 회전하는 효과를 경험할 수 있다.

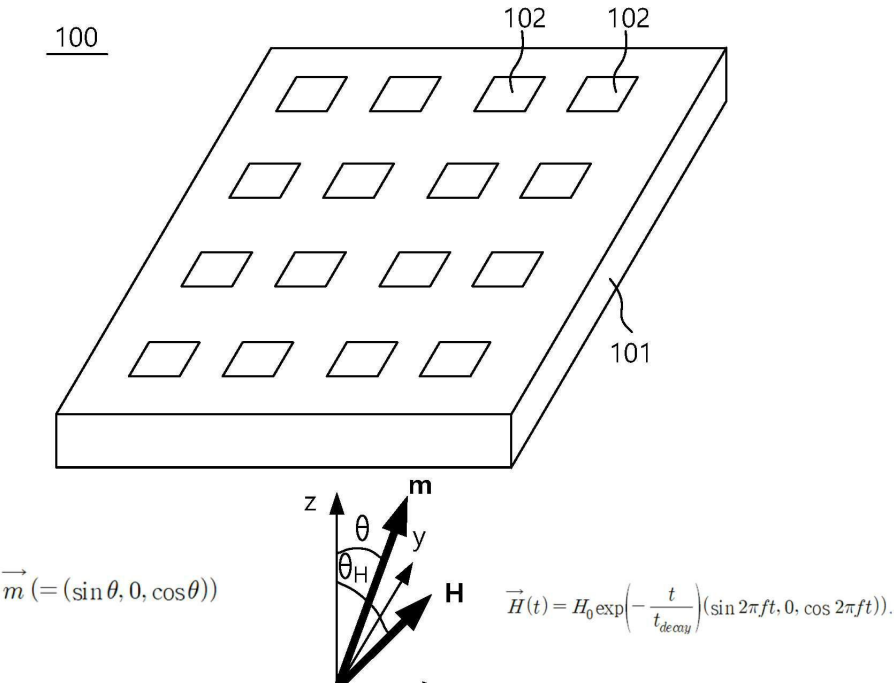
[0123] 이상에서는 본 발명을 특정의 바람직한 실시예에 대하여 도시하고 설명하였으나, 본 발명은 이러한 실시예에 한정되지 않으며, 당해 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자가 특허청구범위에서 청구하는 본 발명의 기술적 사상을 벗어나지 않는 범위 내에서 실시할 수 있는 다양한 형태의 실시예들을 모두 포함한다.

부호의 설명

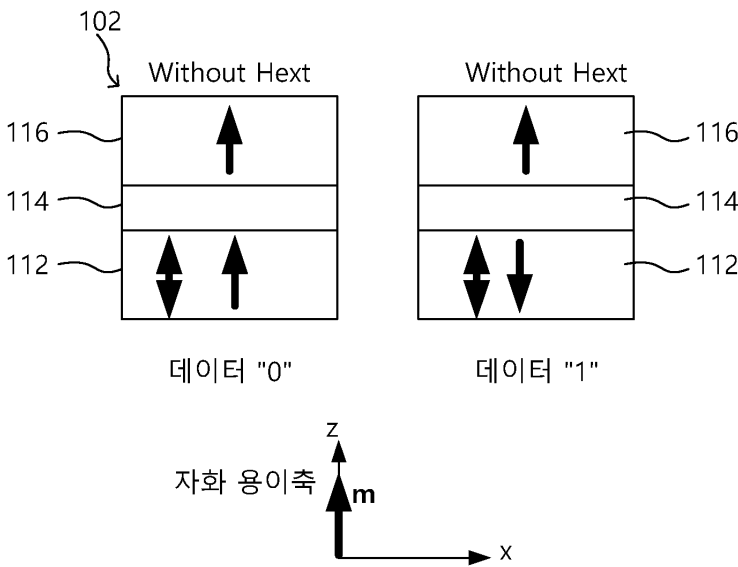
- [0124] 102: 자기저항 셀
112: 자유 자성층
116: 고정 자성층

