(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2019년09월06일
(11) 등록번호 10-2019615
(24) 등록일자 2019년09월02일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H01B 12/04 (2006.01) *H01B 13/00* (2006.01)
(52) CPC특허분류
H01B 12/04 (2013.01)
H01B 13/0016 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2018-7008547
(22) 출원일자(국제) 2016년08월25일
심사청구일자 2018년03월26일
(85) 번역문제출일자 2018년03월26일
(65) 공개번호 10-2018-0048802
(43) 공개일자 2018년05월10일
(86) 국제출원번호 PCT/US2016/048520
(87) 국제공개번호 WO 2017/035290
국제공개일자 2017년03월02일
(30) 우선권주장
62/209,988 2015년08월26일 미국(US)
(56) 선행기술조사문헌
JP2008264886 A*
(뒷면에 계속)
전체 청구항 수 : 총 31 항

(73) 특허권자
아메리칸 수퍼컨덕터 코포레이션
미국 메사추세츠주 01434 디벤스 젝슨 로드 64
브룩하벤 싸이언스 어쏘씨에이츠 엘엘씨
미국 뉴욕 11973 업톤 빌딩 460 브룩하벤 애브뉴 40
(72) 발명자
마틴 루피치 더블유.
미국 메사추세츠주 01701 프레이밍햄 33 파멘터 로드
스리바스탄 세티암어티
미국 메사추세츠주 01886 웨스트포드 5 페럼 서클
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
특허법인아주김장리

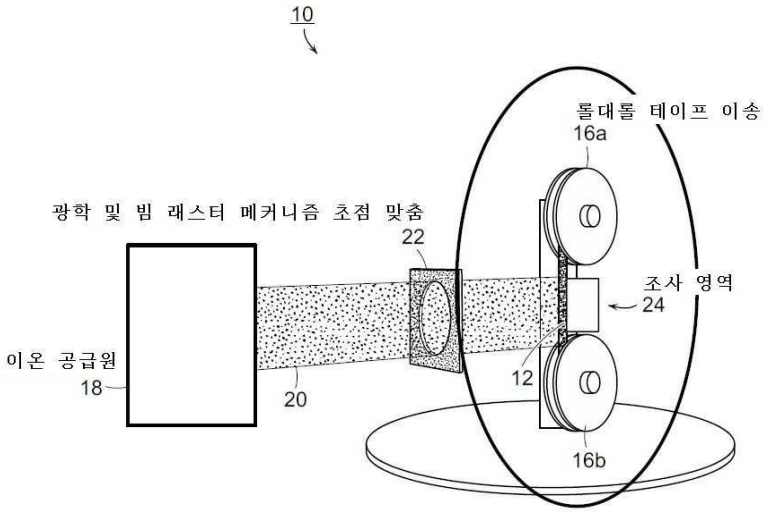
심사관 : 오지영

(54) 발명의 명칭 **균일한 이온 주입식 피닝 마이크로구조를 갖는 긴 길이의 고온 초전도 와이어**

(57) 요 약

내부에 피닝 마이크로구조의 균일한 분포를 만들도록, 적어도 50미터의 길이를 가지는 기재 상에 형성된 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층을 초전도체층의 길이를 따르고 폭을 가로질러 균일하게 충돌하는 이온 빔으로 조사하는 단계를 포함하는, 긴 길이의 고온 초전도 와이어를 제조하기 위한 방법이 제안된다. 바람직하게는, REBCO 코팅된 전도체 테이프는 릴대릴 장치에서 Au 이온이 조사된다.

대 표 도 - 도1a



(52) CPC특허분류
H01B 13/003 (2013.01)
(72) 발명자
치앙 리
미국 뉴욕주 11733 세타우켓 10 헤레브 코트
바체슬라프 솔로비요프 에프.
미국 뉴욕주 11778 로키 포인트 48 노스 서퍽 드라이브

(56) 선행기술조사문헌
JP2008514545 A*
JP5055011 B2*
JP5252792 B2*
KR1020040012575 A*
KR1020100110315 A*
KR1020130112723 A*
US20030207043 A1*
US20140249034 A1*
*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

명 세 서

청구범위

청구항 1

고온 초전도체 와이어를 제조하는 방법으로서,

적어도 50 미터의 길이, 및 폭을 지니는 표면을 갖는 기재를 제공하는 단계로서, 상기 표면이 2축으로 텍스처링된 고온 초전도층을 지지하고, 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도층이 상기 기재의 표면의 길이 및 폭에 대응하는 길이 및 폭을 가지는, 상기 기재를 제공하는 단계; 및

상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층에서 피닝 마이크로구조의 분포가 균일하게 되도록 하기 위하여 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층의 상기 길이를 따르고 상기 폭을 가로질러 충돌하는 이온 빔으로 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층을 조사(irradiating)하는 단계를 포함하되,

상기 조사하는 단계는 상기 이온 빔 하에서 연속 방식으로 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층을 이동시키는 단계를 포함하고,

상기 이온 빔은 직사각형 패턴으로 형상화되는, 고온 초전도체 와이어를 제조하는 방법.

청구항 2

제1항에 있어서, 상기 제공하는 단계는,

상기 기재 상에 적어도 하나의 완충층을 배치하는 단계;

상기 적어도 하나의 완충층 상에 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층을 형성하는 단계;

상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층 상에 금속 보호 코팅을 침착하는 단계; 및

상기 금속 보호 코팅을 어닐링시키도록 산소화 열처리를 수행하여 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층을 산소화시키는 단계를 또한 포함하되;

상기 조사하는 단계는 상기 금속 보호 코팅의 표면 상에 이온 빔을 충돌시키는 단계를 포함하는, 고온 초전도체 와이어를 제조하는 방법.

청구항 3

삭제

청구항 4

삭제

청구항 5

제1항에 있어서, 상기 이온 빔의 직사각형 패턴은 1.1:1 내지 20:1의 종횡비를 가지는, 고온 초전도체 와이어를 제조하는 방법.

청구항 6

제1항에 있어서, 상기 이온 빔의 직사각형 패턴은 2:1 내지 10:1 사이의 종횡비를 가지는, 고온 초전도체 와이어를 제조하는 방법.

청구항 7

제1항에 있어서, 상기 이온 빔은 직사각형 패턴으로 형상화되며, 상기 직사각형 패턴의 긴 가장자리는 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층의 길이에 직각으로 배향되며, 상기 빔은 이동하는 테이프보다 적어도 2배만큼 넓은, 고온 초전도체 와이어를 제조하는 방법.

청구항 8

제1항에 있어서, 상기 이온 빔은 직사각형 패턴으로 형상화되며, 상기 직사각형 빔의 긴 가장자리는 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층의 길이에 평행하게 배향되는, 고온 초전도체 와이어를 제조하는 방법.

청구항 9

제8항에 있어서, 상기 이온 빔은 0 내지 100 ㎑의 속도로 래스터화되며, 이동하는 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층의 폭보다 1.0 내지 10㎝ 큰 거리를 횡단하는, 고온 초전도체 와이어를 제조하는 방법.

청구항 10

제1항에 있어서, 상기 이온 빔은 1 내지 25 MeV 범위의 에너지를 갖는, 양으로 대전된 이온을 포함하는, 고온 초전도체 와이어를 제조하는 방법.

청구항 11

제10항에 있어서, 상기 이온 빔은 1+ 내지 10+의 전하를 가지는 Au, Ar 및 Xe 이온 중 하나를 포함하는, 고온 초전도체 와이어를 제조하는 방법.

청구항 12

삭제

청구항 13

삭제

청구항 14

삭제

청구항 15

제1항에 있어서, 상기 이동시키는 단계는 6 m/hr 내지 1000 m/hr의 속도로 상기 이온 빔 하에서 연속 방식으로 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체 와이어를 이동시키는 단계를 포함하는, 고온 초전도체 와이어를 제조하는 방법.

청구항 16

제1항에 있어서, 상기 이온 빔 하에서 연속 방식으로 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층을 이동시키는 단계는 상기 이온 빔 하에서 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층을 복수회 이동시키는 단계를 포함하는, 고온 초전도체 와이어를 제조하는 방법.

청구항 17

제16항에 있어서, 상기 이온 빔 하에서 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층을 복수 회 이동시키는 단계는 상기 고온 초전도체 와이어가 상기 릴 주위에 나선형으로 권취되는 릴대릴 공정을 사용하는 단계를 포함하는, 고온 초전도체 와이어를 제조하는 방법.

청구항 18

제16항에 있어서, 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체가 상기 이온 빔 하에서 복수회 이동할 때마다, 상기 이온 빔은 상이한 이온 입자 및/또는 상이한 에너지를 이용하는, 고온 초전도체 와이어를 제조하는 방법.

청구항 19

제2항에 있어서, 상기 조사하는 단계는 1 내지 25 MeV의 이온 에너지를 갖는 이온 빔을 상기 금속 보호 코팅 상에 충돌시키는 단계를 포함하는, 고온 초전도체 와이어를 제조하는 방법.

청구항 20

제19항에 있어서, 상기 이온 빔 에너지는 상기 금속 보호 코팅 및 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체 초전도체층에서 상기 충돌 이온의 침투를 달성하도록 선택되는, 고온 초전도체 와이어를 제조하는 방법.

청구항 21

제1항에 있어서, 상기 빔은 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층이 상기 조사하는 단계 동안 300℃보다 높은 온도로 가열되는 것을 방지하도록 선택된 이온 빔 전류를 가지는, 고온 초전도체 와이어를 제조하는 방법.

청구항 22

제21항에 있어서, 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층은 300℃보다 낮은 온도를 유지하도록 냉각될 수 있는, 고온 초전도체 와이어를 제조하는 방법.

청구항 23

제2항에 있어서, 상기 금속 보호층은 0.25 내지 1.5㎛의 두께를 지니는 Ag를 포함하는, 고온 초전도체 와이어를 제조하는 방법.

청구항 24

제1항에 있어서, 분 당 조사되는 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층의 영역은 0.25 ㎡/hr보다 큰, 고온 초전도체 와이어를 제조하는 방법.

청구항 25

제1항에 있어서, 상기 이온 빔은 0.5㎂ 초과의 이온 입자 전류를 가지는, 고온 초전도체 와이어를 제조하는 방법.

청구항 26

삭제

청구항 27

삭제

청구항 28

삭제

청구항 29

제1항에 있어서, 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층의 폭은 4㎜ 내지 200㎜인, 고온 초전도체 와이어를 제조하는 방법.

청구항 30

제1항에 있어서, 상기 초전도체 와이어는 상기 길이를 따르는 단일 스트립으로서 또는 다수의 스트립으로 구성되는, 고온 초전도체 와이어를 제조하는 방법.

청구항 31

제1항에 있어서, 상기 이온 빔은 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층의 표면에 직각인 각도로 상기 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층에 충돌하는, 고온 초전도체 와이어를 제조하는 방법.

청구항 32

제1항에 있어서, 상기 이온 빔은 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층의 표면에 직각인 축으로부터 0° 내지 75° 의 각도로 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층에 충돌하는, 고온 초전도체 와이어를 제조하는 방법.

청구항 33

제1항에 있어서, 상기 이온 빔은 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층의 표면에 직각인 축으로부터 0 내지 ±45° 의 각도의 연속 범위에서 동시에 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층에 충돌하는, 고온 초전도체 와이어를 제조하는 방법.

청구항 34

제1항에 있어서, 상기 피닝 마이크로구조는 균일한 크기를 가지고,

상기 피닝 마이크로구조의 균일한 크기는 상기 2축으로 텍스처링된 초전도체층의 체적에서 상기 피닝 마이크로구조의 적어도 90%가 20㎚ 미만의 크기를 가지는 것으로 정의되는, 고온 초전도체 와이어를 제조하는 방법.

청구항 35

삭제

청구항 36

제1항에 있어서, 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층은 1㎛보다 큰 두께를 지니는, 고온 초전도체 와이어를 제조하는 방법.

청구항 37

제1항에 있어서, 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층은 일반식: (RE)$Ba_2Cu_3O_7$을 갖는 물질을 가지는 희토류 금속-알칼리 토금속-전이 금속 산화물 초전도체층을 포함하되, RE는 적어도 하나의 희토류 금속인, 고온 초전도체 와이어를 제조하는 방법.

청구항 38

제37항에서, RE는 이트륨을 포함하는, 고온 초전도체 와이어를 제조하는 방법.

청구항 39

삭제

청구항 40

삭제

청구항 41

삭제

청구항 42

삭제

청구항 43

삭제

청구항 44

삭제

청구항 45

고온 초전도체 와이어를 제조하는 방법으로서,

적어도 50 미터의 길이, 및 폭을 지니는 표면을 갖는 기재를 제공하는 단계로서, 상기 표면이 2축으로 텍스처링된 고온 초전도층을 지지하고, 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도층이 상기 기재의 표면의 길이 및 폭에 대

응하는 길이 및 폭을 가지는, 상기 기재를 제공하는 단계;

상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층의 상기 길이의 적어도 일부를 따르고 상기 폭의 적어도 일부를 가로질러 충돌하는 이온 빔으로 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층을 조사(irradiating)하는 단계; 및

상기 이온 빔 하에서 연속적 길이 방식으로 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층을 이동시키는 단계를 포함하되,

상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층에서 피닝 마이크로구조의 분포가 균일하게 되도록 하기 위하여, 상기 조사하는 단계는 이동하는 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층의 폭을 가로질러 이온 빔을 래스터하는 단계를 포함하는, 고온 초전도체 와이어를 제조하는 방법.

청구항 46

제45항에 있어서, 상기 이온 빔은 0 내지 100 ㎑의 속도로 래스터화되며, 이동하는 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층의 폭보다 1.0 내지 10㎝ 큰 거리를 횡단하는, 고온 초전도체 와이어를 제조하는 방법.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 연방 후원 연구 개발에 관한 성명

[0002] 본 발명은 에너지 첨단 연구 프로젝트 사무국(Advanced Research Projects Agency-Energy)이 수여한 계약 번호 DE-AR0000190 및 미국 에너지부(U.S. Department of Energy)가 수여한 계약 번호 DE-SC0012704에 따라서 미국 연방 정부의 지원 하에 이루어졌다. 미국 연방 정부는 본 발명에 대해 특정 권리를 가질 수 있다.

