



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2023-0082852
(43) 공개일자 2023년06월09일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
B22F 9/04 (2006.01) B22F 3/03 (2006.01)
B22F 3/10 (2006.01) C23C 14/28 (2006.01)
(52) CPC특허분류
B22F 9/04 (2013.01)
B22F 3/03 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2021-0170705
(22) 출원일자 2021년12월02일
심사청구일자 2021년12월02일

(71) 출원인
성균관대학교산학협력단
경기도 수원시 장안구 서부로 2066 (천천동, 성균관대학교내)
경희대학교 산학협력단
경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732 (서천동, 경희대학교 국제캠퍼스내)
(72) 발명자
이종수
경기도 용인시
김진희
경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732, 경희대 국제캠퍼스
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
한상수

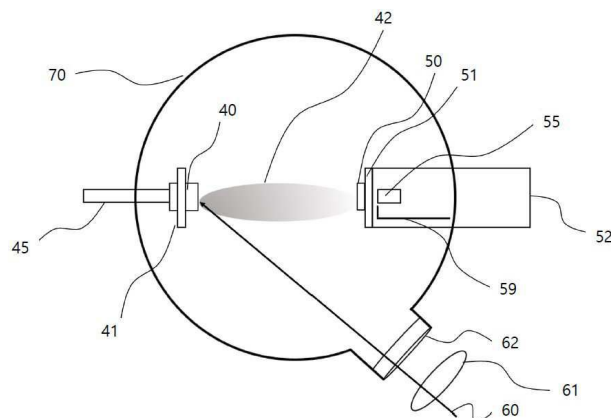
전체 청구항 수 : 총 23 항

(54) 발명의 명칭 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법, 이에 의해 제조된 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체 및 이를 사용한 박막형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법

(57) 요약

벌크형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법, 이에 의해 제조된 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체 및 이를 사용한 박막형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법이 개시된다. 상기 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법은 나이오븀(Nb), 탄탈럼(Ta), 타이타늄(Ti), 하프늄(Hf), 지르코늄(Zr), 텅스텐(W), 몰리브데넘(Mo), 크로뮴(Cr), 바나듐(V) 및 레늄(Re)을 포함하는 군에서 선택된 4 내지 10 종의 금속을 혼합한 후 밀링하여 혼합 금속 분말을 제조하는 제1 단계; 및 상기 제1 단계에서 제조된 혼합 금속 분말을 소결하는 제2 단계; 를 포함한다. 상기 박막형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법은 상기 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법으로 제조된 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체를 타겟으로 준비하는 제1 단계; 및 상기 타겟을 증발시켜 기판에 증착하여 기판 상에 박막형 합금을 형성하는 제2 단계; 를 포함한다.

대표도 - 도6



(52) CPC특허분류

B22F 3/10 (2013.01)

C23C 14/28 (2013.01)

B22F 2009/043 (2013.01)

(72) 발명자

박두선

경기도 수원시 장안구 서부로 2066, 성균관대학교
물리학과

정순길

경기도 수원시 장안구 서부로 2066, 성균관대학교
물리학과

한윤석

경기도 수원시 장안구 서부로 2066, 성균관대학교
물리학과

강원남

경기도 수원시 장안구 서부로 2066, 성균관대학교
물리학과

최우석

경기도 수원시 장안구 화산로 85, 121동 2304호(천
천동, 천천 푸르지오)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1345333546
과제번호	2021R1I1A1A01043885
부처명	교육부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	이공학학술연구기반구축(R&D)
연구과제명	이온조사를 이용한 초전도체-절연체 양자상전이 연구
기 여 율	1/3
과제수행기관명	성균관대학교(자연과학캠퍼스)
연구기간	2021.06.01 ~ 2022.02.28

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711113284
과제번호	2012R1A3A2048816
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	개인기초연구(과기정통부)(R&D)
연구과제명	양자물질 초전도연구
기 여 율	1/3
과제수행기관명	성균관대학교
연구기간	2020.03.01 ~ 2021.02.28

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711133576
과제번호	2021R1A2C2011340
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	개인기초연구(과기정통부)(R&D)
연구과제명	원자층 단위 제어를 통한 양자 산화물 구현
기 여 율	1/3
과제수행기관명	성균관대학교(자연과학캠퍼스)
연구기간	2021.03.01 ~ 2022.02.28

명세서

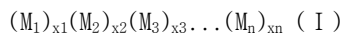
청구범위

청구항 1

나이오븀(Nb), 탄탈럼(Ta), 타이타늄(Ti), 하프늄(Hf), 지르코늄(Zr), 텅스텐(W), 몰리브데넘(Mo), 크로뮴(Cr), 바나듐(V) 및 레늄(Re)을 포함하는 군에서 선택된 4 내지 10 종의 금속을 혼합한 후 밀링(milling)하여 혼합 금속 분말을 제조하는 제1 단계; 및

상기 제1 단계에서 제조된 혼합 금속 분말을 소결하여 하기 화학식 I에 따른 합금을 제조하는 제2 단계; 를 포함하는,

벌크형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법:



여기서,

n은 4 내지 10의 정수이고,

M_1 내지 M_n 은 각각 나이오븀(Nb), 탄탈럼(Ta), 타이타늄(Ti), 하프늄(Hf), 지르코늄(Zr), 텅스텐(W), 몰리브데넘(Mo), 크로뮴(Cr), 바나듐(V) 및 레늄(Re)을 포함하는 군에서 선택된 4 내지 10 종의 금속을 의미하며,

x_1 내지 x_n 은 1 이상의 정수로써, x_1 내지 x_n 의 총합에 대하여 5 내지 35 %의 값을 가지는 정수이다.

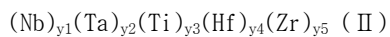
청구항 2

제1항에 있어서,

상기 제1 단계의 금속은 나이오븀(Nb), 탄탈럼(Ta), 타이타늄(Ti), 하프늄(Hf) 및 지르코늄(Zr)을 포함하고,

상기 제2 단계에서 제조된 합금은 하기 화학식 II을 가지는 것을 특징으로 하는,

벌크형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법:



여기서,

y_1 내지 y_5 는 1 이상의 정수로써, y_1 내지 y_5 의 총합에 대하여 5 내지 35 %의 값을 가지는 정수이다.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 y_1 은 2이고,

상기 y_2 는 1이며,

상기 y_3 은 1이고,

상기 y_4 는 1이며,

상기 y_5 는 1인 것을 특징으로 하는,

벌크형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 제1 단계의 밀링은 볼 밀링(ball milling)으로 진행되는 것을 특징으로 하는,

벌크형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법.

청구항 5

제4항에 있어서,

상기 볼 밀링은 200 내지 600 RPM에서 9 내지 15 시간 동안 수행되는 것을 특징으로 하는,

벌크형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법.

청구항 6

제4항에 있어서,

상기 볼 밀링은 아르곤 가스 분위기 하에서 진행되는 것을 특징으로 하는,

벌크형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법.

청구항 7

제1항에 있어서,

상기 제2 단계의 소결은 상기 혼합 금속 분말을 몰드(mold) 내에 배치한 후, 가압 및 가열하는 과정을 포함하는 것을 특징으로 하는,

벌크형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법.

청구항 8

제7항에 있어서,

상기 몰드는 카본 몰드를 포함하는 것을 특징으로 하는,

벌크형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법.

청구항 9

제7항에 있어서,

상기 가압 과정은 5 내지 500 MPa 로 가압하고,

상기 가열 과정은 500 내지 1300 °C로 가열하며,

가압 및 가열되는 시간은 30분 내지 2시간인 것을 특징으로 하는,

벌크형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법.

청구항 10

제1항 내지 제9항 중 어느 한 항에 따른 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법으로 제조된,

벌크형 고엔트로피 합금 초전도체.

청구항 11

제10항에 있어서,

상기 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체는 원판형 또는 원통 형상이고, 3 내지 50 mm의 지름 및 1 내지 30 mm의 두께를 가지는 것을 특징으로 하는,

벌크형 고엔트로피 합금 초전도체.

청구항 12

제1항 및 제4항 내지 제9항에 따른 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법으로 제조된 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체를 타겟으로 준비하는 제1 단계; 및

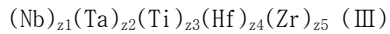
상기 타겟을 증발시켜 기판에 증착하여 기판 상에 박막형 합금을 형성하는 제2 단계; 를 포함하는,
박막형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법.