도면

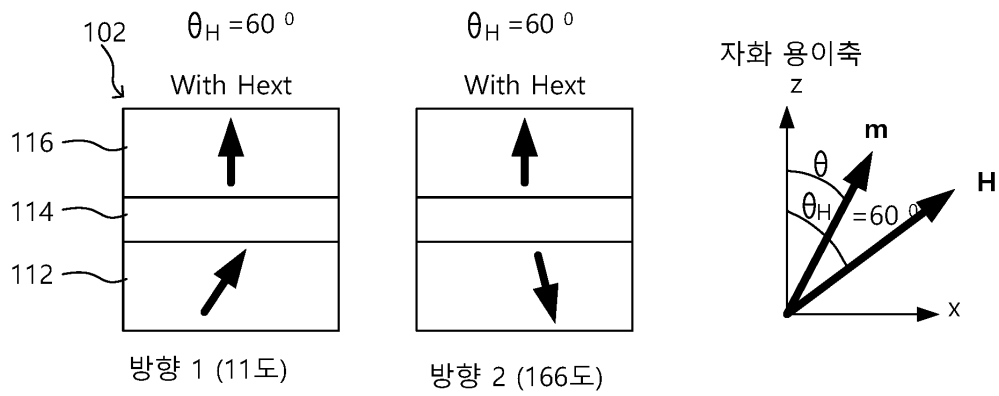
도면1



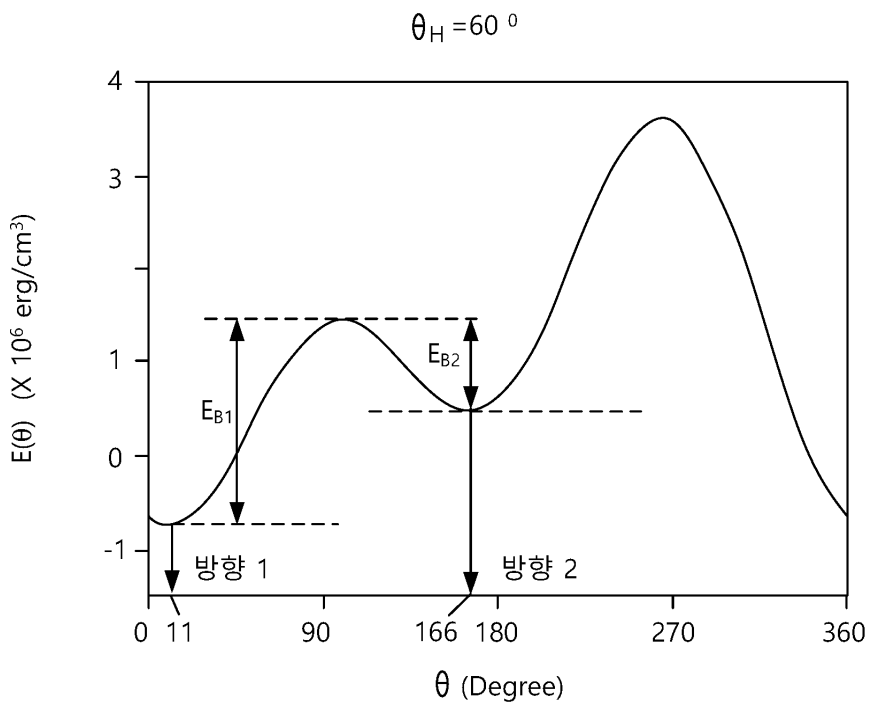