[0003] 관련 출원에 대한 상호 참조

[0004] 본 출원은 2015년 8월 26일자로 출원된 미국 가출원 제62/209,988호에 대한 우선권을 주장하며, 이 기초 출원의 내용은 이의 전문이 참고로 본 명세서에 편입된다.

[0005] 발명의 기술분야

[0006] 본 발명은 일반적으로 긴 길이의 고온 초전도(high temperature superconducting: HTS) 와이어에 관한 것으로, 특히 그 길이 및 폭을 따라 나노 크기의 피닝 마이크로구조(pinning microstructure)의 균일한 분포를 가지는 이러한 HTS 와이어에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0007] HTS 물질(즉, 77K의 액체 질소 온도 이상에서 이의 초전도 특성을 보유할 수 있는 물질)의 발견 이래, 이러한 HTS 물질을 사용하는 다양한 엔지니어링 응용을 개발하려고 노력해왔다. 박막 초전도체 디바이스 및 와이어에서, 가장 진보적인 것은 케이블, 모터, 발전기, 동기식 콘덴서, 변압기, 전류 제한기, 및 군사용 자석 시스템, 고에너지 물리학, 재료 처리, 수송 및 의료 용도를 포함하는 많은 응용 분야에서 여전히 바람직한 물질인 $YBa_2Cu_{7-y}O$(이후에 Y123 또는 YBCO)의 널리 공지된 기본 조성에서 이트륨, 바륨, 구리 및 산소를 포함하는 산화물 초전도체를 이용하는 디바이스의 제조로 만들어졌다. 통상적으로 코팅된 도체 또는 2세대(2G) 와이어로 지칭되는 이러한 YBCO 물질에 기초한 HTS 와이어는 롤대롤 생산 라인(roll-to-roll production line)을 사용하여 77 K에서 3 MA/㎠ 이상의 임계 전류 밀도(J_c) 및 자체-자기장(self-field)을 가지는 수백 미터 이상 길이의 연속 길이로 제조된다.

[0008] 비록 Y123이 HTS 적용을 위해 선택되는 물질임에도 불구하고, 이러한 물질은 특히 초전도체의 결정학적 c-축(crystallographic c-axis)을 따라서 인가된 자기장에서 J_c의 억제를 보인다. 이러한 특성은 모터, 변압기, 발전기, 솔레노이드, 가속기 자석, 에너지 저장 자석 및 MRI 시스템과 같은 자기장에서 작동을 요구하는 응용 분야에서 이러한 물질의 적용 가능성을 제한한다. 그러므로, 특히 c-축 방향으로 인가된 자기장에서 Y123 초전도체의 성능을 지속적으로 개선하는 것이 중요하였다. 보다 중요하게, 현재의 와이어 제조 작업과 호환 가능하고 롤대롤 공정(roll-to-roll process)에서 이러한 개선을 달성하고, 생산 길이(production length)의 HTS 와이어의 길이 및 폭을 따라서 고도로 균일하고 재생 가능한 개선을 만드는 것은 중요하다.

[0009] 이러한 개선을 달성하는 하나의 방법은 초전도 와류(superconducting vortex)의 "피닝"을 포함하며, 이는 HTS 물질에서 고임계 전류 밀도(J_c)를 위한 기본 메커니즘으로 생각된다. HTS 물질/와이어에서 피닝을 달성하도록, 초전도 플럭스 라인(superconducting flux line) 또는 와류의 정상적인 코어의 크기에 가능한 근접하게 국부적인 포텐셜 에너지 차이를 일치시키는 것이 시도되었다. 일반적으로 단면 코어는 가간섭성 길이(coherence length)(이는 HTS 컴레이트(cuprate)에서 수 나노 미터이고 온도와 함께 성장한다)와 비슷한 크기를 가지는 것으로 믿어진다. 더욱이, 다공성, 인접한 결정립(grain)의 결정 축의 오정렬에 의해, 그리고 초전도 결정립 사이의 경계에서 비초전도체 상(화합물)의 형성 및 축적에 의해 악화되는 결정립 경계(grain boundary)에서 링크를 약화시키는 것에 의해, 다결정 HTS 물질/와이어의 임계 전류가 여전히 더욱 감소되는 것으로 생각된다.

[0010] RE123 초전도 물질의 플럭스 피닝(flux pinning)을 개선하기 위한 노력이있어 왔다. 예를 들어 유로퓸(Eu), 가돌리늄(Gd) 및 사마륨(Sm)으로 부분 치환된 $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ 화합물의 초전도 특성은 결정립(J_c)(플럭스 피닝) 내부에서의 개선을 보이는 것으로 알려졌다. Y, Ba 및 Cu 부위에서 광범위한 도펀트(dopant)를 이용한 $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$의 도핑이 또한 보고되었다. 이중 경계(twin bounday)의 증가된 밀도가 플럭스 피닝에서의 단지 중간 정도의 개선을 제공한다는 것이 또한 보고되었다.

[0011] 희토류(RE), Zr, Ce, Au 등과 같은 도펀트의 도입에 의한 비초전도 나노 입자의 형성 또한 널리 평가되었다. 이러한 물질은 그 자체로 입자를 형성할 수 있거나 또는 다른 원소와 함께 입자를 형성하도록 결합될 수 있다.

[0012] 피닝 중심은 또한, 예를 들어 정렬되거나 또는 연속 구조로 $BaZrO_3$의 자기-조립(self-assembly)에 의해 원주형 결함 구조(columnar defect structure)의 형성에 의해 형성된다. 이러한 화학 기반 접근법의 가장 효과적인 방법은 $BaZrO_3$ 또는 이러한 나노-칼럼과 나노 입자의 조합과 같은 물질로 형성된 자기-조립 나노-칼럼(self-assembled nano-column)의 형성이었다. 이러한 피닝 마이크로구조가 일반적으로 RE123 초전도체의 작은 R&D 샘플에서 준비하는데 용이할지라도, 연속 길이의 와이어에 이러한 것들을 통합하는 것이 훨씬 더 어렵다. 그 이유는 이러한 복잡한 피닝 구조의 형성이 매우 재현 가능한 성장 과정을 가지는 것에 의존하기 때문이다. 그러므로, 생산 길이 와이어의 길이 또는 폭 위에 있는 초전도체층의 화학 조성, 성장 파라미터 또는 텍스처(texture)에서의 임의의 불균일성은 피닝 결함(pinning defect)의 정확한 구조 또는 밀도에 영향을 미칠 수 있다. 피닝 구조(pinning structure)에서의 이러한 변화는 초전도체층이 자기장의 존재시에 운반할 수 있는 전류에서의 큰 변화로 이어진다. 그러므로, HTS 와이어의 성능은 그 길이 및/또는 폭에 걸쳐서 변하며, 그러므로, 매우 일관적이고 예측 가능한 임계 전류를 필요로 하는 응용 분야에 부적합하다.

[0013] 추가적으로, 자기-조립된 원주형 마이크로구조의 형성에 필요한 성장 공정은 오직 기상 침착 공정에만 적용 가능하다. 그러므로, 자기-조립된 원주형 피닝 마이크로구조는 MOD 유도 초전도 막에 통합될 수 없다.

[0014] 고에너지 입자 조사(particle irradiation)를 사용하여 HTS 와이어 내로 결함을 도입하는 것은 수백 MeV 내지 수십 GeV 범위에 있는 에너지를 사용하여 시도되었다. 이러한 에너지 레벨에서, 조사는 일반적으로 그 축을 따라서 이방성 피닝(anisotropic pinning)을 유발하는 상관된 또는 원주형 결함 구조를 만든다.

[0015] 비록 이러한 결함 구조가 짧은 연구 샘플에서 REBCO 물질에서 와류 피닝을 향상시키는데 효과적이었을 지라도, 필요한 입자 에너지 수준을 달성하기 위해 요구되는 고가의 연구 가속기는 연속 길이의 초전도 와이어의 대량 생산에 적합하지 않다. 아울러, 고에너지 입자 조사에 이용 가능한 입자 전류(particle current)는 제한되었으며, 그러므로 효과적인 피닝을 제공하도록 초전도층(superconducting layer)에서 상당한 수의 결함을 만들도록 긴 조사 시간(irradiation time)을 요구한다.

[0016] 미국 특허 공개 제2015/0263259호에 기술된 바와 같이, 저에너지를 이용하는 입자의 조사가 또한 개시되어 있다. 그러나, 이러한 접근 방식은 더욱 등방성인 피닝 구조를 만드는 점 결함(point defect)을 유발하며, 이러한 것은 고정 조사 빔을 사용하여 짧은 샘플을 만드는데 초점을 맞추었다.

[0017] 그러므로, 긴 길이의 HTS 와이어의 제조에 통합될 수 있는 와류 피닝 마이크로구조를 개발하기 위한 연구 노력은, 서로 관련되고 고에너지 입자 조사에 의해 만들어진 점 결함의 조합을 복제하도록 시도한 상기 화학 기술에 초점을 맞추었다.

발명의 내용

[0018] 일 양태에서, 본 발명은 긴 길이의 고온 초전도체 와이어를 제조하는 방법을 포함한다. 상기 방법은 적어도 50 미터의 길이 및 폭을 지니는 표면을 갖는 기재를 제공하는 단계를 포함한다. 상기 표면은 2축으로 텍스처링된

고온 초전도층을 지지하고, 2축으로 텍스처링된(biaxially textured) 고온 초전도층은 기재의 표면의 길이 및 폭에 대응하는 길이 및 폭을 가진다. 상기 방법은 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층에서 피닝 마이크로구조의 균일한 분포를 만들도록 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층의 상기 길이를 따르고 상기 폭을 가로질러 균일하게 충돌하는 이온 빔으로 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층을 조사하는 단계를 또한 포함한다.

[0019] 본 발명의 다른 양태에서, 다음 특징들 중 하나 이상이 포함될 수 있다. 상기 제공하는 단계는 상기 기재 상에 적어도 하나의 완충층을 배치하는 단계, 상기 적어도 하나의 완충층 상에 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층을 형성하는 단계, 및 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층 상에 금속 보호 코팅을 침착(depositing)시키는 단계를 포함할 수 있다. 상기 제공하는 단계는 상기 금속 보호 코팅을 어닐링시키도록 산소화 열처리(oxygenation heat treatment)를 수행하여 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층을 산소화시키는 단계를 또한 포함할 수 있다. 상기 조사하는 단계는 상기 금속 보호 코팅의 표면 상에 이온 빔을 균일하게 충돌시키는 단계를 포함할 수 있다. 상기 조사하는 단계는 상기 이온 빔 하에서 연속 방식으로 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층을 이동시키는 단계를 포함할 수 있다. 상기 이온 빔은 직사각형 패턴으로 형상화될 수 있으며, 상기 이온 빔의 직사각형 패턴은 1.1:1 내지 20:1 또는 2:1 내지 10:1 사이의 종횡비를 가질 수 있다. 상기 이온 빔은 직사각형 패턴으로 형상화될 수 있으며, 상기 직사각형 패턴의 긴 가장자리는 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층의 길이에 직각으로 배향되며, 상기 빔은 이동하는 테이프보다 적어도 2배만큼 넓다. 상기 이온 빔은 직사각형 패턴으로 형상화될 수 있으며, 직사각형 빔의 긴 가장자리는 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층의 길이에 평행하게 배향된다.

[0020] 본 발명의 또 다른 양태에서, 다음 특징들 중 하나 이상이 포함될 수 있다. 상기 이온 빔은 0 내지 100 ㎑의 속도로 래스터화될(rastered) 수 있으며, 이동하는 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층의 폭보다 1.0 내지 10㎝ 큰 거리를 횡단한다. 상기 이온 빔은 1 내지 25 MeV 범위의 에너지를 갖는, 양으로 대전된 이온을 포함할 수 있다. 상기 이온 빔은 1+ 내지 8+의 전하를 가지는 Au 이온을 포함할 수 있다. 상기 Au 이온은 5+의 전하를 가질 수 있다. 상기 이온 빔은 1+ 내지 10+의 전하를 가지는 Ar 이온을 포함할 수 있다. 상기 이온 빔은 1+ 내지 10+의 전하를 가지는 Xe 이온을 포함할 수 있다. 상기 이동시키는 단계는 6 m/hr 내지 1000 m/hr의 속도로 상기 이온 빔 하에서 연속 방식으로 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체 와이어를 이동시키는 단계를 포함할 수 있다. 상기 이온 빔 하에서 연속 방식으로 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층을 이동시키는 단계는 상기 이온 빔 하에서 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층을 복수 회 이동시키는 단계를 포함할 수 있다. 상기 이온 빔 하에서 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층을 복수 회 이동시키는 단계는 상기 고온 초전도체 와이어가 릴 주위에 나선형으로 권취되는 릴대릴(reel to reel) 공정을 사용하는 단계를 포함할 수 있다. 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체가 상기 이온 빔 하에서 복수회 이동할 때마다, 상기 이온 빔은 상이한 이온 입자 및/또는 상이한 에너지를 이용할 수 있다.

[0021] 본 발명의 또 다른 양태에서, 다음 특징들 중 하나 이상이 포함될 수 있다. 상기 조사하는 단계는 1 내지 25 MeV의 이온 에너지를 갖는 이온 빔을 상기 금속 보호 코팅 상에 충돌시키는 단계를 포함할 수 있다. 상기 이온 빔 에너지는 상기 금속 보호 코팅 및 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체 초전도체층에서 상기 충돌 이온의 실질적으로 완전한 침투를 달성하도록 선택될 수 있다. 상기 빔은 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층이 상기 조사하는 단계 동안 약 300℃보다 높은 온도로 가열되는 것을 방지하도록 선택된 이온 빔 전류(ion beam current)를 가질 수 있다. 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층은 300℃보다 낮은 온도를 유지하도록 능동적으로 냉각될 수 있다. 금속 보호층은 0.25 내지 1.5㎛의 두께를 지니는 Ag를 포함할 수 있다. 분(minute) 당 조사되는 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층의 영역은 0.25 ㎡/hr보다 클 수 있다. 상기 이온 빔은 0.5㎂ 초과의 이온 입자 전류(ion particle current)를 가질 수 있다. 이온 빔은 1㎂ 초과의 이온 입자 전류를 가질 수 있다. 상기 이온 빔은 2㎂ 초과의 이온 입자 전류를 가질 수 있다. 상기 이온 빔은 4㎂ 초과의 이온 입자 전류를 가질 수 있다. 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층의 폭은 4㎜ 내지 200㎜일 수 있다. 상기 초전도체 와이어는 상기 길이를 따르는 단일 스트립으로서 또는 다수의 스트립으로 구성될 수 있다.

