



(19) 대한민국특허청(KR)  
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2024년07월12일  
(11) 등록번호 10-2683995  
(24) 등록일자 2024년07월08일

- (51) 국제특허분류(Int. Cl.)  
H10N 60/01 (2023.01) H10N 60/20 (2023.01)  
H10N 60/85 (2023.01)
- (52) CPC특허분류  
H10N 60/0801 (2024.05)  
H01B 12/08 (2013.01)
- (21) 출원번호 10-2018-7023758
- (22) 출원일자(국제) 2017년01월20일  
심사청구일자 2022년01월04일
- (85) 번역문제출일자 2018년08월17일
- (65) 공개번호 10-2018-0105181
- (43) 공개일자 2018년09월27일
- (86) 국제출원번호 PCT/US2017/014242
- (87) 국제공개번호 WO 2017/151233  
국제공개일자 2017년09월08일
- (30) 우선권주장  
62/281,264 2016년01월21일 미국(US)
- (56) 선행기술조사문헌  
KR1020020040758 A\*  
KR1020080066655 A\*  
KR1020140067495 A\*  
\*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

- (73) 특허권자  
브룩해븐 테크놀로지 그룹, 인크.  
미국 뉴욕 11794 스톤리 브룩 1000 이노베이션 로  
드 어드밴스드 에너지 센터
- (72) 발명자  
솔로비요프 바체슬라프  
미국 뉴욕 11778 로키 포인트 48 노스 서퍽 드라이브
- (74) 대리인  
권영준

전체 청구항 수 : 총 14 항

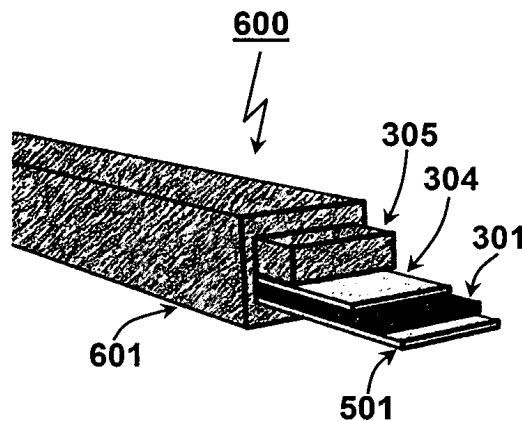
심사관 : 박세웅

(54) 발명의 명칭 제2세대 초전도성 필라멘트와 케이블

(57) 요약

본 발명은 고온 초전도성 필라멘트와 케이블, 그리고 그것들의 제조 방법에 관한 것이다. 초전도성 층을 성장시키기 위해 사용된 기판이 제거되고, 박리된 초전도성 층이 보호층으로 코팅된 다음, 좁은 스트립들로 얇게 잘린다. 그 후 스트립들은 전도성 금속으로 캡슐 모양으로 감싸져 고온 초전도성 필라멘트를 제공한다. 이러한 필라멘트는 고온 초전도성 케이블을 제공하기 위해 함께 다발로 묶일 수 있다.

대표도 - 도6



(52) CPC특허분류

*H10N 60/203* (2023.02)

*H10N 60/857* (2023.02)

---

**명세서**

**청구범위**

**청구항 1**

제2세대 와이어로부터 멀티플라이(multi-ply) 고온 초전도성 와이어를 제조하는 방법으로서,  
 상기 제2세대 와이어는 금속 기관에 위치한 초전도성 층을 포함하고, 상기 제2세대 와이어는 상기 초전도성 층과 상기 금속 기관 사이에 위치한 버퍼층을 추가로 포함하고,  
 상기 방법은,

- a) 박리된 초전도성 테이프를 제공하기 위해 상기 금속 기관 및 상기 버퍼층으로부터 상기 초전도성 층을 분리하는 단계(상기 박리된 초전도성 테이프는 버퍼층과 금속 기관이 없을 때 초전도성 층을 포함함);
- b) 상기 박리된 초전도성 테이프의 가닥(length)들을 쌓아서 그러한 가닥들이 서로 인접하도록 하는 단계; 및
- c) 상기 멀티플라이(multi-ply) 고온 초전도성 와이어를 제공하기 위하여, 상기 금속 기관 및 상기 버퍼층 중 어느 것도 없는 쌓아진 상기 박리된 초전도성 테이프를 좁은 스트립(strip)들로 레이저로 얇게 잘라내는 단계(상기 멀티플라이(multi-ply) 고온 초전도성 와이어는 다수의 초전도성 층을 구비함)를 포함하는, 제조 방법.

**청구항 2**

제1 항에 있어서,  
 상기 스트립들을 캡슐 모양으로 감싸는 단계를 더 포함하는, 제조 방법.

**청구항 3**

제2 항에 있어서,  
 상기 캡슐 모양으로 감싸는 단계는 전기 전도성 재료로 상기 스트립들을 캡슐 모양으로 감싸는 단계를 포함하는, 제조 방법.