청구항 13

제12항에 있어서,

상기 타겟은 나이오븀(Nb), 탄탈럼(Ta), 타이타늄(Ti), 하프늄(Hf) 및 지르코늄(Zr)을 포함하고, 하기 화학식 III을 가지는 것을 특징으로 하는,

박막형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법:



여기서,

$z1$ 내지 $z5$ 는 1 이상의 정수로써, $z1$ 내지 $z5$ 의 총합에 대하여 5 내지 35 %의 값을 가지는 정수이다.

청구항 14

제13항에 있어서,

상기 $z1$ 은 2이고,

상기 $z2$ 는 1이며,

상기 $z3$ 은 1이고,

상기 $z4$ 는 1이며,

상기 $z5$ 는 1인 것을 특징으로 하는,

박막형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법.

청구항 15

제12항에 있어서,

상기 타겟은 레이저에 의해 증발되는 것을 특징으로 하는,

박막형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법.

청구항 16

제15항에 있어서,

상기 레이저는 엑시머 펄스레이저인 것을 특징으로 하는,

박막형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법.

청구항 17

제16항에 있어서,

상기 엑시머 펄스레이저는 193 내지 532 nm의 파장의 레이저를 조사하는 것을 특징으로 하는,

박막형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법.

청구항 18

제12항에 있어서,

상기 타겟은 회전하는 상태에서 증발되는 것을 특징으로 하는,

박막형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법.

청구항 19

제12항에 있어서,

상기 기판은 사파이어(Al_2O_3) 단결정 혹은 하스텔로이(Hastelloy)를 포함하는 것을 특징으로 하는,

박막형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법.

청구항 20

제12항에 있어서,

상기 기판은 270 내지 620 °C로 가열되는 것을 특징으로 하는,

박막형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법.

청구항 21

제20항에 있어서,

상기 기판은 할로겐 램프로 가열되는 것을 특징으로 하는,

박막형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법.

청구항 22

제12항에 있어서,

상기 제2 단계는 10^{-7} 내지 10^{-5} Torr의 진공 상태에서 진행되는 것을 특징으로 하는,

박막형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법.

청구항 23

제12항에 있어서,

상기 박막형 합금의 두께가 100 내지 700 nm인 것을 특징으로 하는,

박막형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법, 이에 의해 제조된 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체 및 이를 사용한 박막형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 초전도체는 전기저항이 0이 되는 소재로 전력손실 없이 대전류 송전이 가능하기 때문에 발전기, 모터, 전력 케이블, 에너지저장장치 뿐만 아니라, 고자기장이 필요한 핵융합장치, 자기부상열차, 입자가속기, MRI, NMR 등 수많은 산업, 의학, 그리고 과학 연구 분야에 활용이 가능하다.

[0003] 한편, 고엔트로피 합금은 고강도, 고연성, 우수한 파괴인성을 가지고, 고압, 고온 및 저온 등의 극한 환경에서도 활용이 가능하다. 또한 초전도성을 가져 이를 활용하기 위한 연구가 진행되어왔다. 중요한 초전도 특성 중 하나는 임계 전류 밀도인데, 현재 유의미한 임계 전류 밀도를 가지는 고엔트로피 합금 초전도체에 대한 연구가 부족하다. 따라서 유의미한 임계 전류 밀도를 가지는 고엔트로피 합금 초전도체의 개발이 요구된다.

[0004] 그 중, 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체를 제작하는 기존의 방법은 아크 용해(arc melting)를 이용한다. 아크 용해는 공정의 특성상 대량 생산이 어렵다. 따라서, 우수한 초전도특성을 가지는 고엔트로피 합금 초전도체를 대량으로 생산하는 새로운 공정이 요구된다.

[0005] 특히, 박막형 고엔트로피 합금 초전도체에 대한 연구가 부족하다. 초전도체는 완전도체와 완전 반자성의 두 가

지 특성을 가진다. 이 두 가지 특성을 만족하여야 우수한 초전도특성을 가진다고 할 수 있다. 그러나 박막형 고엔트로피 합금 초전도체에서 임계 전류 밀도 값 및 완전 반자성 특성은 보고되지 않았다. 초전도체 박막은 전자 장비의 소자 및 테일 형태의 초전도 선재 활용으로 유망하기 때문에, 우수한 초전도특성을 가지는 박막형 고엔트로피 합금 초전도체의 제조 방법이 요구된다.

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0006] 본 발명의 일 목적은 고엔트로피 합금 초전도체를 대량으로 생산할 수 있는 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법을 제공하는 것이다.
- [0007] 본 발명의 다른 목적은 상기 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법을 이용하여 우수한 초전도특성을 가지는 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체를 제공하는 것이다.
- [0008] 본 발명의 또 다른 목적은 상기 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체를 사용하여 우수한 초전도특성을 가지는 박막형 고엔트로피 합금 초전도체의 제조 방법을 제공하는 것이다.

과제의 해결 수단

- [0009] 일 측면에서 본 발명은, 나이오븀(Nb), 탄탈럼(Ta), 타이타늄(Ti), 하프늄(Hf), 지르코늄(Zr), 텅스텐(W), 몰리브데넘(Mo), 크로뮴(Cr), 바나듐(V) 및 레늄(Re)을 포함하는 군에서 선택된 4 내지 10 종의 금속을 혼합한 후 밀링(milling)하여 혼합 금속 분말을 제조하는 제1 단계; 및 상기 제1 단계에서 제조된 혼합 금속 분말을 소결하여 하기 화학식 I 에 따른 합금을 제조하는 제2 단계; 를 포함하는 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법을 제공하는 것이다.
- [0010] $(M_1)_{x1}(M_2)_{x2}(M_3)_{x3} \dots (M_n)_{xn} \quad (I)$
- [0011] 여기서, n은 4 내지 10의 정수이고, M_1 내지 M_n 은 각각 나이오븀(Nb), 탄탈럼(Ta), 타이타늄(Ti), 하프늄(Hf), 지르코늄(Zr), 텅스텐(W), 몰리브데넘(Mo), 크로뮴(Cr), 바나듐(V) 및 레늄(Re)을 포함하는 군에서 선택된 4 내지 10 종의 금속을 의미하며, x_1 내지 x_n 은 1 이상의 정수로써, x_1 내지 x_n 의 총합에 대하여 5 내지 35 %의 값을 가지는 정수이다.
- [0012] 상기와 같은 단계를 거쳐 본 발명의 실시예에 따른 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법은 고엔트로피 합금 초전도체의 대량 생산 방법을 제공한다.
- [0013] 상기 제1 단계의 금속은 나이오븀(Nb), 탄탈럼(Ta), 타이타늄(Ti), 하프늄(Hf) 및 지르코늄(Zr)을 포함하고, 상기 제2 단계에서 제조된 합금은 하기 화학식 II을 가질 수 있다.
- [0014] $(Nb)_{y1}(Ta)_{y2}(Ti)_{y3}(Hf)_{y4}(Zr)_{y5} \quad (II)$
- [0015] 여기서, y_1 내지 y_5 는 1 이상의 정수로써, y_1 내지 y_5 의 총합에 대하여 5 내지 35 %의 값을 가지는 정수이다.
- [0016] 상기 y_1 은 2일 수 있고, 상기 y_2 는 1일 수 있으며, 상기 y_3 은 1일 수 있고, 상기 y_4 는 1일 수 있으며, 상기 y_5 는 1일 수 있다.
- [0017] 상기와 같은 금속의 한정을 통해 본 발명의 실시예에 따른 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체는 우수한 초전도특성을 가질 수 있다.
- [0018] 상기 제1 단계의 밀링은 볼 밀링(ball milling)으로 진행될 수 있다.
- [0019] 상기 볼 밀링은 200 내지 600 RPM에서 9 내지 15 시간 동안 수행될 수 있다.
- [0020] 상기와 같은 볼 밀링 공정을 통해 본 발명의 실시예에 따른 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체의 제1 단계는 대량 생산에 적합하다.
- [0021] 상기 볼 밀링은 아르곤 가스 분위기 하에서 진행될 수 있다.
- [0022] 상기와 같은 조건을 통해 볼 밀링 과정에서 금속의 산화를 방지할 수 있다.
- [0023] 상기 제2 단계의 소결은 상기 혼합 금속 분말을 몰드(mold) 내에 배치한 후, 가압 및 가열하는 과정을 포함할

수 있다.

