



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2017-0108505
(43) 공개일자 2017년09월27일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

H01F 7/02 (2006.01) H01F 1/147 (2006.01)
H01F 41/02 (2006.01) H01F 41/20 (2006.01)
H01F 41/22 (2006.01)

(52) CPC특허분류

H01F 7/021 (2013.01)
H01F 1/147 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2016-0032533

(22) 출원일자 2016년03월18일

심사청구일자 없음

(71) 출원인

연세대학교 산학협력단

서울특별시 서대문구 연세로 50 (신촌동, 연세대학교)

(72) 발명자

이우영

서울특별시 서대문구 연세로 50, 제2공학과 327-1호 나노소자 연구실

이현숙

서울특별시 서대문구 연세로 50, 제2공학과 327-1호 나노소자 연구실

(뒷면에 계속)

(74) 대리인

특허법인이름리온

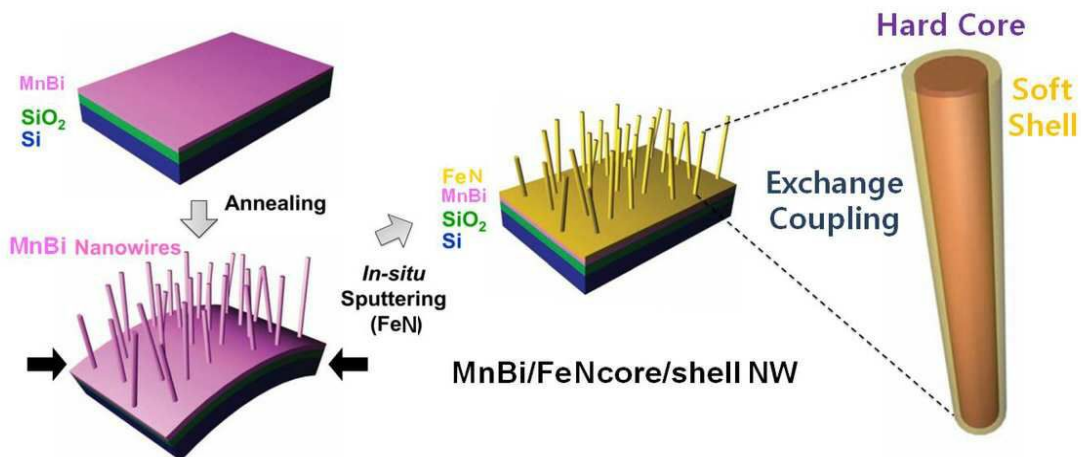
전체 청구항 수 : 총 10 항

(54) 발명의 명칭 복합 영구자석 및 이의 제조방법

(57) 요약

본 발명은 경자성 나노 와이어 코어; 및 상기 코어 표면에 형성된 연자성 셸을 포함하는 복합 영구자석 및 이의 제조방법에 관한 것이다.

대 표 도 - 도1



(52) CPC특허분류

H01F 41/0253 (2013.01)

H01F 41/20 (2013.01)

H01F 41/22 (2013.01)

(72) 발명자

김관래

서울특별시 서대문구 연세로 50, 제2공학과 327-1
호 나노소자 연구실

정희봉

서울특별시 서대문구 연세로 50, 제2공학과 327-1
호 나노소자 연구실

문홍재

서울특별시 서대문구 연세로 50, 제2공학과 327-1
호 나노소자 연구실

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 2009-0093823

부처명 미래창조과학부

연구관리전문기관 학술진흥재단

연구사업명 중점연구소지원사업

연구과제명 나노융합 그린에너지 응용 기술 개발

기 여 율 1/2

주관기관 연세대학교 산학협력단

연구기간 2015.09.01 ~ 2016.08.31이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 2015-11-1507

부처명 신진연구지원사업

연구관리전문기관 한국연구재단

연구사업명 여성과학자지원사업

연구과제명 MnBi 기반 비희토류 복합 영구자석 개발

기 여 율 1/2

주관기관 연세대학교, 나노과학기술연구소

연구기간 2015.11.01 ~ 2018.10.31

명세서

청구범위

청구항 1

경자성 나노 와이어 코어; 및
상기 코어 표면에 형성된 연자성 셸을 포함하는
복합 영구자석.