[0022] 본 발명의 또 다른 양태에서, 다음 특징들 중 하나 이상이 포함될 수 있다. 상기 이온 빔은 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층의 표면에 직각인 각도로 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층에 충돌할 수 있다. 상기 이온 빔은 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층의 표면에 직각인 축으로부터 0° 내지 75° 의 각도로 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층에 충돌할 수 있다. 상기 이온 빔은 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층의 표면에 직각인 축으로부터 0 내지 ±45° 의 각도의 연속 범위에서 동시에 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층에 충돌할 수 있다. 상기 피닝 마이크로구조는 실질적으로 균일한 크기를 가질 수 있다. 상기 피닝

마이크로구조의 실질적으로 균일한 크기는 20㎚ 미만의 크기를 가지는 2축으로 텍스처링된 초전도체층의 체적에서 상기 피닝 마이크로구조의 적어도 90%로서 획정될 수 있다. 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층은 1㎛보다 큰 두께를 가질 수 있다. 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도층은 일반식: $(RE)Ba_2Cu_3O_7$을 갖는 물질을 가지는 희토류 금속-알칼리 토금속-전이 금속 산화물 초전도체층(rare earth metal-alkaline earth metal-transition metal-oxide superconductor layer)을 포함할 수 있으며, 여기에서, RE는 적어도 하나의 희토류 금속이다. RE는 이트륨을 포함할 수 있다.

[0023] 또 다른 양태에 있어서, 본 발명은 적어도 50 미터의 길이, 및 폭을 지니는 표면을 구비한 기재를 가지는 긴 길이의 고온 초전도체 와이어를 특징으로 한다. 기재에 의해 지지되는 2축으로 텍스처링된 고온 초전도층이 있으며, 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도층은 상기 기재의 표면의 길이 및 폭에 대응하는 길이 및 폭을 가진다. 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층은 실질적으로 균일한 크기를 가지는 피닝 마이크로구조의 균일한 분포를 포함한다. 상기 실질적으로 균일한 크기는 2축으로 텍스처링된 초전도체층의 체적에서의 상기 피닝 마이크로구조의 적어도 90%가 20㎚ 미만의 크기를 가짐에 따라서 한정된다. 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층은 상기 층의 길이를 따라서 측정된 Y K의 온도에서 X 테슬라(Tesla)의 c-축 인가된 자기장에서의 초전도 임계 전류 밀도(superconducting critical current density)에 대한 77 K의 온도에서의 자체-자기장에서의 초전도 임계 전류 밀도의 실질적으로 일정한 비율을 보인다.

[0024] 본 발명의 다른 양태에서, 다음 특징들 중 하나 이상이 포함될 수 있다. X는 2일 수 있고, Y는 30일 수 있다. 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도층은 1㎛보다 큰 두께를 가질 수 있다. 상기 기재는 2축으로 텍스처링된 기재일 수 있다. 상기 2축으로 텍스처링된 고온 초전도층은 일반식: $(RE)Ba_2Cu_3O_7$을 갖는 물질을 가지는 희토류 금속-알칼리 토금속-전이 금속 산화물 초전도체층을 포함할 수 있으며, 여기에서 RE는 적어도 하나의 희토류 금속이다. RE는 이트륨을 포함할 수 있다.

[0025] 본 발명의 추가적인 특징, 이점 및 실시형태들은 다음의 상세한 설명, 도면 및 청구항들의 고려로부터 제시될 수 있다. 더욱이, 본 발명의 상기 요약 및 후속하는 상세한 설명은 모두 예시적인 것이며, 청구된 본 발명의 범위를 더욱 제한하지 않고 추가 설명을 제공하도록 의도된 것임을 이해해야 한다.

도면의 간단한 설명

[0026] 도 1a는 입자 빔을 이용한 HTS 테이프의 롤대롤 조사(roll-to-roll irradiation)를 도시하는 도면.

도 1b는 입자 빔을 이용한 HTS 테이프의 나선형으로 권취된 롤대롤 조사를 도시하는 도면.

도 1c는 입자 빔을 이용한 넓은 HTS 테이프의 롤대롤 조사를 도시하는 도면.

도 2는 본 발명에 따른 조사 공정과 함께 사용될 수 있는 전형적인 HTS 와이어의 기본 구조를 도시한 도면.

도 3은 롤 투롤 입자 빔 조사의 삽입을 이용한 RABiTS/MOD 공정에 의한 도 2의 2G HTS 와이어를 제조하기 위한 롤대롤 공정을 도시한 도면.

도 4A 내지 도 4C는 15, 10 및 5 MeV Au 입자 빔에 대하여 초전도체층의 깊이를 통해 형성된 결함의 수를 나타내는 SRIM 산출을 도시한 도면.

도 5는 HTS 와이어 표면 상에 3 마이크로 미터 Ag 보호층을 갖는 HTS층 내로의 10 MeV Au 입자 빔의 감소된 침투를 도시한 도면.

도 6A는 HTS 테이프의 결정학적 c-축에 평행하게 HTS 테이프 상에 충돌하는 이온 빔을 도시한 도면.

도 6B는 도 6A의 이온 빔의 HTS 막의 두께를 통한 이온 깊이를 도시하는 SRIM 산출을 도시한 도면.

도 7A는 HTS 테이프의 결정학적 c-축으로부터 변위된 10° 각도에서 HTS 테이프 상에 충돌하는 이온 빔을 도시한 도면.

도 7B는 도 7A의 이온 빔의 HTS 막의 두께를 통한 이온 깊이를 나타내는 SRIM 산출을 도시한 도면.

도 8은 입자 빔이 일정 범위의 각도에서 HTS 테이프 상에 충돌하는 것을 허용하는 노즈 롤러(nose roller)의 예시를 도시하 도면.

도 9는 RABiTS/MOD 공정에 의해 2G HTS 와이어를 제조하기 위한 롤대롤 공정을 도시한 도면.

도 10은 YBCO의 결정학적 c-축에 직각으로 배향된 인가 자기장에서 온도의 함수로서, 실시예 1에 기술된 바와 같은 46㎜ 폭의 삽입 스트립으로 만들어진 표준 HTS 와이어의 임계 전류를 도시한 도면.

도 11은 온도 및 인가 자기장 배향의 함수로서, 실시예 1에 기술된 바와 같은, 46㎜ 폭의 삽입 스트립으로 만들어진 표준 HTS 와이어의 임계 전류를 도시한 도면.

도 12A 및 도 12B는 미조사 샘플(un-irradiated sample)에 대해 동일한 조건 하에서 정지(도 12A) 및 이동하는 조사(도 12B)에 대하여 HTS 샘플을 위한 자기장의 함수로서 약 30 K에서의 임계 전류의 향상을 도시한 도면.

도 13은 롤대롤 조사 동안 테이프 길이의 함수로서 이온 플럭스 및 길이를 따르는 77 K 자체-자기장 Ic를 도시한 도면.

도 14는 Au^{5+} 이온의 상이한 선량에 대하여 YBCO층의 결정학적 c-축에 직각으로 배향된 인가 자기장의 함수로서 27 K에서의 (미조사 샘플에 대한) 임계 전류의 향상을 도시한 도면.

도 15는 HTS 와이어 표면에 직각으로 배향된 인가 자기장의 함수로서 약 30 K에서 Au 이온이 조사된 와이어 및 미조사 와이어의 임계 전류를 도시한 도면.

도 16은 77 K에서 측정된 임계 전류, 조사 전에 80 미터의 구획(section)에서의 자체-자기장에 비교된, 롤대롤 공정에서 6×10^{11} 이온/㎠의 선량으로의 18 MeV Au^{5+} 이온을 이용한 조사 후에 80 미터 길이, 46㎜ 폭의 인서트로부터 슬릿팅된(slit) 4㎜ 와이어의 77 K에서 측정된 임계 전류, 자체-자기장을 도시한 도면.

도 17은 롤대롤 공정에서 6×10^{11} 이온/㎠의 선량으로의 18 MeV Au^{5+} 이온이 조사된 46㎜ 폭의 삽입 스트립으로 만들어진 온도 및 인가 자기장(테이프 표면에 직각으로)의 함수로서 와이어의 임계 전류 및 미조사 와이어의 임계 전류를 도시한 도면.

도 18A 및 도 18B는 다수의 온도에서 인가 자기장의 배향의 함수로서 실시예 6에 기술된 바와 같이 제조된 와이어의 이송 전류(transport current)를 도시한 도면으로서, 도 18A에서, 인가 자기장은 H//ab-평면 방향으로 배향되고, 도 18B에서, 인가 자기장은 H//c-축 방향으로 배향된 도면.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0027] 실질적으로 균일한 크기의 균일하게 분포된 결함은 초전도체 테이프의 전기 성능을 향상시키기 위하여 중간 에너지 이온, 즉 1 내지 25 MeV의 초점이 맞추어진 빔(focused beam)이 테이프를 통과하는 것에 의해 초전도 테이프의 길이 및 폭을 따라서 연속적으로 형성될 수 있다. 바람직한 실시형태에서, 시스템(10)(도 1a)에서, 적어도 50 m, 보다 전형적으로 100 내지 2000 m의 길이 및 2㎜ 내지 1m의 폭을 가지는 HTS 테이프(12)가 도시되어 있다. HTS 테이프는 제1 롤(16a)로부터 제2 롤(16b)로 테이프를 이송하는 것에 의해 이온 입자의 래스터 빔(raster beam)(14)을 통과한다. 바람직한 실시형태에서, 조사된 초전도 테이프는 그 길이를 따라서 구획되고, 다수의 초전도 와이어로 변환될 수 있다. 래스터 빔(14)은 이온 빔(20)을 래스터 디바이스(22)에 출력하는 이온 공급원(18)에 의해 만들어지며, 래스터 디바이스는 조사 영역(24)에서 HTS 테이프(20)를 가로질러 이온 빔(20) 및 래스터 빔(14)의 초점을 맞춘다.

[0028] 도 1b에서, 이온 공급원(18b)로부터 입자 빔이 조사되는 롤대롤 시스템에서 나선형으로 권취된 HTS 테이프(12b)를 사용하는 대안적인 HTS 와이어 제조 구성이 도시되어 있다. 도 1c에서, 이온 공급원(18c)로부터 입자 빔이 조사되는 넓은 HTS 테이프를 가지는 넓은 HTS 테이프(12c)의 롤대롤 조사가 도시되어 있다. 이러한 문맥에서 넓다는 것은 상대적인 용어이며, 테이프의 폭은 전형적으로 4㎜ 내지 200㎜일 수 있다. 이러한 경우에, 테이프(12c)는 도 1a에 도시된 HTS 테이프(12)보다 훨씬 넓은 테이프 또는 웨브(web)로서 도시된다. 본 발명에 따른 조사 공정은 테이프(12a-c)의 제조 공정에도 동등하게 적용 가능하다.

[0029] 본 발명에 따른 조사 공정은 HTS 와이어 제조 공정에 도입되거나 삽입될 수 있다. 이온 빔 및 조사 공정의 세부사항은 다음에 제공된다. 도 1에 도시된 공정은 전체 와이어 제조 공정에서 실시될 수 있는 단지 하나의 단계이다.

[0030] 본 발명에 따른 이온 조사 공정을 이용할 수 있는 HTS 와이어(30)의 예시적인 구조는 도 2에 도시되어 있다. 이러한 구조에서, HTS 와이어(30)는 기재(36) 위에 배치되어 기재에 의해 지지되는 다결정 초전도체층(32), 및 그 사이에 있는 하나 이상의 완충층(34)을 포함한다. 기재(36)는 임의의 적절한 금속 함유 물질로 형성될 수 있는

가요성 금속 호일을 포함한다. 일 실시형태에 따라서, 가요성 금속 기재는 니켈 함유 합금이다.

[0031] 기재(36)는 초전도체층(32)으로 전사되는 텍스처를 포함할 수 있다. 본 명세서에 기술된 바와 같이, 텍스처는 결정 평면 정렬을 포함하는 마이크로구조를 지칭한다. 초전도체층에서의 고도의 결정 평면 정렬은 다결정 초전도체층(32)이 단결정과 같은 성능을 보이는 것을 가능하게 한다. 텍스처링된 기재는 가요성 금속 막 또는 상기 다른 층들 중 하나일 수 있다. 대안적으로, 텍스처링된 기재(36)는 코팅된 도체 내의 박리층일 수 있다.

[0032] 텍스처링된 기재(36)는 임의의 적절한 공정에 의해 만들어질 수 있다. 일 실시형태에 따라서, 텍스처링된 기재(36)는 압연 보조 2축으로 텍스처링된 기재(RABiTS) 공정에 의해 제조될 수 있다. RABiTS 공정은 압연 보조 공정(rolling assisted process)에 의한 2축으로 텍스처링된 금속 호일의 제조를 포함한다. 적어도 하나의 산화물 완충층(34)은 그런 다음 텍스처링된 금속 기재(36) 상에 제공되며, 산화물 완충층은 금속 막과 동일한 2축으로 텍스처링된 마이크로구조를 보인다. 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층(32)은 그런 다음 산화물 완충층(들)(34) 위에 침착된다. 산화물 완충층(34)은 막으로부터 초전도체층으로의 금속의 확산을 방지한다.