- [0024] 상기와 같이 몰드를 통한 소결을 통해 본 발명의 실시예에 따른 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체는 원하는 형태로 소결될 수 있다.
- [0025] 상기 몰드는 카본 몰드를 포함할 수 있다.
- [0026] 상기와 같이 카본 몰드를 사용하여 몰드와 금속과의 반응을 최소화 할 수 있다.
- [0027] 상기 가압 과정은 5 내지 500 MPa 로 가압할 수 있고, 상기 가열 과정은 500 내지 1300 ℃로 가열할 수 있으며, 가압 및 가열되는 시간은 30분 내지 2시간일 수 있다.
- [0028] 상기와 같은 가압, 가열 공정을 통해 본 발명의 실시예에 따른 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체가 소결된다.
- [0029] 다른 측면에서 본 발명은, 상기 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법으로 제조된 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체를 제공한다.
- [0030] 상기 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체는 원판형 또는 원통 형상이고, 3 내지 50 mm의 지름 및 1 내지 30 mm의 두께를 가질 수 있다.
- [0031] 상기와 같은 형상을 가진 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체는 하기 서술될 박막형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법을 포함한 다양한 기술에 응용될 수 있다.
- [0032] 또 다른 측면에서 본 발명은, 상기 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법으로 제조된 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체를 타겟으로 준비하는 제1 단계; 및 상기 타겟을 증발시켜 기판에 증착하여 기판 상에 박막형 합금을 형성하는 제2 단계; 를 포함하는, 박막형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법을 제공한다.
- [0033] 상기와 같은 단계를 통해 본 발명의 실시예에 따른 박막형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법은 상기 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체가 가진 초전도특성을 가지고, 박막형으로 제조될 수 있다.
- [0034] 상기 타겟은 나이오븀(Nb), 탄탈럼(Ta), 타이타늄(Ti), 하프늄(Hf) 및 지르코늄(Zr)을 포함하고, 하기 화학식 III을 가질 수 있다.
- [0035] $(\text{Nb})_{z1}(\text{Ta})_{z2}(\text{Ti})_{z3}(\text{Hf})_{z4}(\text{Zr})_{z5} \text{ (III)}$
- [0036] 여기서, $z1$ 내지 $z5$ 는 1 이상의 정수으로써, $z1$ 내지 $z5$ 의 총합에 대하여 5 내지 35 %의 값을 가지는 정수이다.
- [0037] 상기 $z1$ 은 2일 수 있고, 상기 $z2$ 는 1일 수 있으며, 상기 $z3$ 은 1일 수 있고, 상기 $z4$ 는 1일 수 있으며, 상기 $z5$ 는 1일 수 있다.
- [0038] 상기와 같은 금속의 선택을 통해 본 발명의 실시예에 따른 박막형 고엔트로피 합금 초전도체는 우수한 초전도특성을 가질 수 있다.
- [0039] 상기 타겟은 레이저에 의해 증발될 수 있다.
- [0040] 상기 레이저는 엑시머 펄스레이저일 수 있다.
- [0041] 상기 엑시머 펄스레이저는 193 내지 532 nm의 파장의 레이저를 조사할 수 있다.
- [0042] 상기 타겟은 회전하는 상태에서 증발될 수 있다.
- [0043] 상기와 같은 방법을 통한 타겟 증발 방법은, 상기 레이저의 에너지 밀도 및 펄스파 횟수 등을 조절하여, 최종적으로 형성된 박막형 고엔트로피 합금 초전도체의 두께를 조절할 수 있다.
- [0044] 상기 기판은 사파이어(Al_2O_3) 단결정 혹은 하스텔로이(Hastelloy)를 포함할 수 있다.
- [0045] 상기와 같은 기판의 선택은 공정의 비용을 감소하고, 기존 공정에 사용되던 재료를 그대로 이용할 수 있다는 장점이 있다.
- [0046] 상기 기판은 270 내지 620 ℃로 가열될 수 있다.
- [0047] 상기와 같이 기판을 가열하는 과정을 통해 증착 과정에서 우수한 초전도특성을 유지할 수 있다.
- [0048] 상기 기판은 할로젠 램프로 가열될 수 있다.

- [0049] 상기와 같이 할로겐 램프를 사용하여 빠른 가열과 빠른 냉각이 가능하다.
- [0050] 상기 제2 단계는 10^{-7} 내지 10^{-5} Torr의 진공 상태에서 진행될 수 있다.
- [0051] 상기와 같은 진공 상태는 박막이 증착되는 동안 금속의 산화를 방지한다.
- [0052] 상기 박막형 합금의 두께가 100 내지 700 nm일 수 있다.

발명의 효과

- [0053] 이상에서 살펴본 바와 같이, 본 발명의 실시예에 따른 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법은 고엔트로피 합금 초전도체의 대량 생산 방법을 제공할 수 있다.
- [0054] 상기 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법에 의해 제조된 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체는 우수한 초전도특성을 가질 수 있다.
- [0055] 상기 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체를 사용하는 박막형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법은 상기 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체의 우수한 초전도특성을 유지한 채 박막형으로 가공할 수 있는 방법을 제공할 수 있다.

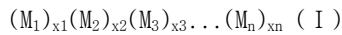
도면의 간단한 설명

- [0056] 도 1은 본 발명의 실시예에 따른 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법을 나타낸 흐름도이다.
- 도 2 내지 도 4는 본 발명의 실시예에 따른 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법을 구현하는 장치를 나타낸 도면이다.
- 도 5는 본 발명의 실시예에 따른 박막형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법을 나타낸 흐름도이다.
- 도 6은 본 발명의 실시예에 따른 박막형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법을 구현하는 장치를 나타낸 도면이다.
- 도 7 내지 도 16은 본 발명의 실시예에 따른 고엔트로피 합금 초전도체를 실험한 결과를 나타낸 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

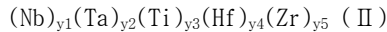
- [0057] 이하, 첨부한 도면을 참조하여 본 발명의 실시예에 대해 상세히 설명한다. 본 발명은 다양한 변경을 가할 수 있고 여러 가지 형태를 가질 수 있는 바, 특정 실시 예들을 도면에 예시하고 본문에 상세하게 설명하고자 한다. 그러나 이는 본 발명을 특정한 개시 형태에 대해 한정하려는 것이 아니며, 본 발명의 사상 및 기술 범위에 포함되는 모든 변경, 균등물 내지 대체물을 포함하는 것으로 이해되어야 한다. 각 도면을 설명하면서 유사한 참조부호를 유사한 구성요소에 대해 사용하였다. 첨부된 도면에 있어서, 구조물들의 치수는 본 발명의 명확성을 기하기 위하여 실제보다 확대하여 도시한 것이다.
- [0058] 본 출원에서 사용한 용어는 단지 특정한 실시 예를 설명하기 위해 사용된 것으로, 본 발명을 한정하려는 의도가 아니다. 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다. 본 출원에서, "포함하다" 또는 "가지다" 등의 용어는 명세서 상에 기재된 특징, 숫자, 단계, 동작, 구성요소 또는 이들을 조합한 것이 존재함을 지정하려는 것이지, 하나 또는 그 이상의 다른 특징들이나 숫자, 단계, 동작, 구성요소 또는 이들을 조합한 것들의 존재 또는 부가 가능성을 미리 배제하지 않는 것으로 이해되어야 한다.
- [0059] 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.
- [0060] 도 1은 본 발명의 실시예에 따른 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법을 나타낸 흐름도이다.
- [0061] 도 1을 참조하면, 본 발명의 실시예에 따른 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법은 나이오븀(Nb), 탄탈럼(Ta), 타이타늄(Ti), 하프늄(Hf), 지르코늄(Zr), 텅스텐(W), 몰리브데넘(Mo), 크로뮴(Cr), 바나듐(V) 및 레늄(Re)을 포함하는 군에서 선택된 4 내지 10 종의 금속을 혼합한 후 밀링(milling)하여 혼합 금속 분말을 제조하

는 제1 단계(S110); 및 상기 제1 단계(S110)에서 제조된 혼합 금속 분말을 소결하여 하기 화학식 I에 따른 합금을 제조하는 제2 단계(S120);를 포함한다.



n은 4 내지 10의 정수이고, M_1 내지 M_n 은 각각 나이오븀(Nb), 탄탈럼(Ta), 타이타늄(Ti), 하프늄(Hf), 지르코늄(Zr), 텅스텐(W), 몰리브데넘(Mo), 크로뮴(Cr), 바나듐(V) 및 레늄(Re)을 포함하는 군에서 선택된 4 내지 10 종의 금속을 의미하며, x_1 내지 x_n 은 1 이상의 정수로서, x_1 내지 x_n 의 총합에 대하여 5 내지 35 %의 값을 가지는 정수이다.