청구항 2

제1항에 있어서,
상기 코어 및 상기 셸 간 계면에 교환 결합력이 발생하는
복합 영구자석.

청구항 3

제1항에 있어서,
상기 코어의 재질은 MnBi 계 또는 MnAl 계인
복합 영구자석.

청구항 4

제1항에 있어서,
상기 코어의 직경은 20nm 내지 100nm인
복합 영구자석.

청구항 5

제1항에 있어서,
상기 셸의 재질은 Fe계, Co계, FeN계, FeCo계 및 FeNi 계로 이루어진 군으로부터 선택된 것인
복합 영구자석.

청구항 6

제1항에 있어서,
상기 셸의 두께는 5nm 내지 30nm인
복합 영구자석.

청구항 7

제1항에 있어서,
상기 코어의 직경 및 상기 쉘의 두께의 비는 0.8:1 내지 5:1인
복합 영구자석.

청구항 8

제1항에 있어서,
상기 복합 영구자석의 최대 자기에너지적이 20 MGOe 이상인
복합 영구자석.

청구항 9

(a) 기판 상에 경자성 박막을 증착시키는 단계;
(b) 상기 증착된 박막을 열처리하여 경자성 나노 와이어 어레이를 성장시키는 단계; 및
(c) 상기 성장된 경자성 나노 와이어 어레이 표면에 연자성 박막을 증착시키는 단계를 포함하는
복합 영구자석의 제조방법.

청구항 10

제9항에 있어서,
상기 열처리는 1×10^{-7} Torr 내지 1×10^{-3} Torr의 압력 조건 하에, 300℃ 내지 400℃의 온도에서 수행되는
복합 영구자석의 제조방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 복합 영구자석 및 이의 제조방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0003] 저탄소/녹색성장 이라는 새로운 산업 발전 모델의 대두로 풍력발전소 등 모터, 액츄에이터, 발전기 등에 사용되어 에너지 변환(전기↔기계에너지)의 핵심적인 역할을 하는 영구자석이 핵심소재로 부상하고 있으며 이와 더불어 하이브리드 및 전기 자동차 등 응용시장 확대에 따라 영구자석에 대한 수요가 급격히 증가하고 있다.

[0004] 고성능 영구자석으로 널리 이용되고 있는 희토류계 영구자석은 저온 및 상온 영역에서는 높은 보자력의 특성을 지니지만, 고온 영역에서는 보자력이 급격하게 감소하는 단점이 있다. 이에 따라 하이브리드 및 전기자동차 모터의 구동 온도인 약 200℃인 영역에서는 그 적용이 제한적이다.

[0005] 희토류 원소는 전량 수입에 의존하고 있으며, 최근 중국 등 희토류 자원 보유국에서 희토류를 독과점, 전략소재 화하고 있어 고온영역에서 사용이 가능하고, 희토류 영구자석을 대체할 수 있는 비희토류 영구자석에 대한 연구가 시급하다.

[0006] 비희토류 영구자석에 대한 연구는 미국, 일본, 중국을 중심으로 그 연구가 점차 활발히 진행되고 있는 반면, 국내 연구는 매우 미진한 실정이다. 이에 따라 향후 기술 종속화 및 해외의 원천특허로 인해 희토류에 이어 비희

토류 영구자석에 대한 국내 산업 또한 중식될 우려가 있다.