도면2



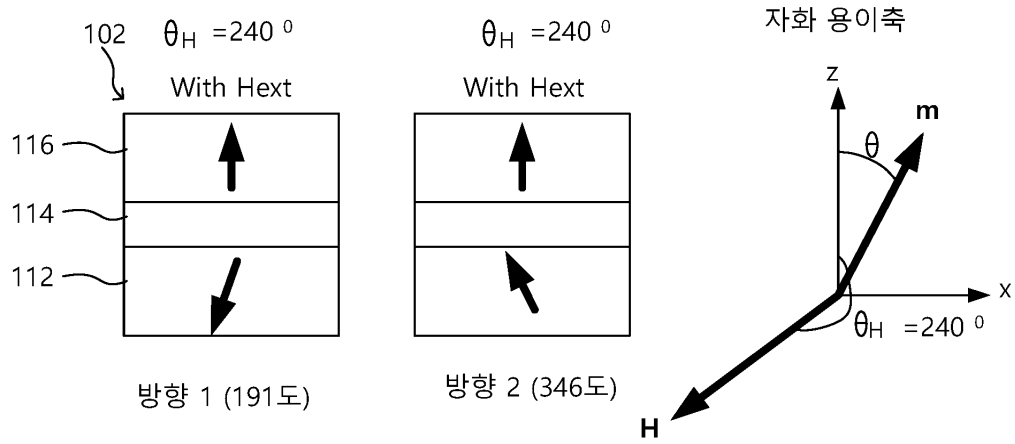
도면3



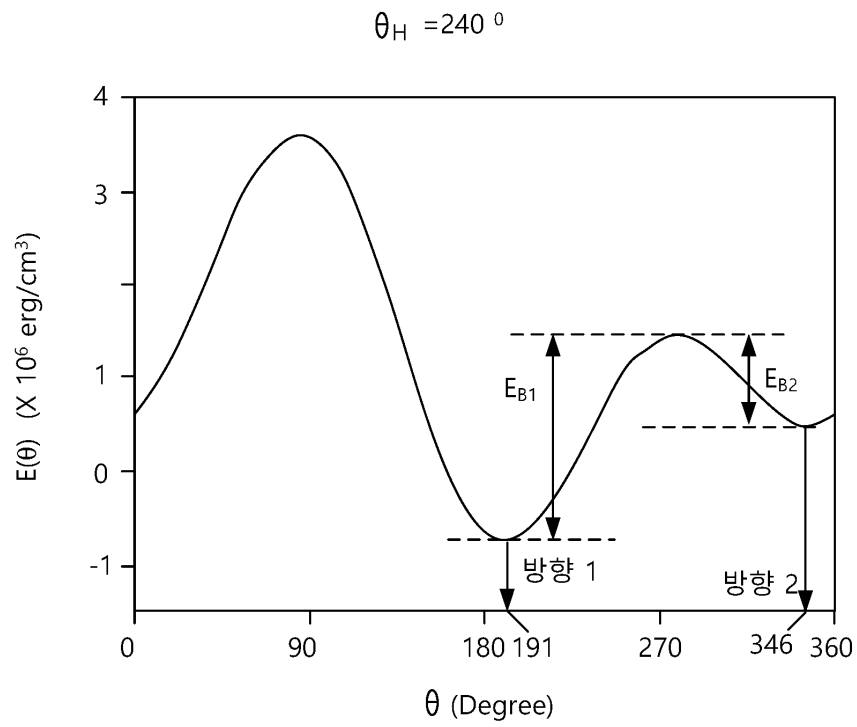