일 실시예에 있어서, 상기 제1 단계(S110)의 금속은 나이오븀(Nb), 탄탈럼(Ta), 타이타늄(Ti), 하프늄(Hf) 및 지르코늄(Zr)을 포함하고, 상기 제2 단계(S120)에서 제조된 합금은 하기 화학식 II을 가질 수 있다.



여기서, y_1 내지 y_5 는 1 이상의 정수로서, y_1 내지 y_5 의 총합에 대하여 5 내지 35 %의 값을 가지는 정수이다.

일 실시예에 있어서, 상기 Nb:Ta:Ti:Hf:Zr의 몰비율은 2:1:1:1:1일 수 있다. 예를 들어, 상기 y_1 은 2이고, 상기 y_2 는 1이며, 상기 y_3 은 1이고, 상기 y_4 는 1이며, 상기 y_5 는 1일 수 있다.

상기 제1 단계(S110)은 금속을 밀링 및 혼합하는 단계이다. 제1 단계(S110)를 통해 상기 금속은 합금으로 소결 전 혼합되어 높은 엔트로피를 달성하게 된다.

본 명세서의 문맥에서, 밀링은 금속을 포함한 물질의 입자를 더 작은 크기의 입자로 가공하는 모든 공정을 포함하는 의미이며, 비제한적인 예시는 볼 밀링(ball milling)을 포함한다. 일 실시예에 있어서, 상기 제1 단계(S110)의 밀링은 볼 밀링으로 진행될 수 있다.

도 2 및 도 3은 상기 제1 단계(S110)가 볼 밀링으로 진행되는 일 실시예에 있어서, 상기 볼 밀링을 구현할 수 있는 장치의 비제한적인 예시를 나타낸 도면이다.

도 2는 전체 볼 밀링 장치를 나타낸 도면이다. 도 2를 참조하면, 상기 볼 밀링 공정은 밀링 용기(10) 내에서 진행될 수 있으며, 상기 밀링 용기(10)는 회전판(20) 상에 배치되어 회전할 수 있다.

도 3은 상기 밀링 용기(10)를 나타낸 도면이다. 도 3을 참조하면, 상기 밀링 용기(10) 내에는 금속 볼(11)이 배치되고, 상기 금속 분말(5)이 위치할 수 있다. 상기 회전판(20)에 의해 가해지는 회전력에 의해 상기 금속 볼(11) 및 상기 금속 분말(5)은 상기 밀링 용기(10) 내에서 마찰력에 의해 밀링 공정을 진행된다.

일 실시예에 있어서, 상기 볼 밀링은 200 내지 600 RPM에서 9 내지 15 시간 동안 수행될 수 있다. 예를 들어, 상기 볼 밀링은 400 RPM에서 12시간 수행될 수 있다.

상기 볼 밀링이 진행되는 동안 금속 분말의 산화를 방지하기 위해 반응성이 낮은 기체 분위기 하에서 진행될 수 있다. 일 실시예에 있어서, 상기 볼 밀링은 아르곤 가스 분위기 하에서 진행될 수 있다.

상기 제2 단계(S120)는 밀링 및 혼합된 금속 분말을 소결하는 단계이다. 제2 단계(S120)를 통해 상기 금속 분말은 합금으로 소결된다.

도 4는 상기 제2 단계(S120)의 소결 공정을 구현할 수 있는 장치의 비제한적인 예시를 나타낸 도면이다.

도 4를 참조하면, 상기 제2 단계(S120)의 소결은 상기 혼합 금속 분말(5')을 몰드(mold; 30) 내에 배치한 후, 가압 및 가열하는 과정을 포함할 수 있다. 상기 가압 공정은 상기 몰드(30)의 상부 편치(31) 및 하부 편치(32)에 의해 진행될 수 있다. 상기 가열 공정은 몰드 히터(35)를 통해서 진행될 수 있다.

상기 몰드(30)는 상기 소결 과정에서 상기 혼합 금속 분말(5')과의 반응을 최소화하기 위하여 반응성이 적은 재료를 포함할 수 있다. 일 실시예에 있어서, 상기 몰드(30)는 카본 몰드를 포함할 수 있다.

일 실시예에 있어서, 상기 가압 과정은 5 내지 500 MPa로 가압하고, 상기 가열 과정은 500 내지 1300 °C로 가열하며, 가압 및 가열되는 시간은 30분 내지 2시간 진행될 수 있다. 예를 들어, 상기 가압 과정은 50 MPa로 가압하고, 상기 가열 과정은 900 °C로 가열하며, 가압 및 가열되는 시간은 1시간 진행될 수 있다.

본 발명의 또 다른 측면의 실시예는 상기 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법에 의해 제조된 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체를 제공한다.