[0033] 당업계에서 공지된 바와 같이, HTS 와이어(30)는 또한 초전도체층(32) 상에 배치된 Ag층과 같은 금속 보호층(38a), 및 금속층(38a) 상에 배치된 안정제층(40a)을 포함할 수 있다. 다른 금속층(38b) 및 안정제층(40b)은 기재(36)에 부착된 HTS 와이어(30)의 반대측에 배치될 수 있다.

[0034] 다른 실시형태에 따라서, 텍스처링된 기재는 이온 빔 보조 침착(ion-beam assisted deposition, IBAD)을 이용하는 공정에 의해 만들어질 수 있다. IBAD 공정은 텍스처링되지 않은 금속 호일의 표면 상에 텍스처링된 세라믹 완충층의 이온 빔 보조 침착을 포함한다. 초전도체층은 그런 다음 텍스처링된 세라믹 완충층 위에 침착된다. 텍스처링된 세라믹 완충층과 초전도체층 사이 및/또는 금속 막과 텍스처링된 세라믹 완충층 사이에 추가적인 완충층이 제공될 수 있다. IBAD 코팅된 도체는 금속막 기재, 텍스처링된 세라믹 산화물 완충층, 산화물 완충층, 초전도체층, 금속 보호층, 및 안정제층을 포함한다.

[0035] 다른 방법 또는 물질이 유사한 테이프를 구성하도록 사용될 수 있고, 이러한 것들이 본 발명에 따라서 또한 사용될 수 있다는 것이 이해된다.

[0036] 초전도체층은 임의의 적절한 공정에 의해 코팅된 도체 구조물의 기재 위에 침착될 수 있다. 일 실시형태에 따라서, 초전도체층은 금속-유기 침착 공정에 의해 침착될 수 있다. 또 다른 실시형태에 따라서, 초전도체층은 펄스 레이저 침착(pulsed laser deposition, PLD), 반응 공동 증발(reactive co-evaporation, RCE), 금속-유기 화학 기상 침착(metal-organic chemical vapor deposition, MOCVD), 전자 빔 침착, 화학 기상 침착(CVD), 또는 스퍼터링 공정에 의해 침착될 수 있다. 초전도체층은 임의의 적절한 두께를 가질 수 있다. 한 실시형태에 따라*?*, 초전도체층은 1㎛보다 큰 두께를 가진다. 다른 실시형태에서, 초전도체층은 약 1㎛ 내지 약 2㎛ 범위의 두께를 가진다. 일부 실시형태에 따라서, 초전도체는 약 5㎛ 미만의 두께를 가질 수 있다.

[0037] 보호 금속층은 초전도체층을 보호하는 목적을 위해 초전도 테이프의 초전도체층 위에 침착될 수 있다. 보호 금속층은 임의의 적절한 금속 함유 물질일 수 있다. 일 실시형태에 따라서, 보호 금속층은 은층(silver layer)이다. 보호층은 임의의 적절한 두께를 가질 수 있다. 일 실시형태에 따라서, 보호층은 3㎛의 두께를 가진다. 다른 실시형태에 따라서, 보호층은 약 1㎛의 두께를 가진다.

[0038] 안정제층은 보호 금속층 위에 침착될 수 있다. 일 실시형태에 따라서, 안정제층은 구리를 포함할 수 있다. 안정제층은 10㎛보다 큰 두께를 가질 수 있다. 다른 실시형태에서, 안정제층은 1 내지 2㎛의 두께를 가질 수 있다. 일 실시형태에서, 안정제층은 초전도체층이 조사된 후에 추가될 수 있다.

[0039] 초전도체층은 임의의 적절한 초전도체로 형성될 수 있다. 일 실시형태에 따라서, 초전도체층은 희토류-알칼리토금속-전이 금속 산화물 초전도체일 수 있다. 일 실시형태에 따라서, 초전도체층은 다음의 일반식을 갖는 초전도체를 함유할 수 있다:

[0040] $(RE)Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$

[0041] 여기에서, RE는 적어도 하나의 희토류 금속을 포함하고, $0 \leq \delta \leq 0.65$이다. 다른 실시형태에 따라서, 초전도체층은 다음의 일반식을 가지는 초전도체를 함유할 수 있다:

[0042] $(RE)Ba_2Cu_3O_7$

[0043] 여기에서, RE는 적어도 하나의 희토류 금속을 포함한다. 일 실시형태에서, RE는 이트륨을 포함하여, 일반식 $YBa_2Cu_3O_7$(YBCO)의 초전도체층을 만들 수 있다. 초전도체층이 본 명세서에서 편의상 YBCO 초전도체층으로 지칭될

것이지만, 본 출원에서 논의된 방법은 다른 적절한 초전도체 물질에도 동등하게 적용된다. 일부 경우에, RE는 2개 이상의 희토류 금속의 혼합물일 수 있다.

[0044] 초전도체층은 또한 1차 희토류 금속(primary rare earth metal) 이외에 도펀트를 포함할 수 있다. 도펀트는 희토류 금속일 수 있다. 일 실시형태에 따라서, YBCO 초전도체층은 디스프로슘 도펀트(dysprosium dopant)를 포함할 수 있다. 도펀트는 1차 희토류 금속에 대해 75%까지의 양으로 존재할 수 있다. 일 실시형태에 따라서, 도펀트는 1차 희토류 금속의 적어도 약 1% 내지 최대 약 50%의 양으로 존재한다.

[0045] 다른 실시형태에 따라서, 도펀트는 Zr, Nb, Ta, Hf 또는 Au와 같은 전이 금속일 수 있다. 도펀트는 단일 또는 혼합된 금속 산화물을 형성하도록 초전도체 내의 다른 원소와 결합할 수 있다.

[0046] 일 실시형태에서, 초전도 테이프는 그 길이를 따라서 다수의 스트립으로 구획될 수 있다. 구획화(sectioning)는 레이저 절단, 롤 슬릿팅(roll slitting) 또는 펀칭(punching)을 포함하는 적절한 수단에 의해 행해질 수 있다. 추가의 금속 안정제층이 초전도 와이어를 형성하도록 구획된 테이프의 양쪽 표면에 적층될 수 있다. 안정제층은 임의의 적절한 금속 함유 물질일 수 있다. 일 실시형태에서, 안정제층은 구리이다. 다른 실시형태에서, 안정제층은 스테인레스강, 황동 또는 임의의 다른 적절한 금속 함유 물질이다. 일 실시형태에서, 안정제의 폭은 구획된 테이프의 폭과 동일하다. 다른 실시형태에서, 안정제층의 폭은 구획된 테이프의 폭보다 크다. 다른 실시형태에서, 안정제층은 구획된 테이프의 모든 측면 주위를 감쌀 수 있다. 다른 실시형태에서, 2개 이상의 구획된 테이프는 안정제층들 사이에 접합될 수 있다. 바람직한 실시형태에서, 안정제층은 땜납에 의해 구획된 삽입 스트립에 결합된다.

[0047] 도 3은 주형(template)을 위한 RABiTS 공정 및 YBCO층을 위한 MOD 공정을 사용하여, 그 길이 및 폭을 따라서 입자 조사 유도 피닝 결함의 균일한 분산을 갖는 초전도 와이어를 제조하기 위한 기본 롤대롤 제조 공정(50)을 도시한다. 공정은 공정 단계(52)에서 기재 압연 및 텍스처 어닐링을 포함하고, 완충층들의 완충층 침착 및 스퍼터 버퍼 침착은 각각 단계(54 및 56)이다. 단계(50, 60 및 62)에서, HTS층은 용액 기반 (RE)BCO 전구체로 완충된 기재(buffered substrate)를 코팅하는 것에 의해 침착되고, 전구체는 분해되고 (RE)BCO층은 성장된다. 다음으로, 단계(64)에서 Ag 보호층이 HTS층 상에 침착되고, 단계(66)에서 산소화 열처리가 수행된다. 표준 공정에서, 공정에서의 다음 단계는 단계(68)에서 구리 안정제와 같은 안정제층의 침착, 이어서 단계(70 및 72)에서 슬릿팅 및 적층일 것이다. 그러나, 본 발명에 따라서, 도 1에서 도면 부호 10과 같은 이온 조사 단계는 산소화 열처리 단계(66)와 안정제 침착 단계(68) 사이에 삽입된다.

[0048] 도 3에 도시된 개별 처리 단계는, 다른 공정들이 주형, YBCO 침착 또는 안정화를 위해 사용될 때 대체될 수 있다. 더욱이, 금속 보호층이 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층 위에 배치되지 않으면, 조사 공정은 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층의 표면에 직접 수행될 수 있다.

[0049] 이온이 초전도체층에서 필요한 결함을 만들기 위하여, 이온은 초전도체층의 표면 상의 임의의 층(예를 들어, 보호 금속층)을 통하여 초전도체층 내로 균일하게 보내지도록 충분한 에너지를 가져야만 한다. 수용 가능한 이온 에너지는 SRIM(Stopping and Range of Ions in Matter)과 같은 프로그램을 사용하여 산출될 수 있다. 일 실시형태에 따라서, 이온은 약 1.2㎛ 두께를 지니는 YBCO층 및 약 1㎛ 두께의 보호 Ag층에 대해 약 1 내지 25 MeV의 에너지(중간 정도의 에너지) 또는 보다 바람직하게는 약 14 내지 20 MeV의 에너지를 갖는 Au 이온일 수 있다. 보호 금속층이 없는 또 다른 실시형태에서, 이온은 약 1.2㎛의 두께를 갖는 YBCO층에 대해 약 1 내지 14 MeV의 에너지 또는 보다 바람직하게는 약 7 내지 14 MeV의 에너지를 갖는 Au 이온일 수 있다.

[0050] 약 1.2㎛의 두께를 갖는 YBCO층 및 약 1㎛ 두께의 보호 Ag층에 대해, 이온의 에너지가 너무 낮은 예를 들어, 약 5 MeV인 경우에, 이온은 도 4C에 도시된 바와 같이 균일하게 분포된 무작위로 분산된 결함을 만들도록 초전도체층 내로 충분히 멀리 이동하지 않을 수 있다. 도 4B에 도시된 바와 같이, 10 MeV의 이온 에너지에서, HTS층을 가로지르는 분포는 농도가 HTS층의 바닥을 향해 현저하게 약해짐에 따라서 균일하지 않다. 도 4A에 도시된 바와 같이, 15 MeV에서의 이온 에너지로, HTS층을 가로질러 균일한 이온 분포가 존재한다. 각각의 경우에 Ag 보호층 두께는 약 1㎛였다.

[0051] 대안적인 실시형태에 따라서, Ar, W, Ni, Cu, O, Ag, Xe, Pb, H 이온과 같은 다른 원소의 중간 에너지 이온은 초전도 테이프의 길이 및 폭을 따라서 연속적으로 무작위로 분산된 결함을 형성하도록 사용될 수 있다.

[0052] 조사는 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층 위에 또는 보호층이 제공되지 않으면 2축으로 텍스처링된 고온 초전도체층에 직접 배치되는 HTS 와이어의 금속 보호층을 통해 수행될 수 있다. 일 실시형태에서 보호 금속층은 Ag이다. 일 실시형태에 따라서, Ag층의 두께는 약 0.25㎛ 내지 3㎛, 또는 더욱 바람직하게는 0.5㎛ 내지 1㎛이

다.

[0053] 보호 금속층이 충돌 입자와 상호 작용할 것이기 때문에, 층의 두께가 주어진 입자 에너지 때문에 증가함에 따라서, 그 침투 깊이는 감소된다. 도 5에 도시된 바와 같이, 10 MeV Au 입자 빔과 함께 3㎛ 두께의 Ag층에 대해, 입자 농도는 HTS층의 깊이의 약 절반에서 급격하게 떨어져 신속하게 0으로 감소한다.

[0054] 밑에 있는 HTS층을 통한 입자 빔의 균일한 침투를 보장하는데 필요한 에너지를 최소화하기 위하여, Ag층은 바람직하게는 0.5 내지 1㎛의 두께를 가진다. 이러한 두께는 보다 낮은 에너지 입자 빔의 사용을 가능하게 하고, 여전히 대기(atmosphere) 및 이후의 처리 단계로부터 HTS층의 보호를 제공한다.

[0055] 일 실시형태에서, 이동하는 HTS 테이프(82) 상의 HTS층의 조사(80)는 도 6A 및 도 6B에 도시된 바와 같이 초전도체층의 결정학적 c-축(84)을 따라서 일어날 수 있다. 이 실시형태에서, 이온의 에너지가 적절히 선택되면, 즉 15 MeV이면, 결함 형성은 도면 부호 86으로 도시된 바와 같은 HTS층의 두께에 걸쳐서 균일하다.

[0056] 대안적인 실시형태에서, 이동하는 HTS 테이프(92)에 충돌하는 조사(90)는 초전도체의 c-축(94)으로부터 변위된 각도를 따라서 일어날 수 있다. 이 실시형태에서, 도 7A 및 도 7B에 도시된 바와 같이, HTS층을 통한 이온의 경로는 각도에 비례하여 증가한다. 그러므로, 동일한 에너지에 대해, 결함 밀도는 HTS층의 c-축(94)을 따라서 감소할 것이다.

[0057] 또 다른 바람직한 실시형태에 따라서, 이동하는 테이프(102) 상의 HTS층의 조사는 도 8에 도시된 바와 같이 이온 빔에 위치된 노우즈 롤러(106) 주위에 테이프를 굴곡시키는 것에 의해 HTS층의 c-축(104)을 중심으로 연속적인 각도 범위에서 인가될 수 있다. 이러한 대안적인 실시형태에서, 굴곡부의 지름을 선택하는 것에 의해, HTS층을 통한 이온 빔의 침투 깊이는 각각의 각도에서 조절될 수 있어, 초전도체층의 결정학적 c-축(104)의 깊이를 따라서 결함 밀도가 선택적으로 조정되는 것을 가능하게 한다.