도면4



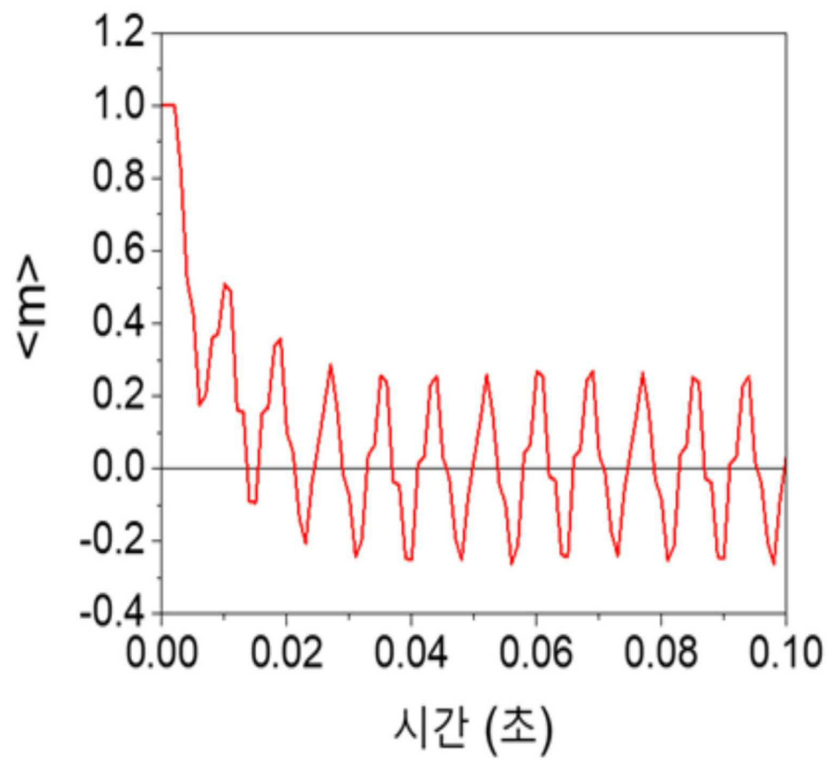
도면5



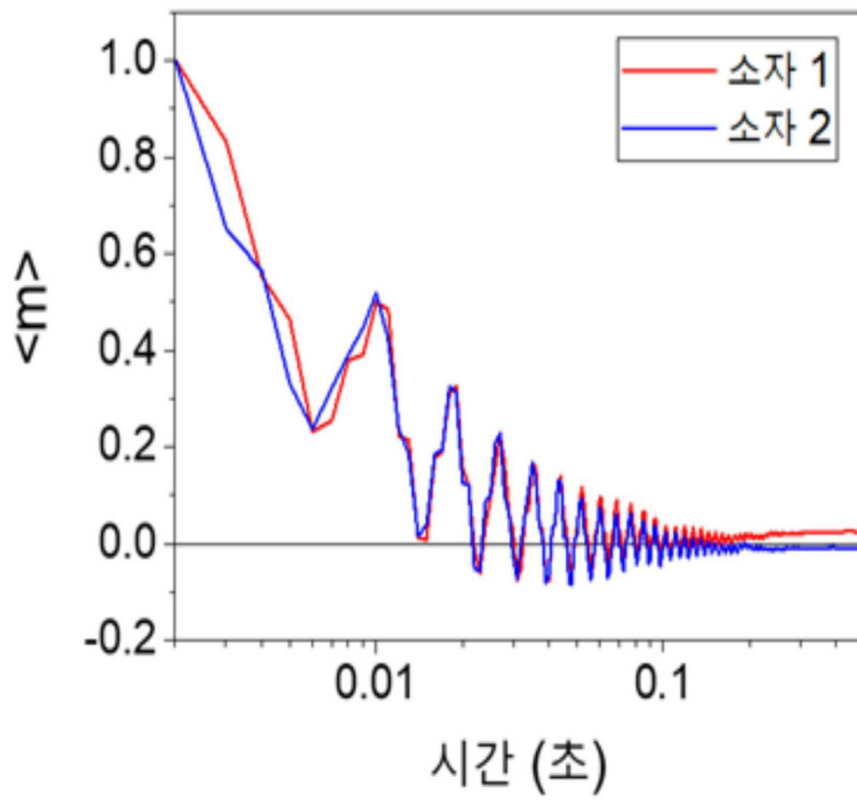