- [0081] 전술한 바와 같이, 본 발명의 실시예에 따른 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법은 상기 몰드를 이용하여 소결하는 과정에서 형태를 결정할 수 있다. 따라서 상기 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체의 형태는 특별히 제한되지 않는다. 일 실시예에 있어서, 상기 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체는 원판형 또는 원통 형상을 가질 수 있다. 예를 들면, 상기 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체는 원판형 또는 원통 형상을 가지고, 3 내지 50 mm의 지름 및 1 내지 30 mm의 두께를 가질 수 있다.
- [0082] 도 5는 본 발명의 실시예에 따른 박막형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법을 나타낸 흐름도이다.
- [0083] 도 6은 본 발명의 실시예에 따른 박막형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법을 구현할 수 있는 장치의 비제한적인 예시를 나타낸 도면이다.
- [0084] 도 5를 참조하면, 본 발명의 실시예에 따른 박막형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법은 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체를 타겟으로 준비하는 제1 단계(S210); 및 상기 타겟을 증발시켜 기판에 증착하여 기판 상에 박막형 합금을 형성하는 제2 단계(S220); 를 포함할 수 있다. 일 실시예에 있어서, 상기 타겟은 본 발명의 실시예에 따른 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체 제조 방법으로 제조된 것일 수 있다.
- [0085] 본 명세서의 문맥에서, 타겟은 증발 및 증착의 대상이 되는 물질을 의미한다. 일 실시예에 있어서, 상기 타겟은 나이오븀(Nb), 탄탈럼(Ta), 타이타늄(Ti), 하프늄(Hf) 및 지르코늄(Zr)을 포함할 수 있다. 일 예로, 상기 타겟은 하기 화학식 III을 가질 수 있다.
- [0086] $(\text{Nb})_{z1}(\text{Ta})_{z2}(\text{Ti})_{z3}(\text{Hf})_{z4}(\text{Zr})_{z5} \text{ (III)}$
- [0087] 여기서, $z1$ 내지 $z5$ 는 1 이상의 정수으로써, $z1$ 내지 $z5$ 의 총합에 대하여 5 내지 35 %의 값을 가지는 정수이다. 일 실시예에 있어서, 상기 Nb:Ta:Ti:Hf:Zr의 몰비율은 2:1:1:1:1일 수 있다. 예를 들어, 상기 $z1$ 은 2일 수 있고, 상기 $z2$ 는 1일 수 있으며, 상기 $z3$ 는 1일 수 있고, 상기 $z4$ 는 1일 수 있으며, 상기 $z5$ 는 1일 수 있다.
- [0088] 도 6을 참조하면, 타겟(40)은 증발(42)될 수 있다. 일 실시예에 있어서, 상기 타겟(40)은 타겟 고정판(41)에 고정될 수 있다.
- [0089] 도 6을 참조하면, 타겟(40)은 증발되어 기판(50)에 증착된다. 상기 타겟(40)이 증발되는 방법은 특별히 제한되지 않으며, 비제한적인 예시로 레이저를 사용할 수 있다.
- [0090] 도 6을 참조하면, 일 실시예에 있어서, 상기 타겟(40)은 레이저에 의해 증발될 수 있다. 레이저의 종류는 특별히 제한되지 않으나, 상기 레이저의 비제한적인 예시는 펄스 레이저를 포함한다. 일 실시예에 있어서, 상기 펄스 레이저는 엑시머 펄스레이저(60)일 수 있다. 일 실시예에 있어서, 상기 엑시머 펄스레이저(60)는 렌즈(61)를 투과하여 조사될 수 있다. 일 실시예에 있어서, 상기 엑시머 펄스레이저(60)는 투과창(62)을 투과하여 조사될 수 있다. 상기 엑시머 펄스레이저가 조사하는 파장은 특별히 제한되지 않으나, 일 실시예에 있어서, 상기 엑시머 펄스레이저는 193 내지 532 nm의 파장의 레이저를 조사할 수 있다. 일 실시예에 있어서, 상기 엑시머 펄스레이저(60)에 파장, 에너지 밀도 및 펄스와 횟수를 조절하여, 최종적으로 형성된 박막형 고엔트로피 합금 초전도체의 두께를 조절할 수 있다.
- [0091] 일 실시예에 있어서, 상기 타겟(40)은 회전하는 상태에서 증발될 수 있다. 도 6을 참조하면, 상기 타겟(40)은 타겟 고정판(41)에 고정되고, 상기 타겟 고정판(41)은 회전 장치(45)에 체결되어 회전될 수 있다.
- [0092] 본 명세서의 문맥에서, 기판은 상기 타겟(40) 물질이 증착되는 기재를 의미한다. 도 6을 참조하면, 상기 기판(50)은 기판 고정판(51)에 체결된 채, 상기 타겟(40)의 전방에 배치되어 증발되는 타겟 물질(42)이 상기 기판(50) 상에 증착될 수 있다. 상기 기판(50)의 종류는 특별히 제한되지 않으나, 일 실시예에 있어서, 상기 기판은 사파이어(Al_2O_3) 단결정 혹은 하스텔로이(Hastelloy)를 포함할 수 있다. 사파이어 단결정 또는 하스텔로이 기판은 공정의 비용을 감소하고, 기존 공정에 사용되던 재료를 그대로 이용할 수 있다는 장점이 있다.
- [0093] 일 실시예에 있어서, 상기 기판(50)은 270 내지 620 °C로 가열될 수 있다. 가열되는 방법은 특별히 제한되지 않으나, 비제한적인 예시는 할로겐 램프를 이용한 가열 방법을 포함한다. 할로겐 램프를 이용하여 빠른 가열과 빠른 냉각이 가능하다. 도 6을 참조하면, 일 실시예에 있어서, 상기 기판(50)은 할로겐 램프(55)로 가열될 수 있다. 일 실시예에 있어서, 상기 기판(50)의 가열 상태를 관측, 제어하기 위하여 열전계(59)를 더 포함할 수 있다. 상기와 같은 가열 공정을 통해, 최종적으로 제조된 박막형 고엔트로피 합금 초전도체는 증착 과정에서 우수한 초전도특성을 유지할 수 있다.
- [0094] 도 6을 계속해서 참조하면, 상기 타겟(40) 및 상기 기판(50)의 거리는 조절될 수도 있으며, 조절하는 방법은 특

별히 제한되지 않는다. 일 실시예에 있어서, 상기 타겟(40)과 상기 기관(50) 사이의 간격을 조절하는 거리 조절 장치(52)를 더 포함할 수 있다. 일 실시예에 있어서, 상기 거리 조절 장치(52)는 스크류 타입일 수 있다.

- [0095] 도 5를 참조하면, 일 실시예에 있어서, 상기 제2 단계(S220)는 10^{-7} 내지 10^{-5} Torr의 진공 상태에서 진행될 수 있다. 도 6을 함께 참조하면, 일 실시예에 있어서, 상기 제2 단계(S220)는 고진공 박막 성장실(70)에서 진행될 수 있다. 상기와 같은 진공 상태를 유지함으로써, 박막이 증착되는 동안 금속의 산화를 방지할 수 있다.
- [0096] 상기와 같은 방법 및 장치의 제어를 통해, 본 발명의 실시예에 따른 박막형 고엔트로피 합금 초전도체는 그 두께가 조절될 수 있다. 일 실시예에 있어서, 상기 박막형 합금의 두께가 100 내지 700 nm일 수 있다.
- [0097] 이하 본 발명의 실시예에 대해 상술한다. 다만, 하기에 기재된 실시예는 본 발명의 일부 실시 형태에 불과한 것으로서, 본 발명의 범위가 하기 실시예에 한정되는 것은 아니다.
- [0098] [실시예 1-1] 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체의 제조
- [0099] Nb, Ta, Ti, Hf 및 Zr 금속을 2:1:1:1:1의 몰비로 혼합하였다. 행성 볼밀(planetary ball mill)을 사용하여 상온에서 400 RPM으로 12 시간 동안 상기 혼합된 금속을 밀링하였다. 금속의 산화를 방지하기 위하여 상기 볼 밀링 공정은 아르곤 가스 분위기 하에서 진행되었다. 이로써 혼합 금속 분말이 제조되었다.
- [0100] 상기 혼합 금속 분말을 원형 카본 몰드에 넣고, 50 MPa의 압력, 700 °C의 온도에서 1 시간 동안 소결하였다. 이로써 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체가 제조되었다.
- [0101] [실시예 1-2] 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체의 제조
- [0102] 실시예 1-1과 동일한 방법으로 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체를 제조하되, 상기 소결 공정의 온도를 800 °C로 유지하였다.
- [0103] [실시예 1-3] 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체의 제조
- [0104] 실시예 1-1과 동일한 방법으로 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체를 제조하되, 상기 소결 공정의 온도를 900 °C로 유지하였다.
- [0105] [실시예 1-4] 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체의 제조
- [0106] 실시예 1-1과 동일한 방법으로 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체를 제조하되, 상기 소결 공정의 온도를 1000 °C로 유지하였다.
- [0107] [실시예 1-5] 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체의 제조
- [0108] 실시예 1-1과 동일한 방법으로 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체를 제조하되, 상기 소결 공정의 온도를 1100 °C로 유지하였다.
- [0109] [실시예 2-1] 박막형 고엔트로피 합금 초전도체의 제조
- [0110] 실시예 1-4에 따른 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체를 타겟으로 준비한 후, 고진공 박막 성장실의 타겟 고정판에 부착하였다. 사파이어 단결정 기관을 준비한 후, 고진공 박막 성장실의 기관 고정판에 부착하였다.
- [0111] 할로겐 램프를 사용하여 기관은 270 °C로 가열하였다. 타겟은 회전 모터를 이용하여 회전되며, 엑시머 펄스레이저를 조사하여 타겟을 증발하였다. 타겟의 증발 및 기관에의 증착을 진행하는 동안 상기 고진공 박막 성장실은 10^{-6} Torr의 진공 상태로 준비되었다. 이로써 박막형 고엔트로피 합금 초전도체가 제조되었다.
- [0112] [실시예 2-2] 박막형 고엔트로피 합금 초전도체의 제조
- [0113] 실시예 2-1과 동일한 방법으로 박막형 고엔트로피 합금 초전도체를 제조하되, 상기 기관의 온도를 370 °C로 설정하였다.
- [0114] [실시예 2-3] 박막형 고엔트로피 합금 초전도체의 제조
- [0115] 실시예 2-1과 동일한 방법으로 박막형 고엔트로피 합금 초전도체를 제조하되, 상기 기관의 온도를 470 °C로 설정하였다.
- [0116] [실시예 2-4] 박막형 고엔트로피 합금 초전도체의 제조