- [0007] 현재 비희토류 영구자석 개발에 관련한 국가사업은 전무하며 미래자동차, 에너지 및 전자 산업에 안정적으로 핵심소재를 수급하게 위해서 차세대 비희토류 영구자석 소재 원천기술 확보를 위한 국내 연구개발과 투자가 시급하다.
- [0008] 비희토류 영구자석 중 MnBi는 Low-temperature Phase (LTP)에서 경자성의 성질을 보이며, 비교적 높은 상온 자기 모멘트, 강한 상온 자기 결정 이등방성($K \approx 10^7 \text{ erg/cm}^3$)과 17.6 MGOe에 달하는 높은 최대 자기에너지적 $((BH)_{\max})$ 으로 인해 비희토류 영구자석의 유력한 후보로 연구되어 왔다.
- [0009] 현재 산업분야에서 쓰이는 Nd계 희토류 영구자석은 온도가 올라감에 따라 보자력이 급격하게 감소하는 단점을 가졌으나, MnBi는 이와 반대로 온도가 올라갈수록 보자력이 증가하는 특별한 성질을 지니고 있어 고온영역에서의 적용이 매우 유리하다.

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0011] 본 발명은 높은 보자력 및 포화 자화력을 동시에 구현할 수 있는, 경자성 나노 와이어 코어; 및 상기 코어 표면에 형성된 연자성 셸을 포함하는 복합 영구자석 등을 제공한다.
- [0012] 그러나, 본 발명이 이루고자 하는 기술적 과제는 이상에서 언급한 과제에 제한되지 않으며, 언급되지 않은 또 다른 과제들은 아래의 기재로부터 당업자에게 명확하게 이해될 수 있을 것이다.

과제의 해결 수단

- [0014] 본 발명은 경자성 나노 와이어 코어; 및 상기 코어 표면에 형성된 연자성 셸을 포함하는 복합 영구자석을 제공한다.
- [0015] 상기 코어 및 상기 셸 간 계면에 교환 결합력이 발생할 수 있다.
- [0016] 상기 코어의 재질은 MnBi계 또는 MnAl계일 수 있다.
- [0017] 상기 코어의 직경은 20nm 내지 100nm일 수 있다.
- [0018] 상기 셸의 재질은 Fe계, Co계, FeN계, FeCo계 및 FeNi 계로 이루어진 군으로부터 선택된 것일 수 있다.
- [0019] 상기 셸의 두께는 5nm 내지 30nm일 수 있다.
- [0020] 상기 코어의 직경 및 상기 셸의 두께의 비는 0.8:1 내지 5:1일 수 있다.
- [0021] 상기 복합 영구자석의 최대 자기에너지적이 20 MGOe 이상일 수 있다.
- [0022] 본 발명의 일 구현예로, (a) 기판 상에 경자성 박막을 증착시키는 단계; (b) 상기 증착된 박막을 열처리하여 경자성 나노 와이어 어레이를 성장시키는 단계; 및 (c) 상기 성장된 경자성 나노 와이어 어레이 표면에 연자성 박막을 증착시키는 단계를 포함하는 복합 영구자석의 제조방법을 제공한다.
- [0023] 상기 열처리는 $1 \times 10^{-7} \text{ Torr}$ 내지 $1 \times 10^{-3} \text{ Torr}$ 의 압력 조건 하에, 300℃ 내지 400℃의 온도에서 수행될 수 있다.

발명의 효과

- [0025] 본 발명에 따른 복합 영구자석은 경자성 나노 와이어 코어; 및 상기 코어 표면에 형성된 연자성 셸을 포함하는 것을 특징으로 하는바, 상기 코어 및 상기 셸 간 계면에 교환 결합력을 발생시킬 수 있어, 높은 보자력 및 포화 자화력을 동시에 구현할 수 있는 이점이 있다. 특히, 상기 코어 및 상기 셸의 두께비를 최적화하고, 상기 코어 및 상기 셸 간 계면 거칠기를 조절함으로써, 이러한 이점을 극대화시킬 수 있다.

[0026] 따라서, 상기 복합 영구자석은 전기자동차 모터 구동 부품 뿐만 아니라, 자기저장소재 등 미래 첨단 정보 통신 및 구동 부품에 널리 활용될 것으로 기대된다.