[0058] 이온 입자의 선량은 결과적인 결함의 밀도가 의도된 응용을 위해 필요한 온도 및 자기장에서의 임계 전류의 증가를 유발하도록 선택되어야 한다. 예를 들어, 모터 또는 발전기 분야를 위한 HTS 코일에서 사용하도록 의도된 HTS 와이어의 경우에, 2-4 테슬라의 자기장에서 약 30 K-50 K로 최적화된 전류를 가지는 것이 바람직하다. Au 이온의 경우에, 조사 플루언스(irradiation fluence)는 적어도 1×10^{11} 입자/㎠일 수 있다. 일 실시형태에 따라서, 조사 플루언스는 1×10^{11} 입자/㎠ 내지 1×10^{12} 입자/㎠ 범위에 있을 수 있다.

[0059] 다른 이온이 사용될 때, 조사 플루언스의 바람직한 범위는 필요한 작동 조건에서 임계 전류를 향상시키도록 결함의 유효성, 크기 및 마이크로구조에 기초하여 선택될 수 있다. 일반적으로, 유효 결함의 수는 이온의 원자 질량에 의존한다. 그러므로, 보다 높은 원자 질량을 가지는 이온은 일반적으로 동일한 피닝 향상을 달성하는데 보다 낮은 원자 질량을 가지는 이온보다 적은 전체 선량을 요구한다.

[0060] 본 명세서에 설명된 공정으로, 1-25 MeV 범위에 있는 에너지를 가지는 이온에 의해 형성된 결함은 일반적으로 점 결함이며, 점 결함은 초전도체층의 폭과 길이를 가로지르고 깊이를 통해 균일하게 분포되며, 20㎚ 미만, 바람직하게는 10㎚ 미만의 균일한 치수를 가진다. 보다 구체적으로, 균일한 치수가 의미하는 것은, 본 발명에 따라서 만들어진 초전도체층의 임의의 주어진 체적에 걸쳐서, 점 결함의 적어도 90%가 20㎚ 미만, 바람직하게는 10㎚ 미만의 치수를 가질 것이라는 것이다.

[0061] 초전도체층에서 와류 피닝 마이크로구조를 만들기 위한 기존의 화학 기술은 균일한 크기의 결함을 만들지 못한다. 만들어진 결함은 각기 다르며, 10㎚ 내지 200㎚의 크기일 수 있다. 본 명세서에 기술된 이온 방사 접근법을 통해 달성된 결함 크기에서의 균일성은 초전도체층에서 향상된 전류 운반 성능을 유발한다.

[0062] 특정 응용에서, 더욱 큰 점 결함(예를 들어, 상기 크기의 2 내지 3배)이 필요할 수 있으며, 이러한 것은 본 발명에 따른 작은 점 결함이 형성되었거나 형성되고 있는 초전도체층을 조사 동안 또는 후에 약 100 내지 300℃의 온도로 가열하는 것에 의해 달성될 수 있다. 이러한 것은 더욱 큰 클러스터 결함(cluster defect)을 형성하도록 점 결함을 결합한다. 초전도체층이 실질적으로 300℃보다 높게 가열되면, 결함은 어닐링되어, 선택된 온도 및 자기장으로서 임계 전류를 증가시키는 이의 능력을 감소시킬 수 있다.

[0063] 일 실시형태에서, 최적의 피닝 향상은 O 이온이 사용될 때 1×10^{13} 내지 10×10^{13} 입자/㎠ 범위의 조사 플루언스로 달성될 수 있다. 대안적인 실시형태에서, 조사 플루언스의 바람직한 범위는 H 이온이 사용될 때 2×10^{16} 내지 10×10^{16} 입자/㎠의 범위일 수 있다.

[0064] 조사 공정에서 이용되는 입자 빔 전류는 조사 공정 동안 약 300℃보다 높은 온도로 테이프를 가열함이 없이 충분한 수의 결함을 발생시키는 임의의 적절한 양일 수 있다. 일 실시형태에서, 입자 빔 전류는 가능한 높은 것이 바람직하다. 일반적으로, 입자 전류가 높으면 높을수록, 설정된 시간 동안 초전도체의 주어진 체적에서 더욱 많은 결함이 형성된다. 그러므로, 이동하는 테이프의 경우에, 입자 전류가 높으면 더욱 높은 테이프 이송 속도를 가능하게 한다. 바람직한 실시형태에서, 입자 빔 전류는 200℃ 미만의 온도에서 테이프를 유지하도록 선택된다. 일 실시형태에서, 입자 전류가 HTS층이 200℃를 초과하도록 하면, 이동하는 테이프는 200℃ 미만의 온도를 유지하도록 능동적으로 냉각될 수 있다.

[0065] 일 실시형태에서, 입자 빔은 원자를 발생시키도록 스퍼터링 공정을 사용하여 발생되고, 원자는 그런 다음 가속기의 사용에 의해 필요한 전압까지 가속된다. 또 다른 실시형태에서, 이온은 가스 공급원으로부터 발생된다. 바람직한 실시형태에서, 이온은 ECR 공급원(전자 사이클로트론 공명 이온 공급원)를 사용하여 발생된다. ECR 공급원의 장점은 다수의 이온화된 화학종의 높은 전류 생산 신뢰성과 능력이다. ECR 공급원은 Au, W, Kr, Ar 등과 같이 높은 원자 질량을 가지는 원소의 높은 전하 상태(5+보다 높은)를 갖는 이온 빔을 만들 수 있다. 이온의 가속은 수십 MV 범위의 전압을 발생시킬 수 있는 반 데 그라프(Van de Graff) 발전기 또는 직렬식 반 데 그라프 발전기의 사용에 의해 달성될 수 있다. 가속기 시스템에 있는 자석들은 다른 전하 상태들을 가지는 이온을 격리하도록 사용될 수 있다. 이온의 에너지는 $E_{(이온)}$ =(1 + g) eV의 관계에 의해 결정되며, 여기에서 g는 이온의 전하 상태이다. 일반적으로, 이온의 전하 상태는 가속기의 이용 가능한 단자 전압, 및 초전도체층 및 필요한 입자 전류를 완전히 조사하는데 요구되는 필요 입자 에너지에 기초하여 선택된다.

[0066] 바람직한 실시형태에서, 이온은 Pellerton 전하 사슬(charge chain)을 사용하여 1 내지 25 MeV로 가속된다. 이러한 시스템의 장점은 반 데 그라프 또는 직렬 가속기보다 안정하고 콤팩트하다는 것이다.

[0067] 바람직한 실시형태에서, 5+의 전하 상태를 갖는 이온은 3 MeV의 가속 전압과 함께 사용되어, 15 MeV의 입자 에너지를 제공한다. 또 다른 실시형태에서, 5 MeV의 가속 전압은 3+ 전하 상태를 갖는 이온에 인가되어, 15 MeV의 입자 에너지를 발생시킬 수 있다. 가속 에너지 및 입자 전하의 다른 조합은 필요한 에너지 및 입자 전류를 달성하도록 사용될 수 있다.

[0068] 결함 밀도가 주어진 온도와 인가된 자기장에서 플럭스 피닝, 그러므로 임계 전류 밀도에 영향을 미치기 때문에, 이동하는 테이프가 입자 빔에 균일하게 노출되는 것이 중요하다. 일 실시형태에서, 입자 빔은 1.1:1 내지 10:1 또는 20:1의 종횡비를 가지는 직사각형 패턴으로 형성된다. 가장 긴 가장자리는 빔이 이동하는 테이프보다 2배 이상만큼 넓으면 테이프 이동에 직각으로 배향될 수 있다. 바람직한 실시형태에서, 직사각형 빔의 긴 방향은 테이프 이동 방향에 평행하게 배향되고, 이동하는 테이프의 폭을 가로질러 래스터화된다. 테이프의 폭은 1 ㎝ 또는 더욱 바람직하게는 40 내지 200㎜일 수 있다. 입자 빔은 0에서 100 ㎑의 속도로 래스터화되고, 테이프 폭보다 1 내지 10㎝ 큰 거리를 횡단한다. 바람직한 실시형태에서, 입자 빔 치수, 입자 빔의 래스터 속도, 입자 빔의 이동, 초전도체 테이프 폭, 및 입자 빔을 통한 테이프 속도는 입자 플럭스가 테이프 길이와 폭을 가로질러 균일한 것을 보장되도록 선택된다.

[0069] 일 실시형태에서, 테이프는 필요한 선량을 달성하도록 입자 빔을 다수회 통과할 수 있다. 바람직한 실시형태에서, 필요한 선량은 입자 빔을 1회 통과하는 것으로 달성된다. 대안적인 실시형태에서, 테이프는 상이한 피닝 구조를 만들거나 또는 상이한 온도 및 자기장에서 피닝을 최적화하기 위해 상이한 에너지를 갖는 상이한 이온 또는 동일한 이온을 갖는 입자 빔을 통과한다. 일 실시형태에서, 테이프는 낮은 에너지 입자 빔으로부터 점 결함의 조합, 및 높은 에너지 빔으로부터 서로 관계된 결함을 만들도록 15 MeV Au 이온을 갖는 입자 빔과 250 MeV Au 이온의 제2 빔을 통과할 수 있다.

[0070] 일 실시형태에서, 테이프는 조사 공정 후에 그 길이를 따라서 구획될 수 있으며, 개별 스트립은 복합 초전도 와이어를 형성하도록 2개의 금속 스트립 사이에 적층된다.

[0071] 다른 실시형태에서, 구리층은 조사가 완료된 후 Ag의 표면 상에 전기 도금된다. 구리는 황산계 구리 도금 용액을 사용하는 표준 전기 도금 공정에 의해 Ag층 상에 직접 침착될 수 있다. 일 실시형태에서, 구리는 테이프의 HTS 측면 상에 침착된다. 바람직한 실시형태에서, 구리는 기재의 HTS 표면 및 배면 모두에 침착된다. 일 실시형태에서, 구리층의 두께는 0.5 내지 20㎛의 범위에 있다. 바람직한 실시형태에서, 구리 두께는 0.5 내지 2㎛의 범위에 있다. 일 실시형태에서, 구리 도금된 테이프는 그 길이를 따라서 구획될 수 있고, 개별 스트립은 복합 초전도 와이어를 형성하도록 2개의 금속 스트립 사이에 적층된다.

[0072] 롤대롤 조사 공정은 기존의 결함 구조를 갖는 초전도체에 무작위로 분산된 결함의 균일한 추가를 가능하게

한다. 초전도체층에서의 결함 구조의 이러한 조합은 초전도체층에서의 피닝의 향상 시에 상승적 개선(synergistic improvement)을 허용할 수 있다. 조사 공정은 연속 공정에서 생산 라인 YBCO 코팅 전도체를 처리하도록 이용될 수 있다. 일 실시형태에 따라서, 조사 공정은 롤대롤 또는 릴대릴 시스템을 이용하는 연속 공정일 수 있다.

[0073] 조사 공정의 결과로서 만들어진 HTS 와이어의 증가된 임계 전류는 와이어들을 인가 자기장에 적용되는 응용 분야에서 사용하는데 특히 적절하게 만든다. 조사된 코팅 도체는 모터, 변압기, 발전기, 고 자기장 자기학(high field magnetics), 및 솔레노이드에서 이용될 수 있다.

[0074] 실시예

[0075] 전체 길이 및 폭을 따라서 무작위 점 결함의 균일한 분산을 포함하는 고온 초전도(HTS) 와이어 및 롤대롤 공정에 의해 이러한 결함을 도입하기 위한 방법이 설명된다. 점 결함은 와이어가 제1 릴로부터 제2 릴로 이동에 따라서, 완전히 형성된 HTS층 내로, HTS층을 특정 조성, 에너지 및 입자 전류의 이온 빔에 노출시키는 것에 의해 도입될 수 있다. 특정 실시형태에 따라서 만들어진 HTS 와이어는, 주로 초전도체의 c-축을 따라서 배향된 약 1 T 이상의 자기장의 존재시에 그 전체 길이 및 폭에 걸쳐서 상당히 큰 임계 전류를 운반할 수 있다.

[0076] 다음의 상세한 설명에서, 명세서의 일부를 형성하는 첨부 도면을 참조한다. 상세한 설명, 도면, 및 청구항들에 설명된 예시적인 실시형태들은 제한이도록 의미하는 것이 아니다. 다른 실시형태들이 이용될 수 있으며, 다른 변경은 본 명세서에 제시된 요지의 사상 또는 범위를 벗어나지 않고 이루어질 수 있다. 대체로 본 명세서에 기술되고 도면들에 예시된 본 발명의 양태들은 다양한 다른 구성으로 배열되고, 대체되고, 결합되고, 설계될 수 있고, 이러한 것들 모두는 본 발명의 부분으로 명백하게 고려되고 만들어진다.

[0077] 실시예 1

[0078] 46㎜의 폭을 지니는 연속 길이의 HTS 삽입 스트립은 도 9에 도시된 바와 같이, 압연 보조 2축으로 텍스처링된 기재 상에 금속 유기 침착에 의해 침착된 Y(Dy)BCO막이 만들어졌다. $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ 초전도층은 Dy 도핑되었으며, 7200 mg/㎠의 YBCO 코팅을 기반으로 산출된, 공극률 및 Dy_2O_3를 제외한 1.2㎛의 공칭 두께를 가졌다. 2축으로 텍스처링된 기재는 그 표면에 Y_2O_3, YSZ 및 CeO_2의 75㎚ 두께의 에피택셜층을 갖는 75㎛ 두께의 Ni(%로 5)W 합금으로 이루어졌다. 약 1 내지 2㎛ 두께의 은층은 기재의 HTS 표면 및 배면 상에 침착되었다. 샘플은 그런 다음 400℃ 이상의 온도에서 산소화 처리되고, 대략 1㎛ 두께의 구리층은 양쪽 표면에 침착되었다. 모든 공정 단계들은 롤대롤 제조 공정을 사용하여 수행되었다.

[0079] 46㎜ 폭의 HTS 삽입 스트립은 그 길이를 따라서 4㎜ 또는 10㎜의 폭을 지니는 다수의 스트립으로 롤-롤-슬릿팅되었다(roll-roll-slit). 짧은 샘플은 임계 전류를 측정하도록 이러한 스트립으로부터 절단되었다. 10㎜의 스트립 중 4㎜는 표준 복합 HTS 와이어를 형성하도록 2개의 구리 스트립 사이에 적층되었다.