- [0117] 실시예 2-1과 동일한 방법으로 박막형 고엔트로피 합금 초전도체를 제조하되, 상기 기관의 온도를 520 °C로 설정하였다.
- [0118] [실시예 2-5] 박막형 고엔트로피 합금 초전도체의 제조
- [0119] 실시예 2-1과 동일한 방법으로 박막형 고엔트로피 합금 초전도체를 제조하되, 상기 기관의 온도를 570 °C로 설정하였다.
- [0120] [실시예 2-6] 박막형 고엔트로피 합금 초전도체의 제조
- [0121] 실시예 2-1과 동일한 방법으로 박막형 고엔트로피 합금 초전도체를 제조하되, 상기 기관의 온도를 620 °C로 설정하였다.
- [0122] [실시예 3] 박막형 고엔트로피 합금 초전도체의 제조
- [0123] 실시예 2-4와 동일한 방법으로 박막형 고엔트로피 합금 초전도체를 제조하되, 사파이어 단결정 기관 대신 하스텔로이 기관을 사용하였다.
- [0124] [실험예 1]
- [0125] 실시예 1-4에 따라 제조된 금속 분말, 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체 및 실시예 2-4에 따라 제조된 박막형 고엔트로피 합금 초전도체의 X-선 회절 스펙트럼을 관찰하였다. 도 7은 그 결과를 나타낸 도면이다. 도 7을 참조하면, 실시예 1-4에 따라 제조된 금속 분말, 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체 및 실시예 2-4에 따라 제조된 박막형 고엔트로피 합금 초전도체 모두가 체심 입방 구조(body centered cubic structure)를 가지고 있는 것을 확인할 수 있다. 특히, 실시예 2-4에 따라 제조된 박막형 고엔트로피 합금 초전도체의 경우 (110) 방향으로 주 성장한 것을 확인할 수 있다.
- [0126] [실험예 2]
- [0127] 실시예 1-1 내지 1-5에 따라 제조된 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체의 완전 반자성(perfect diamagnetism)을 보여주는 온도에 대한 자화(magnetization)를 측정하였다. 도 8은 그 결과를 나타낸 도면이다. 도 8의 제로 필드 쿨링(Zero field cooling; ZFC) 결과를 참조하면, 본 발명의 실시예에 따른 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체는 소결 온도에 무관하게 비슷한 초전도 임계온도를 가지며 우수한 반자성 특성을 가지는 것을 확인할 수 있다. 또한, 임계온도 근방에서 초전도 상전이가 급격하게 나타나는 것을 확인할 수 있는데, 이는 시료의 균질성이 우수하다는 것을 나타낸다. 비교를 위하여 자화 값은 각 시료의 ZFC에서의 1.8 K에 해당하는 절대값을 이용하여 규격화 하였다.
- [0128] [실험예 3]
- [0129] 실시예 2-1 내지 2-6에 따라 제조된 박막형 고엔트로피 합금 초전도체 및 실시예 1-4에 따라 제조된 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체의 완전 전도성(perfect conductivity)을 보여주는 온도에 따른 고유 저항(resistivity)를 측정하였다. 도 9는 그 결과를 나타낸 도면이다. 도 9를 참조하면, 초전도 임계온도는 박막 제작시 사용한 기관의 온도에 영향을 받지, 모든 박막에서 급격한 초전도 전이가 있음을 확인할 수 있다. 비교를 위하여 비저항 값은 각 시료에서 초전도 상전이가 시작되는 지점의 저항값(ρ_n)을 이용하여 규격화 하였다.
- [0130] [실험예 4]
- [0131] 실시예 1-4에 따라 제조된 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체 및 실시예 2-1 내지 2-6에 따라 제조된 박막형 고엔트로피 합금 초전도체의 완전 반자성을 보여주는 온도에 대한 자화를 측정하였다. 도 10은 그 결과를 나타낸 도면이다. 도 10의 ZFC 결과를 참조하면, 초전도에 대한 자화 특성은 박막 제작시 사용한 기관의 온도에 영향을 받지, 모든 박막에서 우수한 반자성 특성을 가짐을 확인할 수 있다. 비교를 위하여 자화 값은 각 시료의 ZFC에서의 1.8 K에 해당하는 절대값을 이용하여 규격화 하였다.
- [0132] [실험예 5]
- [0133] 실시예 1-4에 따라 제조된 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체 및 실시예 2-3 내지 2-6에 따라 제조된 박막형 고엔트로피 합금 초전도체의 온도 2 K 및 4.2 K에서의 임계전류밀도(critical current density: J_c) 값의 자기장(magnetic field) 의존성을 측정하였다. 도 11은 온도 2 K에 대한 결과이며, 도 12는 온도 4.2 K에 대한 결과이다. 도 13은 G. Kim et al. Acta Materialia **186**, 250256 (2020)에서 보고된 Nb-Ta-Ti-Hf-Zr 기반 고엔트로피

합금 초전도체의 임계전류밀도를 측정한 결과이고, 도 14는 Y. Mizuguchi et al. arXiv:2009.07548에서 보고된 Co-Ni-Cu-Rh-Ir-Zr 기반 고엔트로피 합금 초전도체의 임계전류밀도 값이 자기장 의존성을 측정한 결과이다.

[0134] 도 14를 참조하면, Co-Ni-Cu-Rh-Ir-Zr 기반 고엔트로피 합금 초전도체의 경우 초전도임계온도(superconducting transition temperature: T_c)가 7.8 K로, 본 발명의 실시예에 따른 고엔트로피 합금 초전도체의 임계온도와 비슷함에도 불구하고, 0 T의 자기장에서 10 A/cm^2 정도의 매우 작은 임계전류밀도 값을 보임을 확인할 수 있다.

[0135] 도 11 내지 14를 참조하면, 본 발명의 실시예에 따른 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체의 경우 0 T를 기준으로 기존에 아크 용해법으로 제작되어, 기존에 보고된 Nb-Ta-Ti-Hf-Zr 기반 고엔트로피 합금 초전도체의 임계전류밀도 값에 비해 10배정도 높음을 확인할 수 있다. 또한, 임계전류밀도의 자기장 의존성이 월등히 향상되었음을 확인할 수 있다.

[0136] 도 11 및 13을 참조하면, 본 발명의 실시예 2-4에 따른 박막형 고엔트로피 합금 초전도체는 실시예 1-4에 따른 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체에 비해 10배 이상 높은 임계전류밀도 값을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 또한 도 13에 제시된 임계전류밀도 값에 비해 100 배 이상 높은 임계전류밀도 값을 보임을 확인할 수 있다. 임계전류밀도의 자기장 의존성 또한 월등히 좋은 특성을 보임을 확인할 수 있다.

[0137] [실험예 6]

[0138] 실시예 3에 따른 박막형 고엔트로피 합금 초전도체의 완전 반자성을 보여주는 온도에 따른 자화를 측정하였다. 도 15는 그 결과를 나타낸 도면이다. 도 15의 ZFC 결과를 참조하면, 하스텔로이 기판 위에 제작된 박막형 고엔트로피 합금 초전도체가 우수한 반자성 특성을 가짐을 확인할 수 있다.

[0139] [실험예 7]

[0140] 실시예 1-4에 따른 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체 및 실시예 3에 따른 박막형 고엔트로피 합금 초전도체의 온도 2 K에서의 임계전류밀도 값의 자기장 의존성을 측정하였다. 도 16은 그 결과를 나타낸 도면이다. 도 16을 참조하면, 실시예 3에 따른 박막형 고엔트로피 합금 초전도체는 실시예 1-4에 따른 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체에 비해 임계전류밀도의 자기장 의존성은 뛰어나지 않으나, 0 T 및 2 T보다 낮은 자기장에서는 벌크형 고엔트로피 합금 초전도체보다 우수한 임계전류밀도 특성을 가짐을 확인할 수 있다.

[0141] 상기에서는 본 발명의 바람직한 실시예를 참조하여 설명하였지만, 해당 기술 분야의 숙련된 당업자는 하기의 특허 청구 범위에 기재된 본 발명의 사상 및 영역으로부터 벗어나지 않는 범위 내에서 본 발명을 다양하게 수정 및 변경시킬 수 있음을 이해할 수 있을 것이다.