도면의 간단한 설명

[0028] 도 1은 본 발명의 일구현예에 따른 복합 영구자석의 제조방법을 도시한 그림이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0029] 본 발명자들은 높은 보자력 및 포화 자화력을 동시에 구현시키기 위한 복합 영구자석에 대한 연구를 하던 중, 경자성 나노 와이어 코어-연자성 셸 구조의 복합 영구자석을 제조하여, 코어-셸 간 계면에 교환 결합력을 발생 시킴을 확인하고, 본 발명을 완성하였다.

[0031] 이하, 본 발명을 상세히 설명한다.

복합 영구자석

[0034] 본 발명은 경자성 나노 와이어 코어; 및 상기 코어 표면에 형성된 연자성 셸을 포함하는 복합 영구자석을 제공한다.

[0035] 본 발명에 따른 복합 영구자석은 상기 코어 및 상기 셸 간 계면에 교환 결합력을 발생시킬 수 있어, 높은 보자력 및 포화 자화력을 동시에 구현할 수 있는 이점이 있다.

[0036] 상기 복합 영구자석은 코어의 직경 및 셸의 두께를 각각 일정하게 유지함으로써, 최대 자기에너지적($(BH)_{\max}$)이 20 MGOe 이상일 수 있고, 최대 자기에너지적($(BH)_{\max}$)이 25 MGOe 이상인 것이 바람직하나, 이에 한정되지 않는다.

[0037] 또한, 상기 복합 영구자석은 코어의 직경 및 셸의 두께의 비를 일정하게 유지함으로써, 25℃에서 이론적 보자력(H_c)이 800 Oe 이상이면서, 이론적 포화자화력(σ_s)이 80 emu/g 이상일 수 있다.

[0039] 교환 결합력을 발생시키는 복합 영구자석을 제조하기 위해, 종래에는 경자성 박막 및 연자성 박막을 교차 적층하여, 박막 간 계면에 교환 결합력을 발생시킴으로써, 연자성의 낮은 보자력을 향상시키고, 경자성의 낮은 포화 자화력을 향상시키는 연구가 이루어지고 있다. 상기와 같은 적층형 박막 구조 외에도, 경자성 구형 코어-연자성 셸 구조의 복합 영구자석을 제조하는 여러 시도 역시 이루어지고 있다.

[0040] 이러한 적층형 박막 구조의 경우 계면 표면적에 한계로 인해 교환 결합력을 충분히 발생시키기 어렵고, 구형 코어-셸 구조의 경우 입자 또는 계면 제어가 어려운 문제점이 있어 왔다. 특히, 구형 코어-셸 구조의 경우, 구형 코어 상에 셸을 증착함에 있어, 균일한 증착이 어려운 문제점이 있어 왔다.

[0041] 따라서, 종래의 적층형 박막 구조 또는 구형 코어-셸 구조의 복합 영구자석의 최대 자기에너지적은 이론값에 훨씬 미치지 못하는 10 MGOe 이하에 불과했다.

[0042] 이를 극복하기 위해, 본 발명에서는 구형 코어 대신, 나노 와이어 코어를 사용한 것을 특징으로 한다.

[0044] 먼저, 본 명세서에서 “영구자석(permanent magnet)”라 함은 잔류자기와 보자력이 큰 물질을 사용하여 제작되어, 강한 자화 상태를 오래 보존하는 자석으로, 외부로부터 전기에너지를 공급받지 않아도 자성을 안정되게 유지한다.

[0045] 본 발명에서는 영구자석 중 희토류 원소를 사용하지 않는 비희토류 영구자석을 사용하였다.