[0080] 실시예 2

[0081] 실시예 1에 기술된 바와 같이 준비된 와이어의 이송 임계 전류는 온도 및 인가 자기장의 함수로서 측정되었다. 도 10은 인가 자기장이 테이프 형상화된 와이어의 표면에 직각으로 배향될 때 온도의 함수로서 임계 전류를 도시한다. 도 11은 다수의 온도에서 인가 자기장의 배향의 함수로서 이송 전류를 도시한다.

[0082] 실시예 3

[0083] HTS 와이어는 10㎜ 폭의 스트립으로의 슬릿팅 공정 후에, 짧은 쿠폰(대략 1×2 ㎝)이 18 MeV Au^{5+} 이온 빔에 노출되는 것을 제외하면 실시예 1에 기술된 바와 같이 준비되었다. 샘플은 6×10^{11} 이온/㎠의 선량을 달성하도록 충분한 시간 동안 Au^{5+} 빔에서 유지되었다. 동일한 10㎜ 스트립의 별도의 미터 길이 구획(meter long section)은 제1 롤로부터 제2 롤로 스트립을 이송하는 것에 의해 동일한 정지 Au^{5+} 빔을 통과하였다. 테이프가 제1 롤로부터 제2 롤로 이송되는 속도는 이동하는 테이프의 선량이 6×10^{11} 이온/㎠와 같도록 조절되었다.

[0084] 정지 및 이동하는 샘플의 조사 후에, 샘플의 임계 전류는 자화 기술에 의해 측정되었으며, 18 MeV Au^{5+} 조사에 노출되지 않은 샘플의 임계 전류와 비교되었다. 도 12A 및 도 12B는 미조사 샘플에 비해 YBCO의 결정학적 c-축에 직각으로 배향된 자기장의 함수로서 약 30 K에서의 정지 및 이동하는 샘플의 임계 전류가 본질적으로 동일하

다는 것을 도시한다.

[0085] 실시예 4

[0086] HTS 와이어는 산소화 공정 후에, 46㎜ 스트립이 롤대롤 공정을 사용하여 도 3에 도시된 바와 같이 18 MeV의 에너지를 가지는 에너지를 갖는 Au5+ 이온의 빔을 통과한 것을 제외하면 실시예 1에 설명된 바와 같이 준비되었다. 빔의 입자 전류는 148 nA이었다. Au 빔은 약 1×3.4 ㎝의 치수를 가지며, 46㎜ 스트립의 폭을 가로질러 1 ㎑의 속도로 연속적으로 래스터화되었다. 46㎜ 스트립의 전체 폭이 Au^{5+} 빔에 균일하게 노출되는 것을 보장하도록, 래스터링(rastering)은 65㎜의 폭을 덮었다.

[0087] 하나의 롤로부터 다른 롤로 이동하는 테이프의 속도는 28.8 m/hr로부터 6 m/hr로 변화되었다. 각각의 속도 변화 사이에서, Au^{5+} 빔이 차단되어서, Au^{5+} 이온은 테이프에 도달하지 못하였다.

[0088] 실시예 5

[0089] 자체-자기장에서 77 K 임계 전류는 실시예예 4에 기술된 바와 같이 준비된 테이프의 길이를 따라서 TapeStar 기기를 사용하여 측정되었다. 도 13은 롤대롤 조사 공정 동안 해당 이온 플럭스와 함께 길이를 따라서 측정된 임계 전류를 도시한다. 임계 전류는 Au^{5+} 이온의 총 선량이 미조사 구획에 비해 증가될 때마다 값에서의 감소를 도시한다.

[0090] 와이어의 이송 임계 전류는 테이프 표면에 직각으로 인가된 자기장의 함수로서 약 30 K에서 측정되었다. 도 14는 미조사 구획에 대한 와이어의 조사된 구획의 임계 전류를 도시한다. 임계 전류에서 최대 향상은 대략 6×10^{11} Au 이온/㎠의 총 선량에 노출된 구획에 대해 측정되었다.

[0091] 도 14에서의 조사 선량의 함수로서 YBCO층의 결정학적 c-축에 직각으로 배향된 자기장에서의 약 30 K에서 측정된 임계 전류의 향상과 도 13에서의 조사 선량의 함수로서 자체-자기장에서의 77 K에서의 비교는 Ic 향상과 77 K, 자체-자기장 Ic 사이의 상관 관계를 도시한다.

[0092] 실시예 6

[0093] 실시예예 4에 기술된 바와 같이 준비된 약 80 미터 길이의 46㎜ 삽입 스트립은 18 MeV의 에너지를 가지는 Au^{5+} 이온의 빔이 6×10^{11} Au/㎠의 선량으로 조사되었다. 시험 동안, 빔 입자 전류는 128 nA였으며, 테이프 이송 속도는 7.2 m/hr였다. 롤대롤 조사 후에, 46㎜ 삽입 스트립은 4㎜ 폭의 다수의 슬릿으로 롤 슬릿팅되었다. 조사 전의 80 미터 길이의 삽입 스트립의 구획에서, 자체-자기장에서의 77 K에서 측정된 임계 전류는 약 375 A/㎝-w였다. 자체-자기장에서의 77 K 임계 전류는 실시예 4에 기술된 바와 같이 TapeStar 기기를 사용한 조사 후에 4㎜ 스트립들 중 하나의 길이를 따라서 측정되었다. 도 16은 임계 전류가 4㎜ 스트립의 전체 길이를 따라서 약 250 A이었다는 것을 도시한다. 자체-자기장에서의 77 K에서 임계 전류의 균일한 감소는 조사 선량, 그러므로 결함 구조가 80 미터 스트립의 길이를 따라서 일정하였다는 것을 도시한다.

[0094] 실시예 7

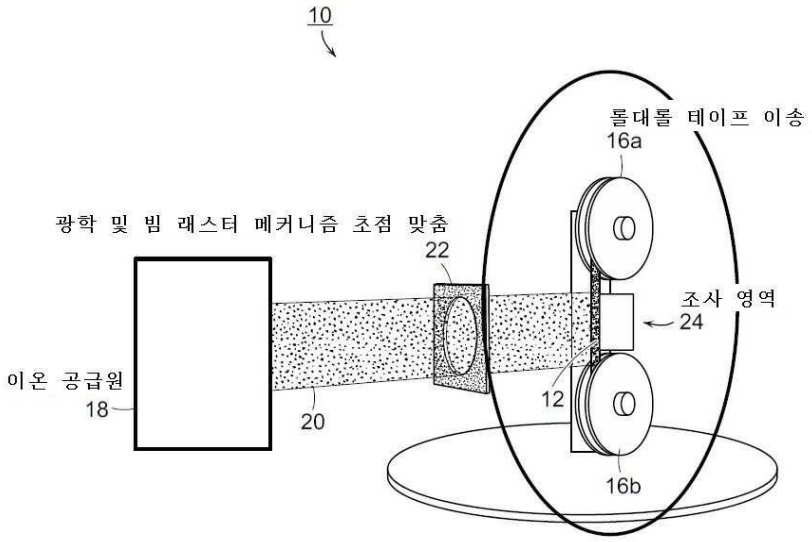
[0095] 실시예예 4에 기술된 바와 같이 Au 이온의 최적 노출로 준비된 와이어의 이송 임계 전류는 온도, 자기장의 세기 및 자기장의 배향의 함수로서 측정되었다. 도 17은 와이어 표면에 직각으로 배향된 자기장에 대한 인가 자기장의 함수로서 27 K에서 와이어의 임계 전류를 도시한다. 이는 또한 실시예 1에 기술된 바와 같이 만들어진 동일한 조건 하에서 측정된 와이어의 임계 전류를 도시한다. 이는 또한 와이어의 롤대롤 조사의 임계 전류가 미조사 와이어와 비교하여 약 1.5 T보다 큰 인가된 자기장에서 2배보다 큰 향상을 만든다는 것을 도시한다.

[0096] 도 18A 및 도 18B는 다수의 온도에서 인가 자기장의 배향의 함수로서 실시예 6에 기재된 바와 같이 만들어진 와이어의 이송 전류를 도시한다. YBCO막은 일반식 RE_2O_3을 가지는 희토류 산화물 석출물을 포함하였으며, 여기에서 RE는 Y와 Dy의 혼합물이며, 수십 나노미터의 지름이다.

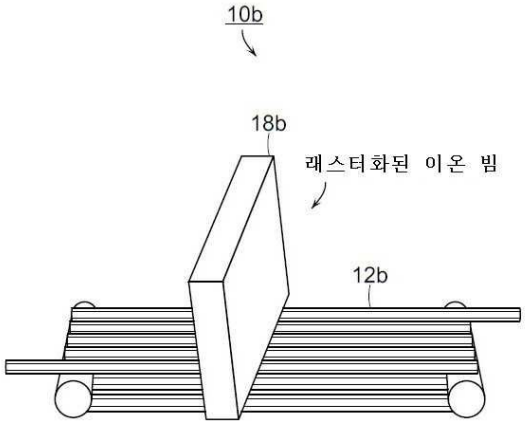
[0097] 본 발명의 바람직한 실시형태가 본 명세서에 도시되고 설명되었지만, 다양한 변경은 본 발명의 기술적 사상을 벗어나지 않고 이루어질 수 있다. 따라서, 본 발명이 예시로서 설명되었으며 제한이 아니라는 것이 이해되어야 한다. 다른 실시형태들은 다음의 청구항들의 범위 내에 있다.