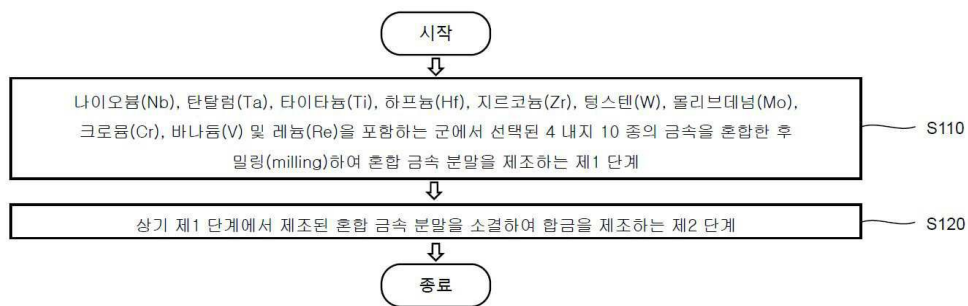
부호의 설명

- [0142] 5: 금속 분말
5': 혼합 금속 분말
10: 밀링 용기
11: 금속 볼
30: 몰드
31: 상부 펀치
32: 하부 펀치
35: 몰드 히터
40: 타겟
41: 타겟 고정판
42: 증발되는 타겟 물질
45: 회전 장치
50: 기판

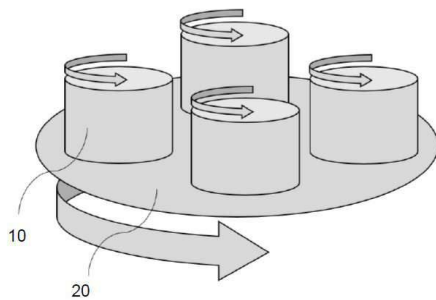
- 51: 기관 고정판
- 52: 거리 조절 장치
- 55: 할로겐 램프
- 59: 열전계
- 60: 엑시머 펄스레이저
- 61: 렌즈
- 62: 투과창
- 70: 고진공 박막 성장실