- [0047] 또한, 본 명세서에서 “보자력(coercive force; H_c)”이라 함은 자화된 자성체의 자화도를 0으로 만들기 위해 걸어주는 역자기장의 세기로서, 이 값은 물질에 따라 고유한 값을 가지며, 영구자석으로 사용할 물질은 이 값이 클수록 좋은바, 응용시 구동 환경을 제한하는 중요한 특성이다.
- [0048] 또한, 본 명세서에서 “포화 자화력(saturation magnetization; M_s)”이라 함은 강자성체를 자화했을 때, 자속 밀도는 자계의 세기와 더불어 증가하지만, 어느 값에 도달하게 되면 자계의 세기를 아무리 증가시켜도 그 이상으로 강해지지 않는다. 이와 같이 한계에 달한 자화의 세기를 말한다.
- [0050] 구체적으로, 본 발명에 따른 복합 영구자석은 경자성 나노와이어 코어를 포함하는데, 상기 나노와이어는 나노 크기의 직경을 가지는 와이어 구조체를 의미하는 것으로, 외부 표면적이 넓은 이점을 가지고, 구조체 또는 계면 제어가 용이한 이점이 있다.
- [0051] 상기 코어의 재질은 외부 자장을 인가하여 한번 자화하면 외부 자장이 없어도 자화가 좀처럼 소실되지 않는, 특히,보자력이 높은 경자성(hard magnetism) 물질로 이루어지는 것으로, 구체적으로, MnBi계 또는 MnAl계 재질을 포함하는 것이 바람직하나, 이에 한정되지 않는다.
- [0052] 이때, 상기 코어의 직경은 20nm 내지 100nm인 것이 바람직하고, 30nm 내지 50nm인 것이 더욱 바람직하나, 이에 한정되지 않는다. 상기 코어의 직경이 클수록, 최대 자기에너지적은 커지는 경향이 있으나, 상기 코어의 직경이 너무 작은 경우,보자력이 저하되는 문제점이 있고, 상기 코어의 직경이 너무 큰 경우, 교환결합력이 약해지는 문제점이 있다.
- [0054] 다음으로, 본 발명에 따른 복합 영구자석은 상기 코어 표면에 형성된 연자성 셸을 포함하는데, 상기 셸은 주로 증착을 통해 피막 형태 또는 입자 형태로 형성될 수 있다. 상기 증착은 스퍼터링, 진공증발법, 화학기상법, 원자층 증착법, 이온빔증착법, 스크린프린팅, 스프레이 딥코팅, 테이프캐스팅 및 잉크젯으로 이루어진 군으로부터 선택된 하나 이상의 공지의 방법에 의한 것일 수 있고, 스퍼터링 방법에 의한 것이 바람직하나, 이에 한정되지 않는다.
- [0055] 상기 셸의 재질은 외부 자장을 인가하였을때만 자화되고, 외부 자장을 제거하면 자화는 거의 손실하는 특히, 포화 자화력이 높은 경자성(soft magnetism) 물질로 이루어지는 것으로, 구체적으로, Fe계, Co계, FeN계, FeCo계 및 FeNi계로 이루어진 군으로부터 선택되는 것이 바람직하나, 이에 한정되지 않는다.
- [0056] 이때, 상기 셸의 두께는 5nm 내지 30nm인 것이 바람직하고, 10nm 내지 20nm인 것이 바람직하나, 이에 한정되지 않는다. 상기 셸의 두께가 두꺼울수록, 최대 자기에너지적은 커지는 경향이 있으나, 상기 셸의 두께가 너무 얇은 경우, 잔류 자화값이 저하되는 문제점이 있고, 상기 셸의 두께가 너무 두꺼운 경우, 교환결합력이 약해지는 문제점이 있다. 구체적으로, 상기 셸의 두께는 교환결합력을 발생시키기 위해서는 상기 코어의 재질의 자구와 자구의 경계면인 블로흐 도메인 벽(Bloch domain Wall)의 두께의 2배 보다는 작아야 한다(셸의 두께 \leq 블로흐 도메인 벽의 두께 $\times 2$). 일 예로, 상기 코어의 재질이 MnAl계인 경우, 블로흐 도메인 벽의 두께가 약 15nm인바, 상기 셸의 두께는 약 30nm 이하여야 한다.
- [0058] 상기 코어의 재질이 MnBi계인 경우, 상기 코어의 직경 및 상기 셸의 두께에 따른 최대 자기에너지적을 나타내면, 하기 표 1과 같다.