도면6



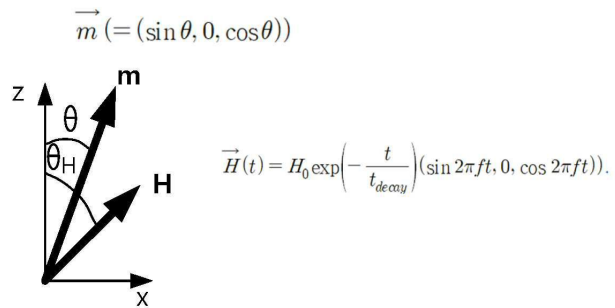
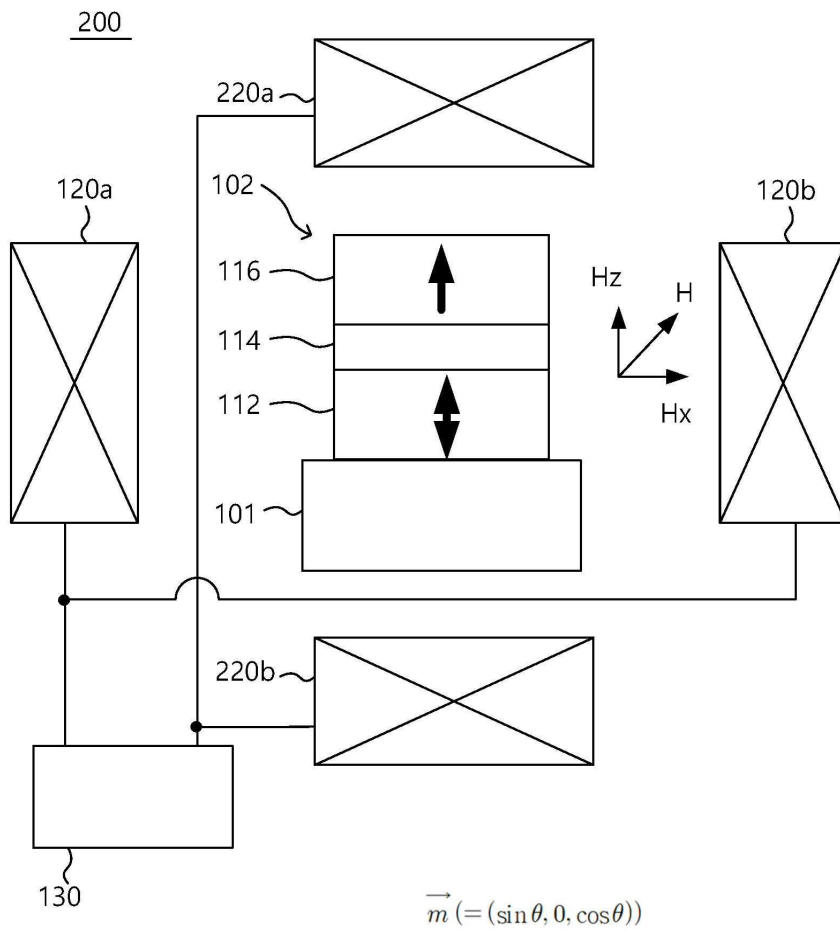
도면7