도면

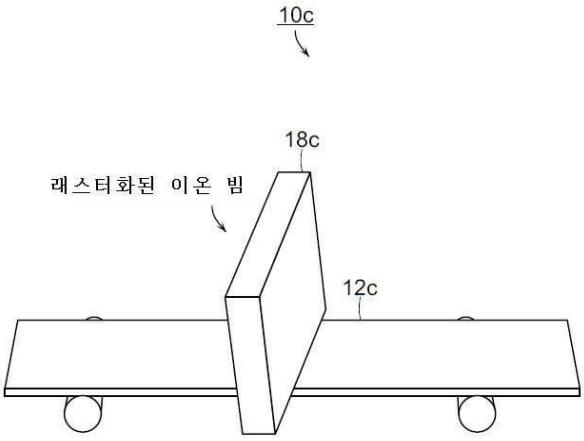
도면1a



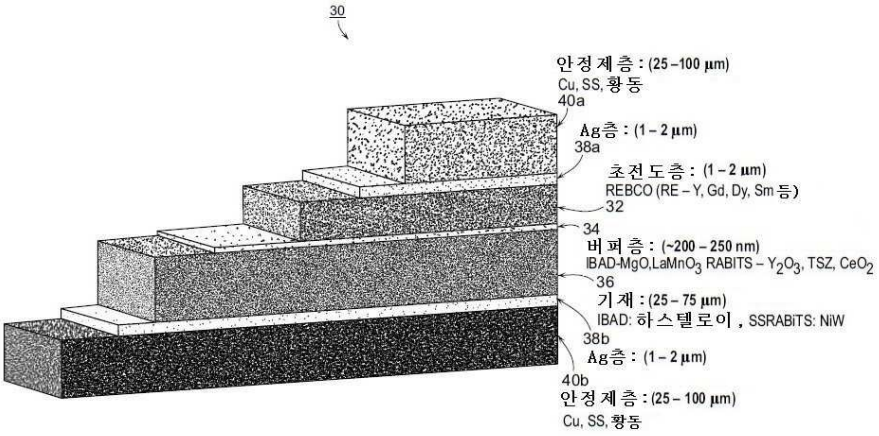
도면1b



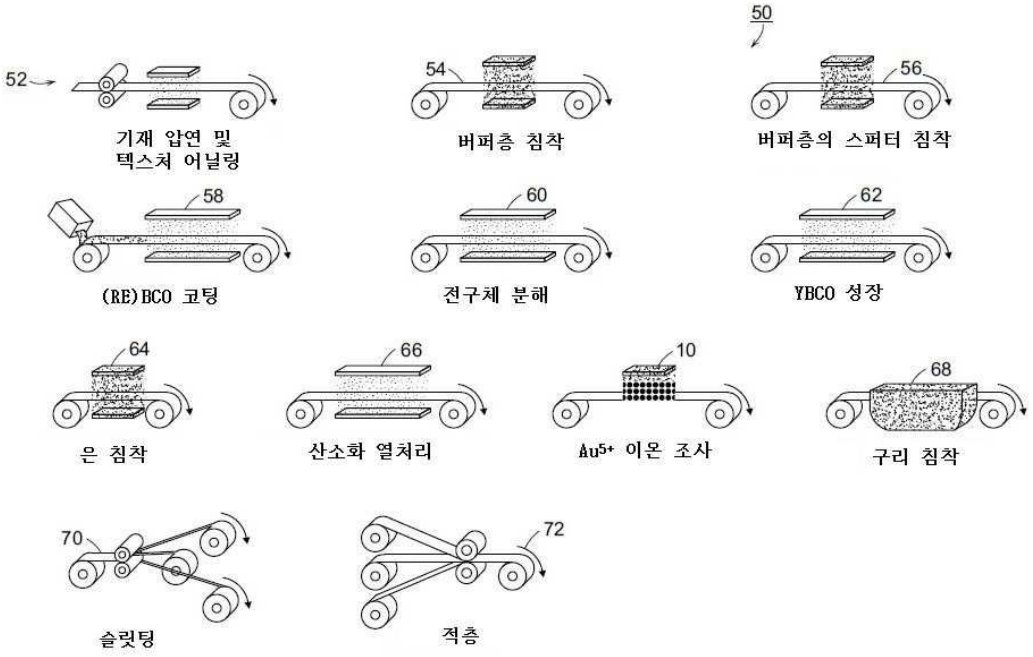
도면1c



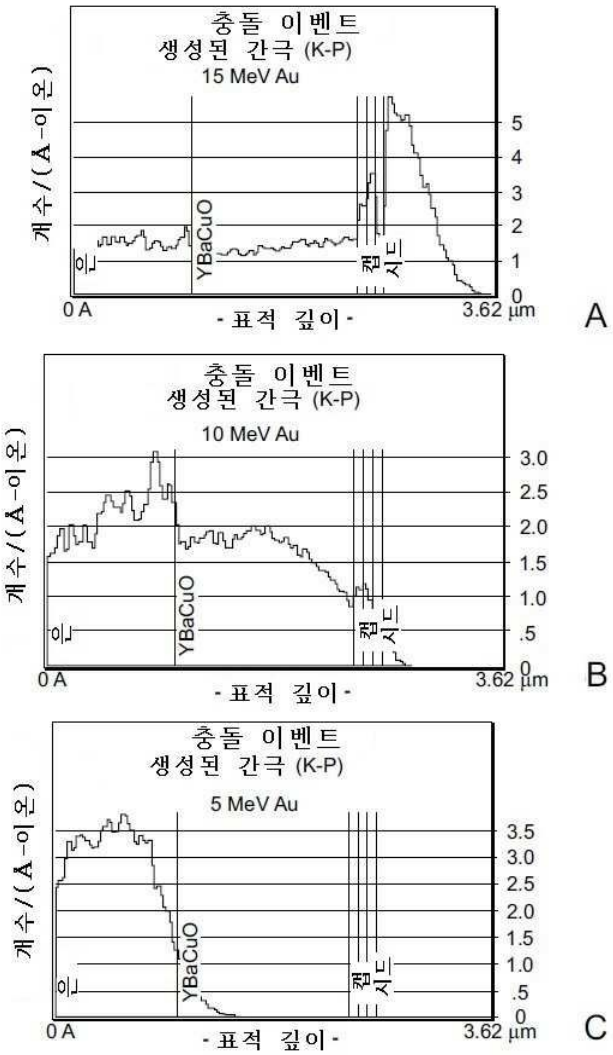
도면2


30
안정제층 : (25-100 μm)
Cu, SS, 황동
40a
Ag층 : (1-2 μm)
38a
초전도층 : (1-2 μm)
REBCO (RE-Y, Gd, Dy, Sm 등)
32
34
버퍼층 : (~200-250 nm)
IBAD-MgO,LaMnO3 RABITS-Y2O3, TSZ, CeO2
36
기재 : (25-75 μm)
IBAD: 하스텔로이, SSRABiTS: NiW
38b
Ag층 : (1-2 μm)
40b
안정제층 : (25-100 μm)
Cu, SS, 황동

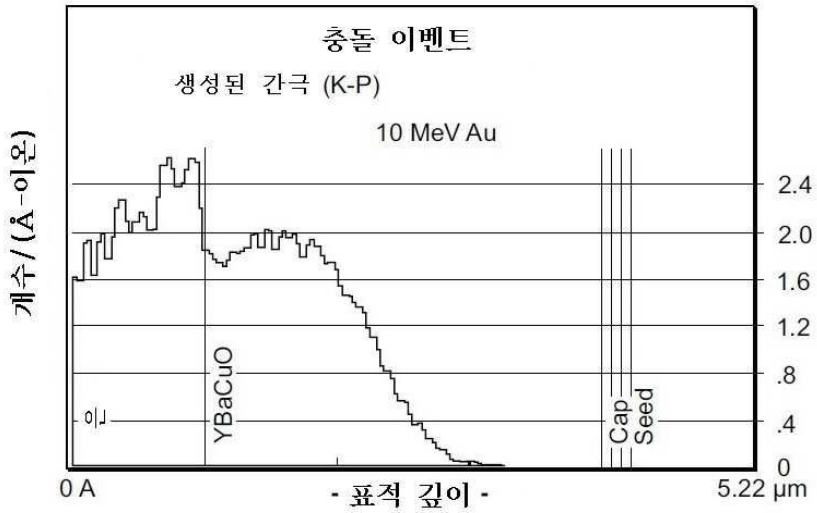
도면3


52
기재 압연 및
텍스쳐 어닐링
54
버퍼층 침착
50
56
버퍼층의 스퍼터 침착
58
(RE)BCO 코팅
60
전구체 분해
62
YBCO 성장
64
은 침착
66
산소화 열처리
10
Au5+ 이온 조사
68
구리 침착
70
슬릿팅
72
적층

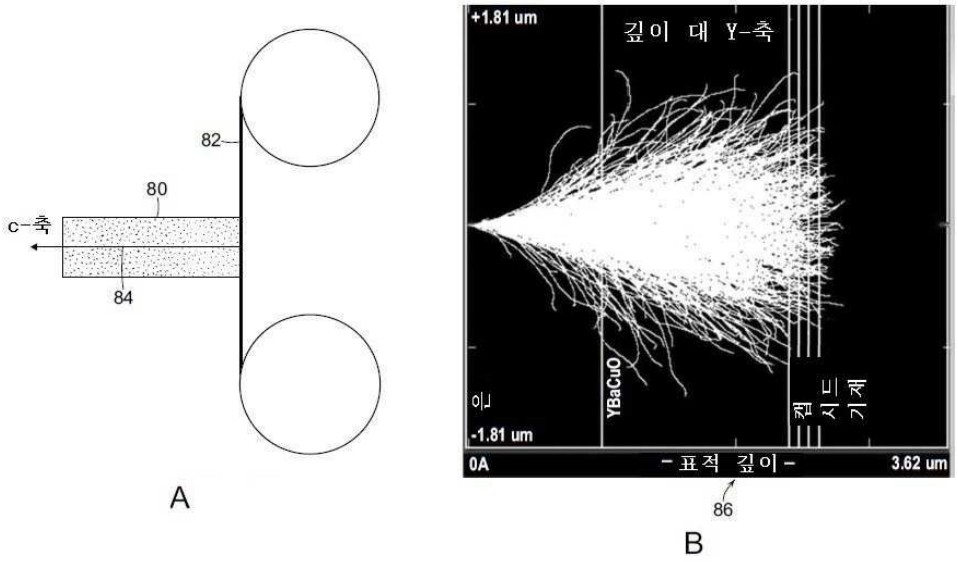
도면4


충돌 이벤트
생성된 간극 (K-P)
15 MeV Au
개수/(Å-이온)
5
4
3
2
1
0
YBaCuO
캡
시드
0 A
- 표적 깊이 -
3.62 μm
A
충돌 이벤트
생성된 간극 (K-P)
10 MeV Au
개수/(Å-이온)
3.0
2.5
2.0
1.5
1.0
.5
0
YBaCuO
캡
시드
0 A
- 표적 깊이 -
3.62 μm
B
충돌 이벤트
생성된 간극 (K-P)
5 MeV Au
개수/(Å-이온)
3.5
3.0
2.5
2.0
1.5
1.0
.5
0
YBaCuO
캡
시드
0 A
- 표적 깊이 -
3.62 μm
C

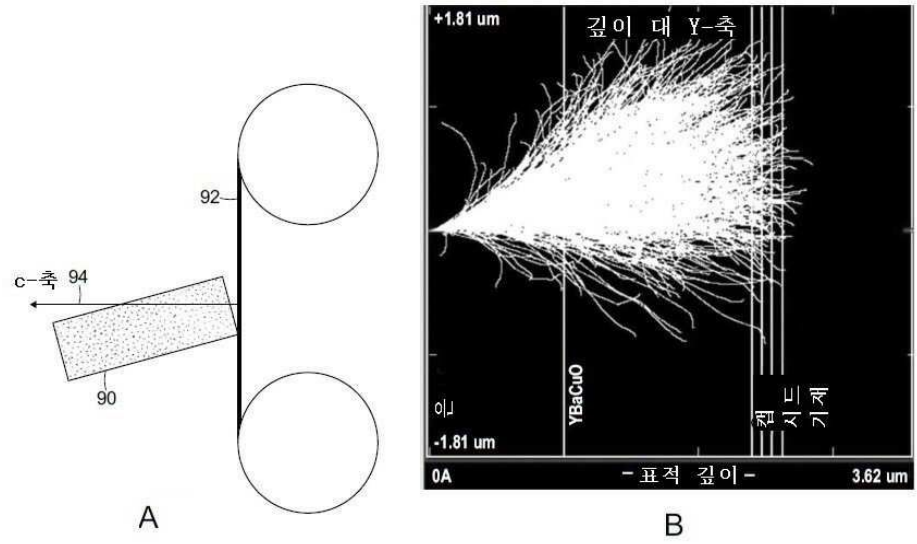
도면5


충돌 이벤트
생성된 간극 (K-P)
10 MeV Au
개수/(Å-이온)
2.4
2.0
1.6
1.2
.8
.4
0
YBaCuO
Cap
Seed
0 A
- 표적 깊이 -
5.22 μm

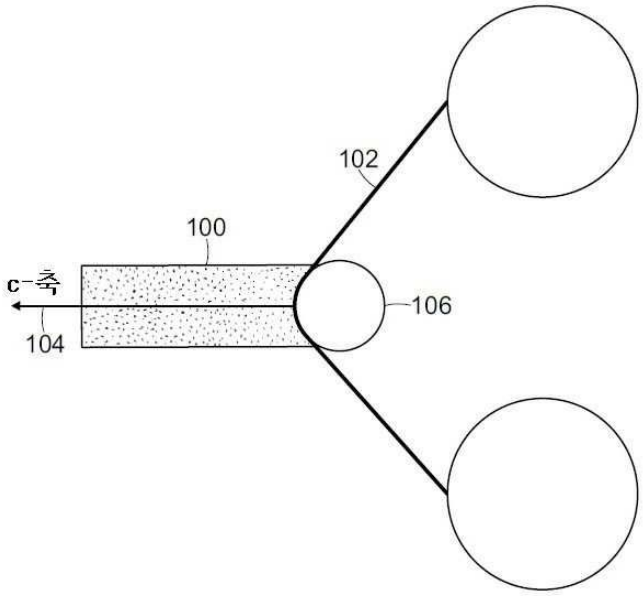
도면6


82
80
c-축
84
A
+1.81 um
깊이 대 Y-축
YBaCuO
캡 시드 기계
인
-1.81 um
0A
- 표적 깊이 -
3.62 um
86
B

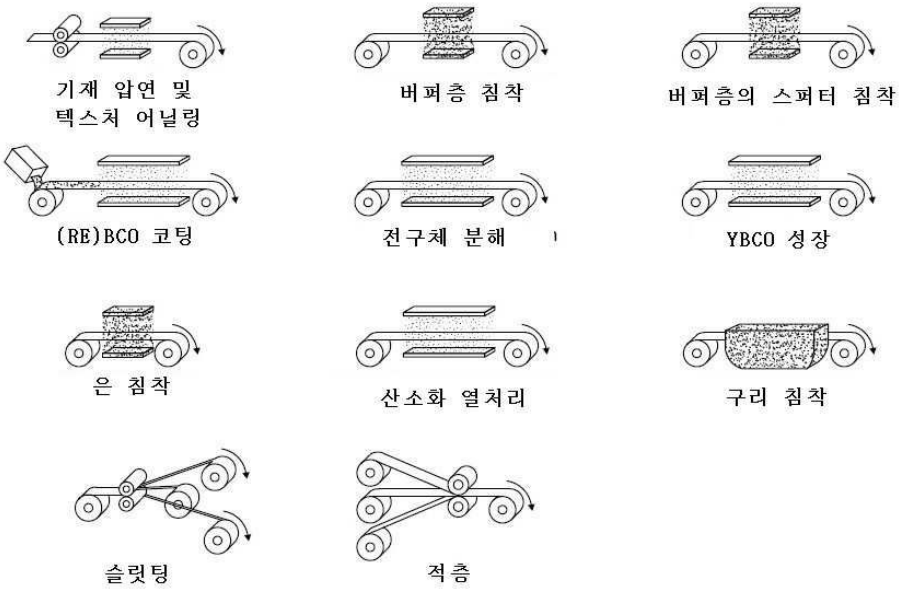
도면7


92
c-축 94
90
A
+1.81 um
깊이 대 Y-축
YBaCuO
캡 시드 기계
인
-1.81 um
0A
- 표적 깊이 -
3.62 um
B

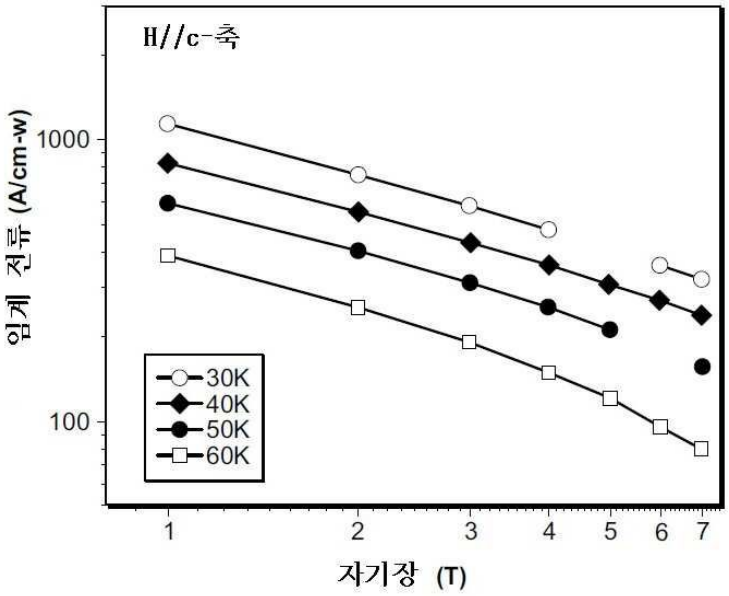
도면8


102
100
c-축
106
104

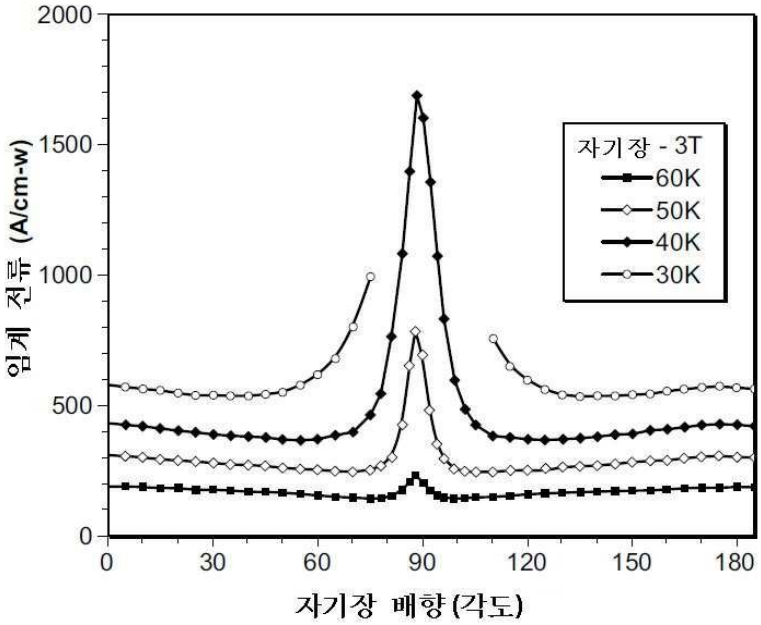
도면9


기재 압연 및
텍스처 어닐링
버퍼층 침착
버퍼층의 스퍼터 침착
(RE)BCO 코팅
전구체 분해
YBCO 성장
은 침착
산소화 열처리
구리 침착
슬릿팅
적층