표 1

[0059]	MnBi계 코어의 직경	셸의 두께	최대 자기에너지적
	100 nm	30 nm	50 MGOe
	70 nm	28 nm	48 MGOe
	50 nm	12nm	28 MGOe

- [0061] 상기 코어의 재질이 MnAl계인 경우, 상기 코어의 직경 및 상기 셸의 두께에 따른 최대 자기에너지적을

나타내면, 하기 표 2와 같다.

표 2

MnAl계 코어의 직경	셸의 두께	최대 자기에너지적
100 nm	25 nm	42 MGOe
70 nm	20 nm	39 MGOe
50 nm	9 nm	30 MGOe

상기 표 1 및 표 2에 나타난 바와 같이, 상기 복합 영구자석의 코어의 직경 및 셸의 두께를 각각 일정하게 유지하는 경우, 적어도 28 MGOe 이상의 최대 자기에너지적($(BH)_{\max}$)을 가질 수 있는 것으로 확인된다.

또한, 상기 코어의 직경 및 상기 셸의 두께는 최적화된 비를 가짐으로써, 최적화된 교환 결합력을 발생시킬 수 있어, 높은 보자력 및 포화 자화값을 동시에 구현할 수 있다. 바람직하게, 상기 코어의 직경 및 상기 셸의 두께는 0.8:1 내지 5:1인 것이 바람직하나, 이에 한정되지 않는다. 이때, 상기 코어의 직경 및 상기 셸의 두께가 0.8:1 미만인 경우, 코어의 직경이 상대적으로 얇은 관계로 보자력이 저하되는 문제점이 있고, 상기 코어의 직경 및 상기 셸의 두께가 5:1을 초과하는 경우, 셸의 두께가 상대적으로 얇은 관계로 포화 자화력이 저하되는 문제점이 있다.

상기 코어의 재질이 MnBi계이고, 상기 셸의 재질이 FeCo계($Fe_{0.65}Co_{0.35}$)인 경우, 상기 코어의 직경 및 상기 셸의 두께의 비에 따른 이론적 포화자화력 및 이론적 보자력을 나타내면, 하기 표 3과 같다.

표 3

코어 직경(f_h) 및 셸 두께 (f_s)의 비 ($f_h + f_s = 1$)		이론적 포화자화력	이론적 보자력
f_h	f_s		
0	1	162 emu/g	116 Oe
0.23	0.77	139 emu/g	389 Oe
0.47	0.53	115 emu/g	800 Oe
0.71	0.29	90 emu/g	1439 Oe
0.76	0.24	85 emu/g	1626 Oe
0.82	0.18	80 emu/g	1832 Oe
0.93	0.07	69 emu/g	2409 Oe
1	0	62 emu/g	2838 Oe

상기 표 3에 나타난 바와 같이, 상기 복합 영구자석의 코어의 직경 및 셸의 두께의 비를 일정하게 유지함으로써 (바람직하게, 0.47:0.53~0.82~0.18), 25℃에서 800 Oe 이상의 이론적 보자력(H_c)과 80 emu/g 이상의 이론적 포화자화력(σ_s)을 동시에 갖을 수 있는 것으로 확인된다.

본 발명에 따른 복합 영구자석은 경자성 나노 와이어 코어; 및 상기 코어 표면에 형성된 연자성 셸을 포함하는 것을 특징으로 하는바, 상기 코어 및 상기 셸 간 계면에 교환 결합력을 발생시킬 수 있어, 높은 보자력 및 포화 자화력을 동시에 구현할 수 있는 이점이 있다. 특히, 상기 코어 및 상기 셸의 두께비를 최적화하고, 상기 코어 및 상기 셸 간 계면 거칠기를 조절함으로써, 이러한 이점을 극대화시킬 수 있다.