도면

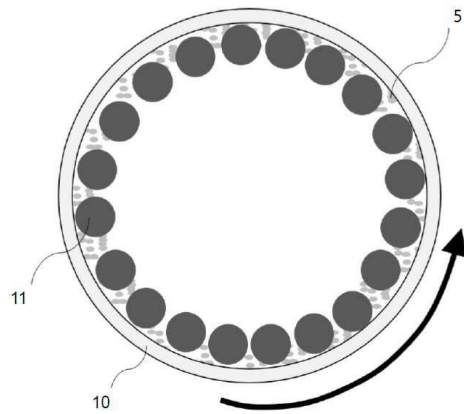
도면1



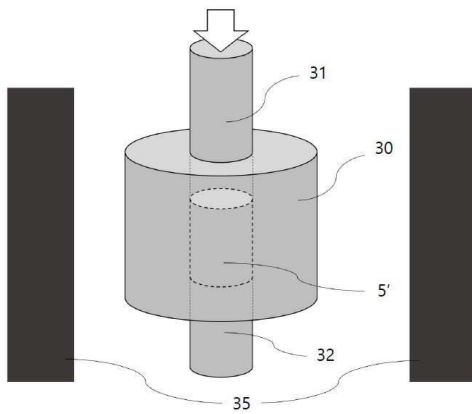
도면2



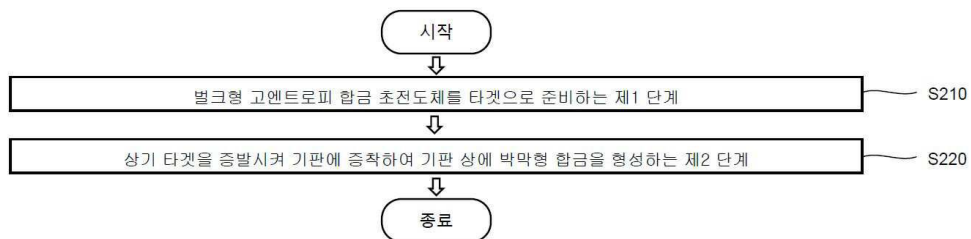
도면3



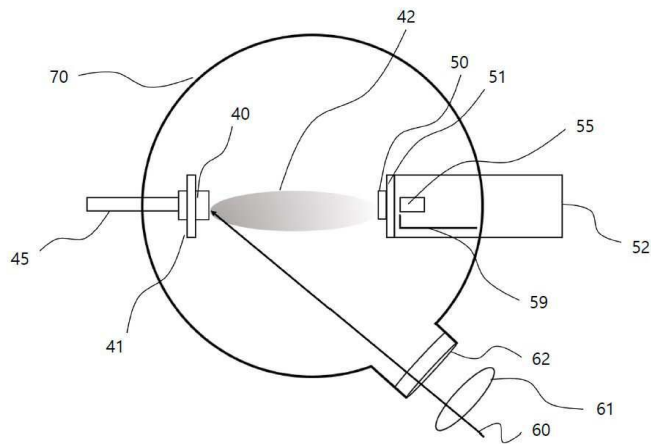
도면4



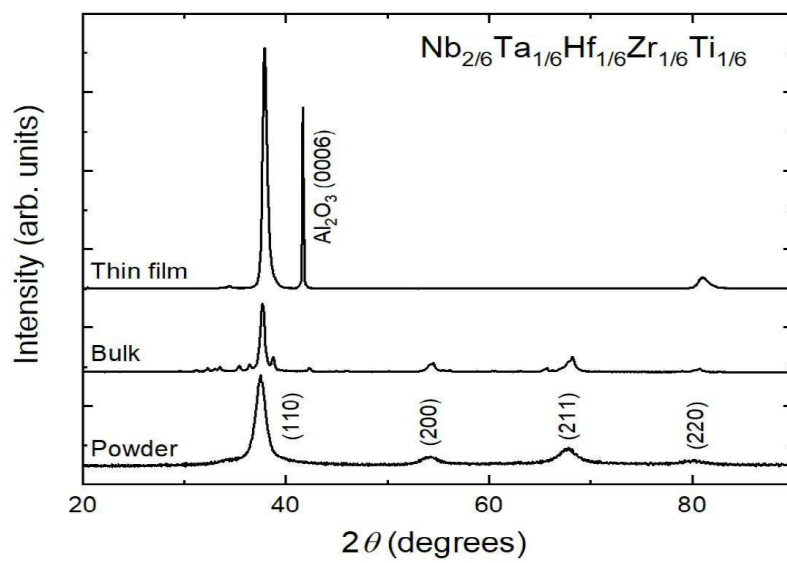
도면5



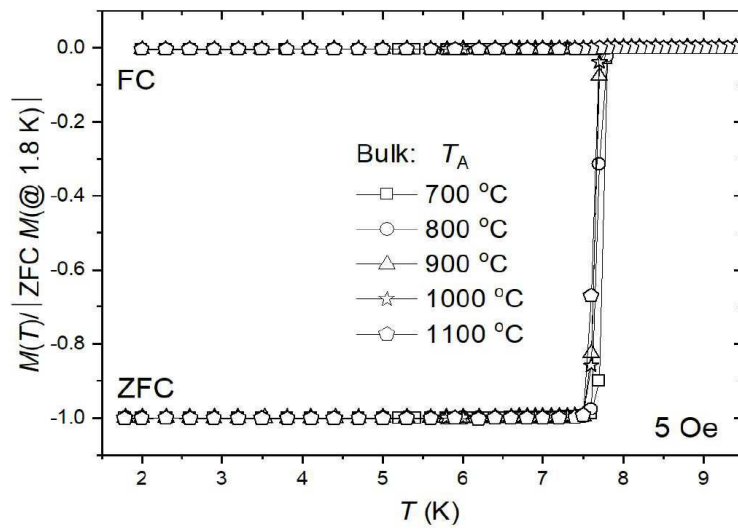
도면6



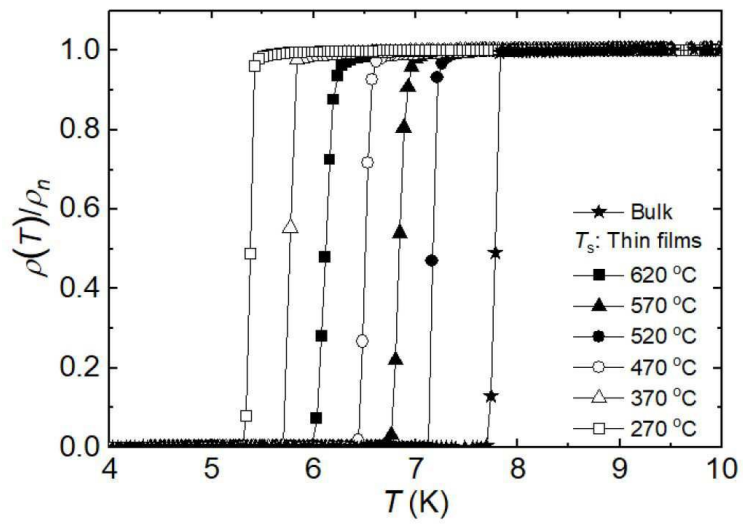
도면7



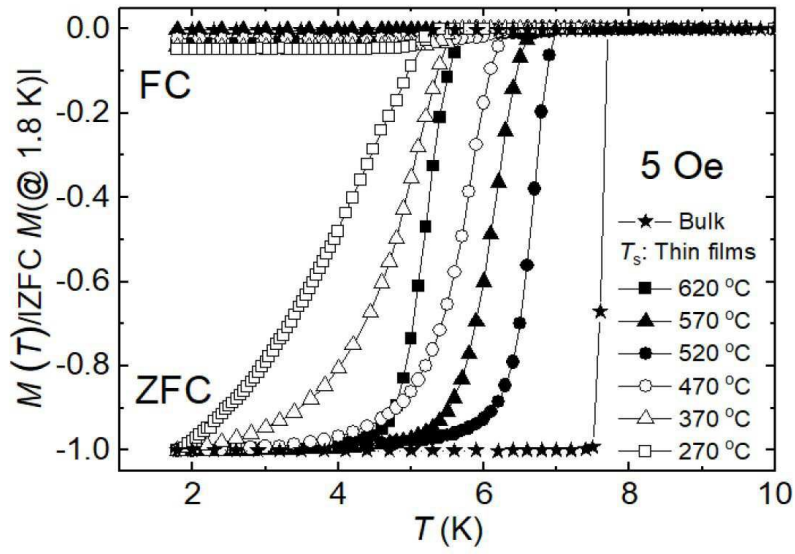
도면8



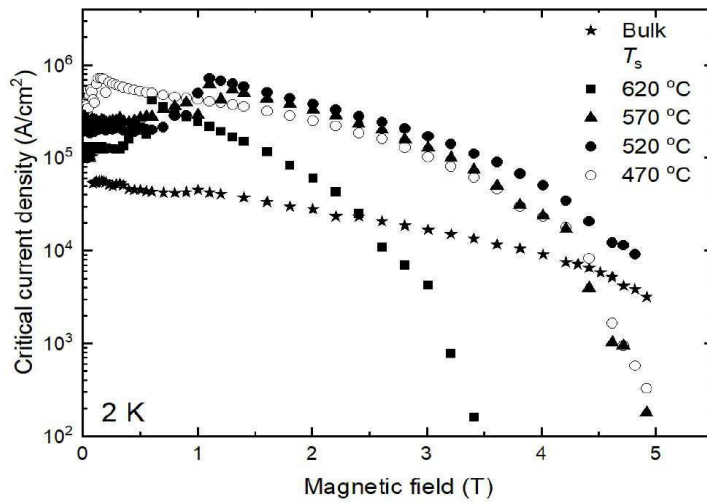
도면9



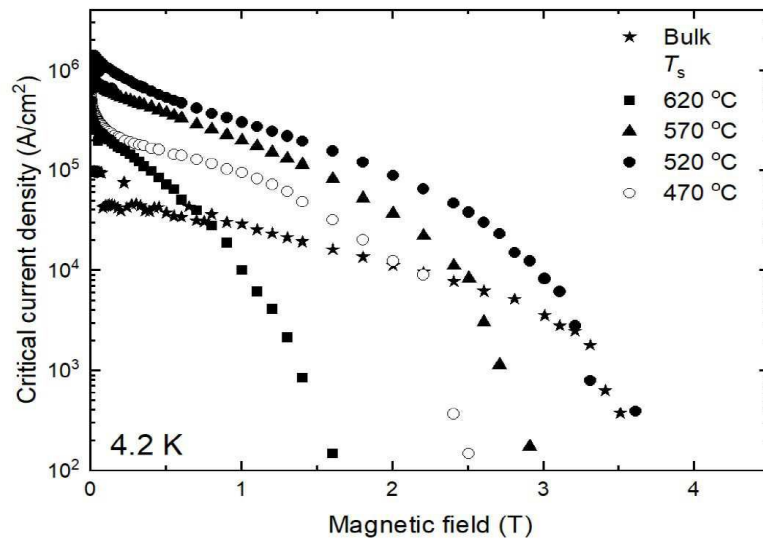
도면10



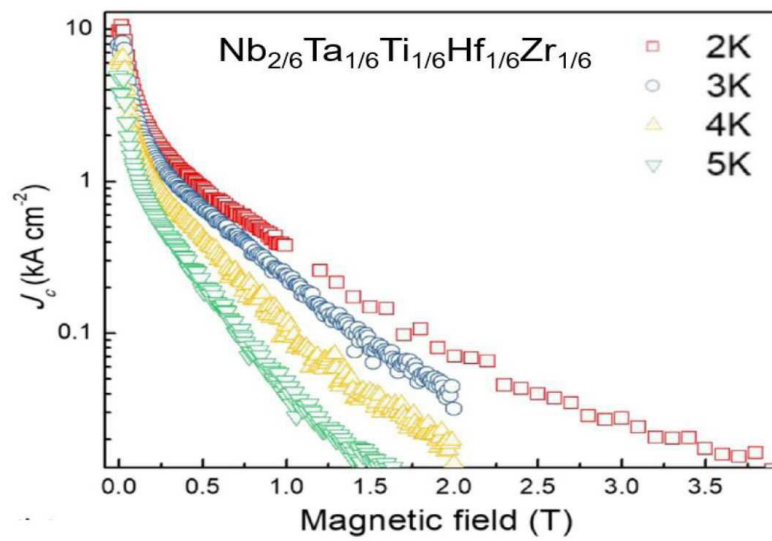
도면11



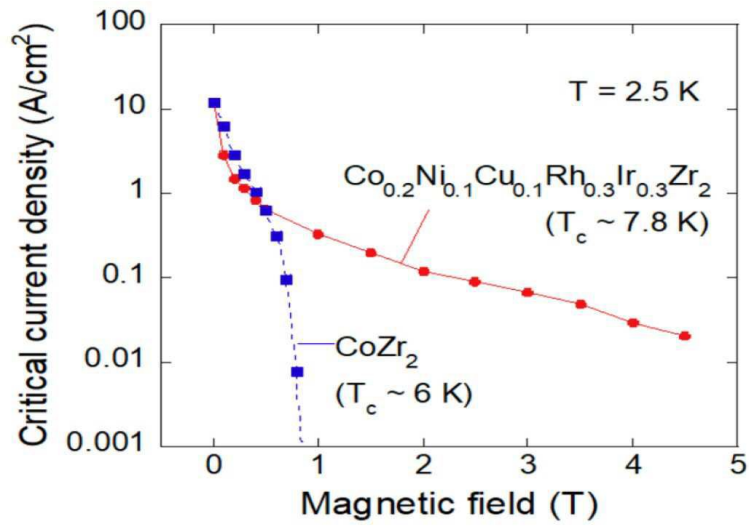
도면12



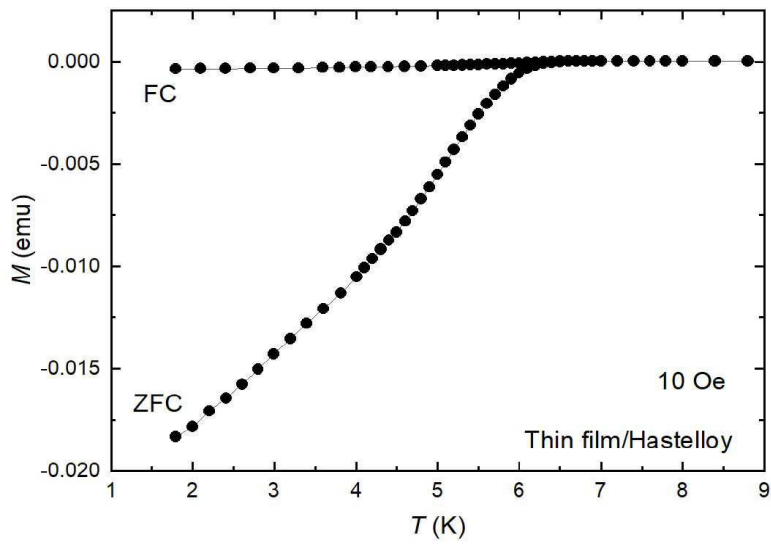
도면13



도면14



도면15



도면16