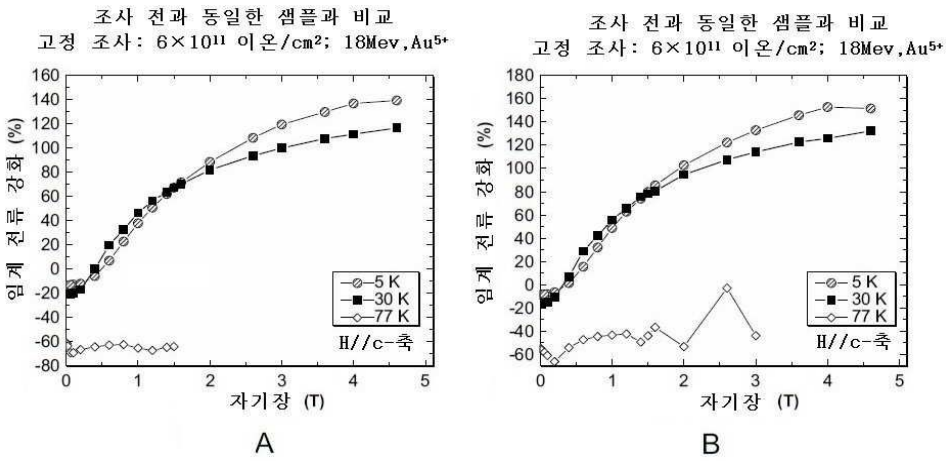
도면10


H//c-축
임계 전류 (A/cm-w)
1000
100
30K
40K
50K
60K
1
2
3
4
5
6
7
자기장 (T)

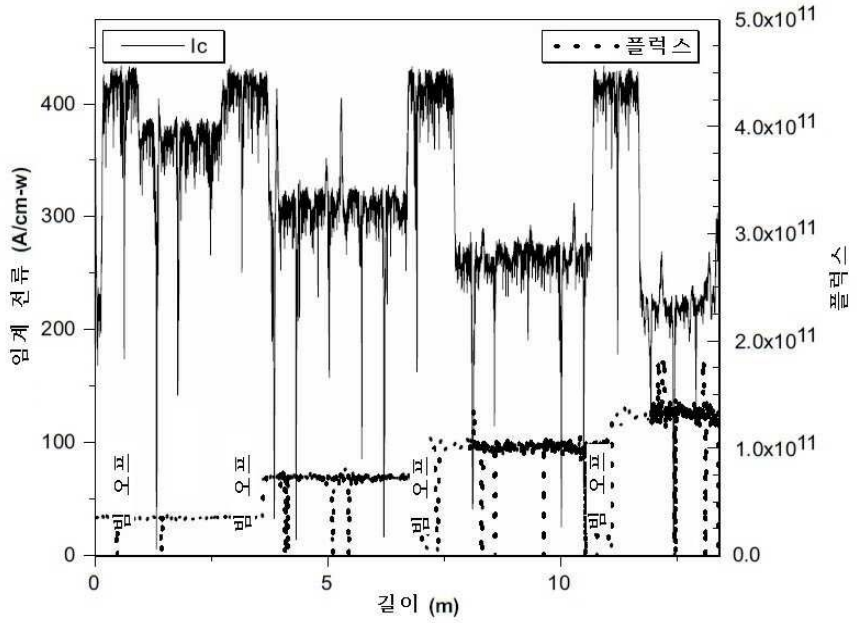
도면11


2000
1500
1000
500
0
임계 전류 (A/cm-w)
자기장 - 3T
60K
50K
40K
30K
0
30
60
90
120
150
180
자기장 배향 (각도)

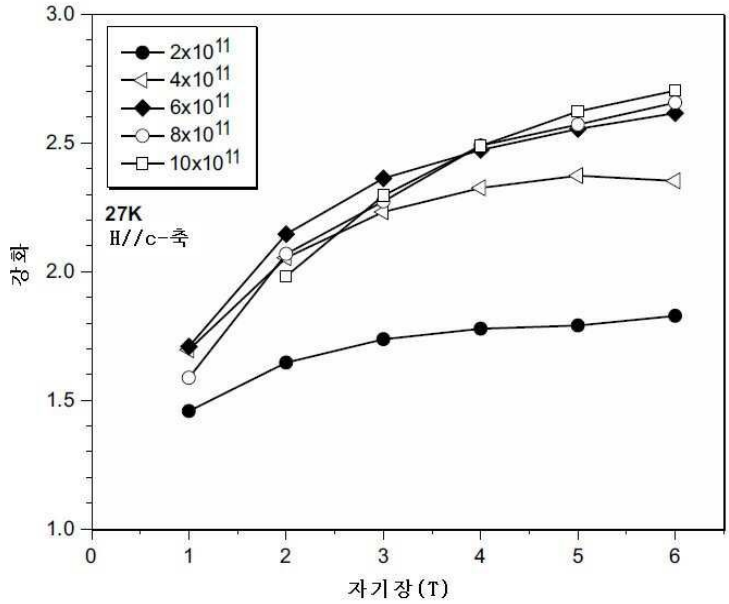
도면12


조사 전과 동일한 샘플과 비교
고정 조사: 6×10¹¹ 이온/cm²; 18Mev,Au⁵⁺
임계 전류 강화 (%)
자기장 (T)
5 K
30 K
77 K
H//c-축
A
조사 전과 동일한 샘플과 비교
고정 조사: 6×10¹¹ 이온/cm²; 18Mev,Au⁵⁺
임계 전류 강화 (%)
자기장 (T)
5 K
30 K
77 K
H//c-축
B

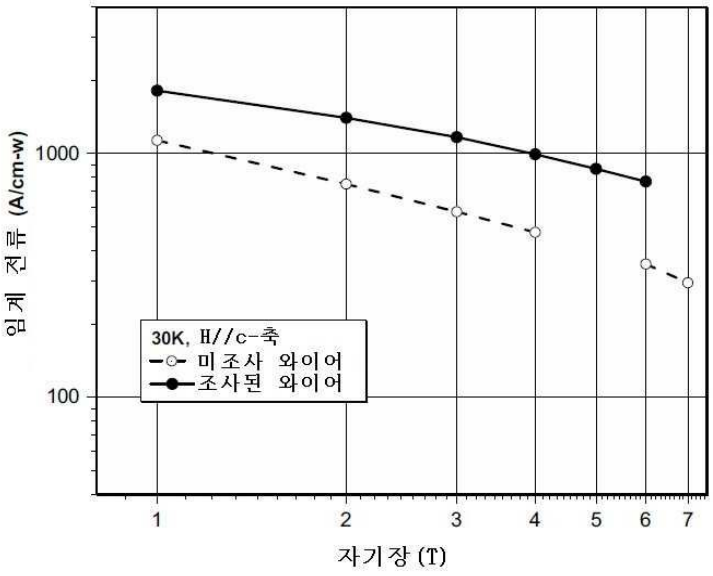
도면13


Ic
플럭스
임계 전류 (A/cm-w)
플럭스
길이 (m)
빔 오프
빔 오프
빔 오프
빔 오프

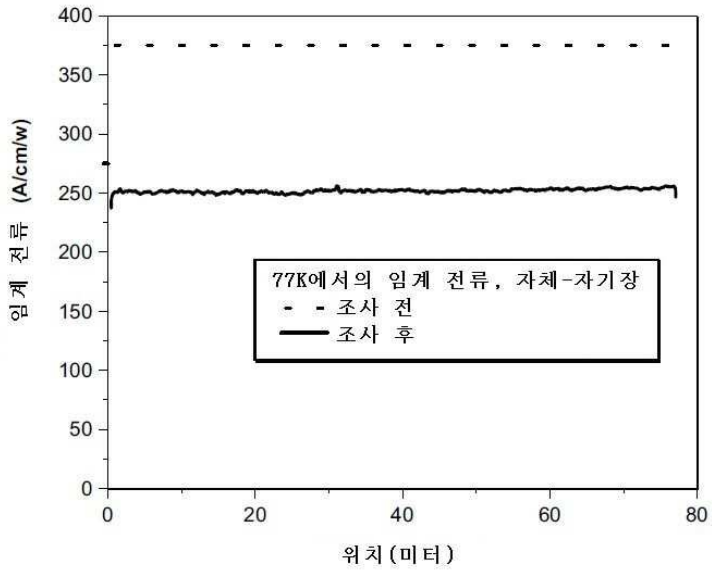
도면14


3.0
2.5
2.0
1.5
1.0
0
1
2
3
4
5
6
강화
자기장 (T)
2x10^11
4x10^11
6x10^11
8x10^11
10x10^11
27K
H//c-축

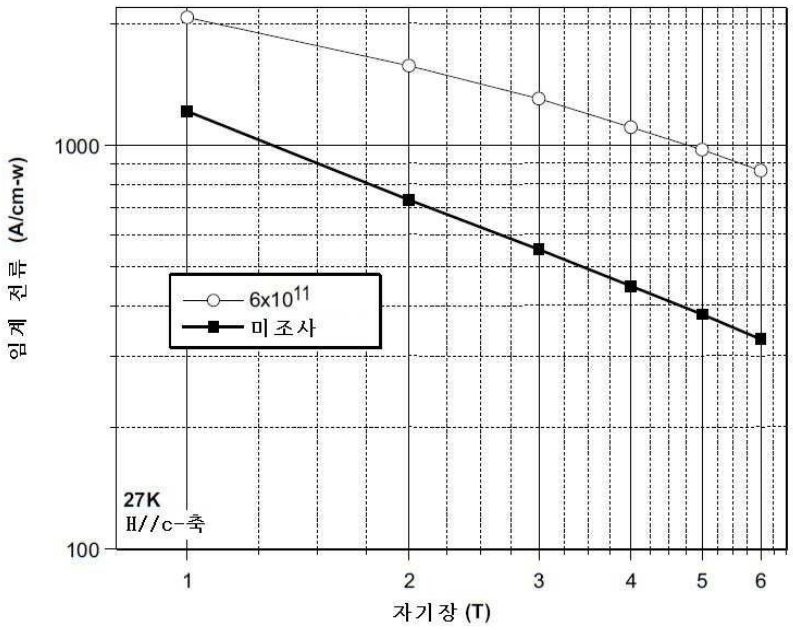
도면15


1000
100
1
2
3
4
5
6
7
임계 전류 (A/cm-w)
자기장 (T)
30K, H//c-축
미조사 와이어
조사된 와이어

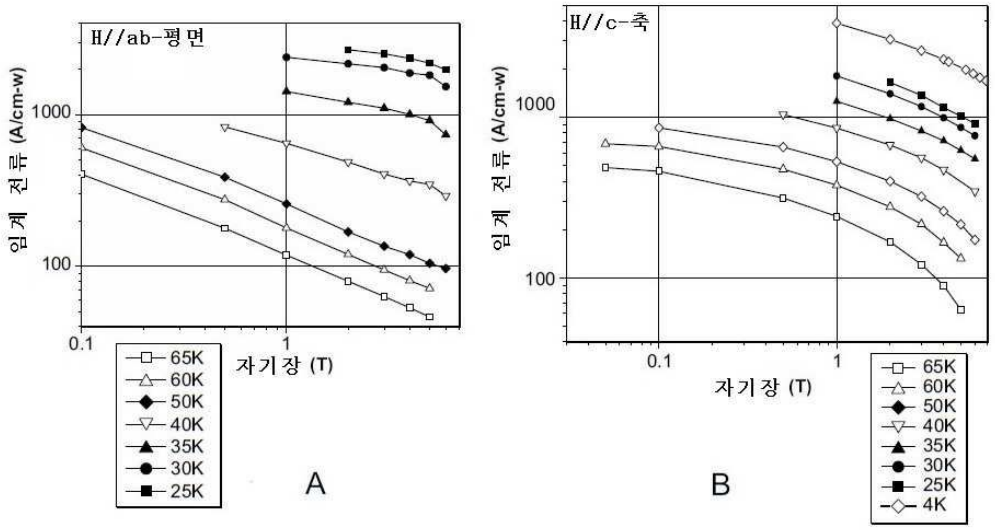
도면16


400
350
300
250
200
150
100
50
0
0
20
40
60
80
임계 전류 (A/cm/w)
위치(미터)
77K에서의 임계 전류, 자체-자기장
조사 전
조사 후

도면17


1000
100
1
2
3
4
5
6
임계 전류 (A/cm-w)
자기장 (T)
6x10^11
미조사
27K
H//c-축

도면18


H//ab-평면
임계 전류 (A/cm-w)
1000
100
0.1
1
자기장 (T)
65K
60K
50K
40K
35K
30K
25K
A
H//c-축
임계 전류 (A/cm-w)
1000
100
0.1
1
자기장 (T)
65K
60K
50K
40K
35K
30K
25K
4K
B