따라서, 상기 복합 영구자석은 전기자동차 모터 구동 부품 뿐만 아니라, 자기저장소재 등 미래 첨단 정보 통신

및 구동 부품에 널리 활용될 것으로 기대된다.

[0076] 복합 영구자석의 제조방법

[0077] 본 발명은 (a) 기판 상에 경자성 박막을 증착시키는 단계; (b) 상기 증착된 박막을 열처리하여 경자성 나노 와이어 어레이를 성장시키는 단계; 및 (c) 상기 성장된 경자성 나노 와이어 어레이 표면에 연자성 박막을 증착시키는 단계를 포함하는 복합 영구자석의 제조방법을 제공한다.

[0079] 본 발명의 일구현예에 따른 복합 영구자석(예를 들어, MnBi계 코어-FeN계 셸)의 제조방법은 도 1에 도시한 바와 같다.

[0081] 먼저, 본 발명에 따른 복합 영구자석의 제조방법은 기판 상에 경자성 박막을 증착시키는 단계[(a) 단계]를 포함한다.

[0082] 상기 기판의 재질은 한정되지 않으나, 실리콘 재질일 수 있고, 표면이 일부 산화될 수 있어, 표면에 실리콘 산화물층을 형성할 수 있다.

[0083] 상기 경자성 박막은 경자성 나노 와이어 코어를 형성하기 위한 프리커서에 해당하는 것으로, 상기 경자성 박막의 재질은 상기 경자성 나노와이어 코어의 재질에서 설명한 바와 같고, 30nm 내지 100nm의 두께로 증착될 수 있다.

[0084] 구체적으로, 상기 증착은 스퍼터링, 진공증발법, 화학기상법, 원자층 증착법, 이온빔증착법, 스크린프린팅, 스프레이 덩코팅, 테이프캐스팅 및 잉크젯으로 이루어진 군으로부터 선택된 하나 이상의 공지의 방법에 의한 것일 수 있고, 스퍼터링 방법에 의한 것이 바람직하나, 이에 한정되지 않는다.

[0086] 다음으로, 본 발명에 따른 복합 영구자석의 제조방법은 상기 증착된 박막을 열처리하여 경자성 나노 와이어 어레이를 성장시키는 단계[(b) 단계]를 포함한다.

[0087] 상기 경자성 나노 와이어 어레이의 재질 및 각 직경은 상기 경자성 나노와이어 코어의 재질 및 직경에서 설명한 바와 같다.

[0088] 상기 열처리는 기판과 증착된 박막 간의 열팽창계수 차이를 이용하기 위한 것으로, 진공 조건 하에 고온에서 수행될 수 있다. 즉, 상기 열처리를 통하여 부피 팽창이 큰 박막은 부피 팽창이 작은 기판에 압축 응력을 인가시키게 될 것이다.

[0089] 구체적으로, 상기 열처리는 1×10^{-7} Torr 내지 1×10^{-3} Torr의 압력 조건 하에, 300℃ 내지 400℃의 온도에서 수행될 수 있다. 상기 열처리 조건으로 인하여, 부피 팽창 차이를 조절할 수 있으므로, 열처리 온도 및 시간이 증가할수록 박막은 기판에 더 큰 압축 응력을 인가시킬 것이다.

[0090] 상기 열처리 후, 냉각시키는 단계를 추가할 수 있는데, 냉각시, 열처리로 인하여 팽창된 박막이 평형 상태로 가기 위해 수축되므로 압축 응력이 일어나는데, 이러한 압축 응력은 냉각 중에 나노와이어 어레이의 성장을 통해 유효하게 해소할 수 있다. 또한, 냉각을 통해, 경자성 나노 와이어 코어 어레이 표면 거칠기를 부드럽게 제어할 수 있어, 코어 및 셸 간 계면에 교환 결합력을 최적화시킬 수 있다.