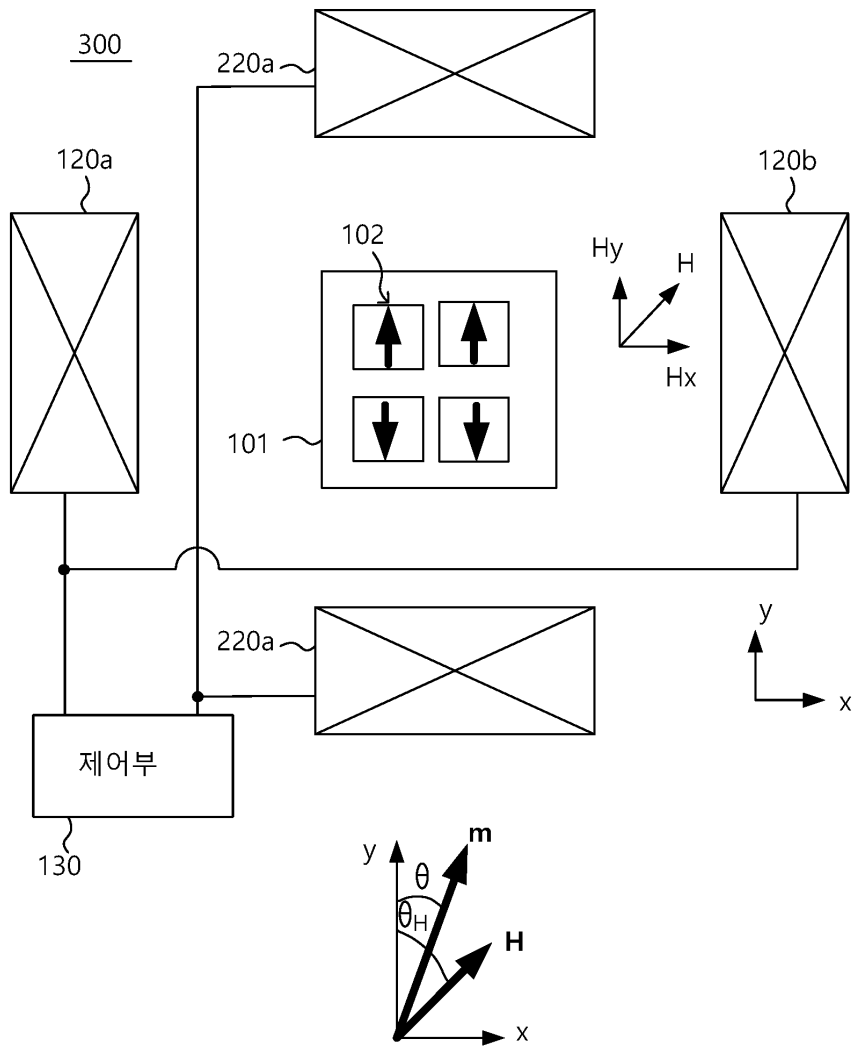
도면8



도면9

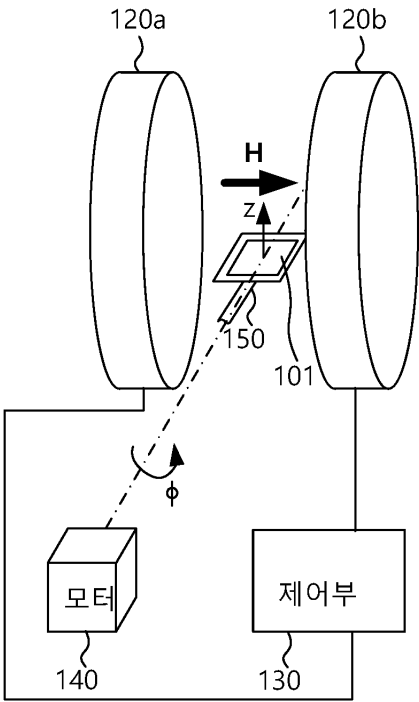


도면10

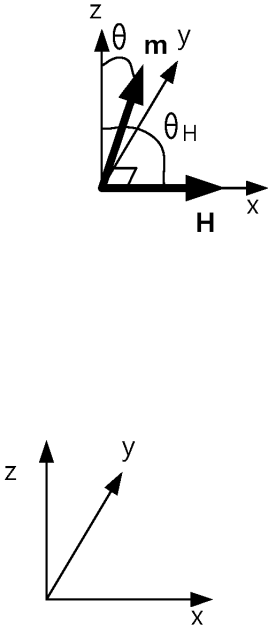


도면11

400



자화 용이축



도면12