[0092] 마지막으로, 본 발명에 따른 복합 영구자석의 제조방법은 상기 성장된 경자성 나노 와이어 어레이 표면에 연자성 박막을 증착시키는 단계[(c) 단계]를 포함한다.

[0093] 상기 연자성 박막의 재질 및 두께는 상기 연자성 셸의 재질 및 두께에서 설명한 바와 같다.

[0094] 구체적으로, 상기 증착을 통해, 피막 형태 또는 입자 형태의 셸을 형성할 수 있는 것으로, 상기 경자성 나노와이어 어레이의 형성 후, 인시츄(in-situ)에서 수행될 수 있다. 상기 증착은 스퍼터링, 진공증발법, 화학기상법, 원자층 증착법, 이온빔증착법, 스크린프린팅, 스프레이 덩코팅, 테이프캐스팅 및 잉크젯으로 이루어진 군으로부터

터 선택된 하나 이상의 공지의 방법에 의한 것일 수 있고, 스퍼터링 방법에 의한 것이 바람직하나, 이에 한정되지 않는다.

[0096] 이하, 본 발명의 이해를 돕기 위하여 바람직한 실시예를 제시한다. 그러나 하기의 실시예는 본 발명을 보다 쉽게 이해하기 위하여 제공되는 것일 뿐, 하기 실시예에 의해 본 발명의 내용이 한정되는 것은 아니다.

[0098] **[실시예]**

[0099] **실시예 1**

[0100] 챔버 내 4mm×4mm 면적(0.8mm 두께)의 표면이 일부 산화된 실리콘 기판 상에 고진공 마그네트론 스퍼터링(UHV magnetron sputtering) 장비(Sntek 社)를 이용하여 2×10^{-7} Torr 압력 조건에서 스퍼터링을 수행하여 약 70nm 두께의 MnBi 박막을 증착시켰다. 이후, 2×10^{-4} Torr 압력 조건 하에, 350℃의 온도에서 열처리 및 상온으로 급냉을 통해 약 50nm 직경 및 약 400 μ m 길이의 MnBi 나노 와이어 어레이를 성장시켰다.

[0101] 동일 챔버 내에서 성장된 MnBi 나노 와이어 어레이 표면에 고진공 마그네트론 스퍼터링(UHV magnetron sputtering) 장비(Sntek 社)를 이용하여 2×10^{-7} Torr 압력 조건에서 스퍼터링을 수행하여 약 20nm 두께의 FeN 박막을 증착시켰다.

[0103] **실시예 2**

[0104] 챔버 내 4mm×4mm 면적(0.8mm 두께)의 표면이 일부 산화된 실리콘 기판 상에 고진공 마그네트론 스퍼터링(UHV magnetron sputtering) 장비(Sntek 社)를 이용하여 2×10^{-7} Torr 압력 조건에서 스퍼터링을 수행하여 약 70nm 두께의 MnBi 박막을 증착시켰다. 이후, 2×10^{-4} Torr 압력 조건 하에, 350℃의 온도에서 열처리 및 상온으로 급냉을 통해 약 50nm 직경 및 약 400 μ m 길이의 MnBi 나노 와이어 어레이를 성장시켰다.

[0105] 동일 챔버 내에서 성장된 MnBi 나노 와이어 어레이 표면에 고진공 마그네트론 스퍼터링(UHV magnetron sputtering) 장비(Sntek 社)를 이용하여 2×10^{-7} Torr 압력 조건에서 스퍼터링을 수행하여 약 20nm 두께의 FeCo 박막을 증착시켰다.

[0107] 전술한 본 발명의 설명은 예시를 위한 것이며, 본 발명이 속하는 기술분야의 통상의 지식을 가진 자는 본 발명의 기술적 사상이나 필수적인 특징을 변경하지 않고서 다른 구체적인 형태로 쉽게 변형이 가능하다는 것을 이해할 수 있을 것이다. 그러므로 이상에서 기술한 실시예들은 모든 면에서 예시적인 것이며 한정적이 아닌 것으로 이해해야만 한다.

도면

도면1