**청구항 4**

제2 항에 있어서,  
 상기 캡슐 모양으로 감싸는 단계는 상기 스트립들 근처의 금속 안정화기를 납땜하는 단계를 포함하는, 제조 방법.

**청구항 5**

제2 항에 있어서,  
 상기 캡슐 모양으로 감싸는 단계는 상기 스트립들 근처의 전도성 금속을 갈바니 전기에 의해(galvanically) 전기도금하는 단계를 포함하는, 제조 방법.

**청구항 6**

삭제

**청구항 7**

삭제

**청구항 8**

제1 항에 있어서,  
 인접한 스트립들 사이에 금속 안정화기 층(metal stabilizer layer)을 위치시키는 단계를 더 포함하는, 제조 방

법.

**청구항 9**

삭제

**청구항 10**

삭제

**청구항 11**

제1 항에 있어서,

상기 분리하는 단계는 유도 코일로 상기 기관을 빠르게 가열하는 단계를 포함하는, 제조 방법.

**청구항 12**

제1 항에 있어서,

상기 분리하는 단계는 상기 제2세대 와이어를 변형시키는 단계를 포함하는, 제조 방법.

**청구항 13**

삭제

**청구항 14**

삭제

**청구항 15**

제1 항에 있어서,

상기 얇게 잘라내는 단계 전에 보호층으로 상기 박리된 초전도성 테이프의 상기 초전도성 층을 코팅하는 단계를 더 포함하고,

상기 보호층은 은(silver)이고, 상기 보호층은 마그네트론 스퍼터링(magnetron sputtering)에 의해 증착되는, 제조 방법.

**청구항 16**

제1 항에 있어서,

복수의 상기 멀티플라이(multi-ply) 고온 초전도성 와이어를 묶음으로 묶는 단계(bundling)를 더 포함하는, 제조 방법.

**청구항 17**

삭제

**청구항 18**

제16 항에 있어서,

상기 멀티플라이(multi-ply) 고온 초전도성 와이어를 비트는 단계를 더 포함하는, 제조 방법.

**청구항 19**

삭제

**청구항 20**

멀티플라이(multi-ply) 고온 초전도성 와이어로서,

박리된 고온 초전도성 스트립들의 스택(stack)을 포함하되,

상기 스트립들 각각은, 실질적으로 그 각각의 표면을 덮는 보호 코팅을 가지고 금속 기판 및 버퍼층 중 어느 것도 없는 초전도성 층과, 그것에 부착되는 적어도 하나의 금속 안정화 층(metallic stabilizing layer)을 포함하고,

상기 초전도성 층 각각의 양쪽 표면은 이에 인접한 상기 층들과 실질적으로 같은 전기 도통 상태에 있으며,

상기 멀티플라이(multi-ply) 고온 초전도성 와이어는, 상기 금속 기판 및 상기 버퍼층 중 어느 것도 없는 상기 박리된 고온 초전도성 스트립들의 스택(stack)을 좁은 스트립(strip)들로 레이저로 얇게 잘라냄으로써 제공되고, 상기 멀티플라이(multi-ply) 고온 초전도성 와이어는 다수의 초전도성 층을 구비하는, 와이어.

**청구항 21**

제20 항에 있어서,

상기 스택된(쌓아진) 스트립들은 강자성 재료 또는 강자성 층이 없을 때 전기 전도성 재료로 캡슐 모양으로 감싸지는, 와이어.

**청구항 22**

삭제

**청구항 23**

삭제

**청구항 24**

삭제

**청구항 25**

삭제

**청구항 26**

제20 항에 있어서,

인접한 스트립들 사이에 위치한 금속 안정화기 층(metal stabilizer layer)을 더 포함하는, 와이어.

**청구항 27**

삭제

**청구항 28**

삭제

**청구항 29**

삭제

**청구항 30**

삭제

**청구항 31**

삭제

**청구항 32**

삭제

청구항 33

삭제

청구항 34

삭제

청구항 35

삭제

청구항 36

삭제

청구항 37

삭제

청구항 38

삭제

청구항 39

삭제

청구항 40

삭제

**발명의 설명**

**기술 분야**

[0001] 본 발명은 고온 초전도성 이트륨-바륨-구리-산화물 필라멘트와 케이블에 관한 것이고, 에피택셜(epitaxial) 기판으로부터 초전도성 층의 박리를 거쳐 고온 초전도성 이트륨-바륨-구리-산화물 필라멘트와 케이블을 제조하기 위한 공정(process)에 관한 것이다.

**배경 기술**

[0002] 1995년에 2G 와이어의 제1 금속이 제조된 이래로 제2세대(2G)  $YBa_2Cu_3O_7$ (YBCO) 와이어 기술의 출현이 인상적인 기술 진보를 야기하였다. 고장 전류 리미터(fault current limiter), 트랜스포머(transformer), 및 윈드 터빈(wind turbine)과 같은 기존의 그리고 최근 만들어진 어플리케이션에 의해 그러한 분야에서의 추가 발전이 구동되어 왔다. 제2세대 초전도성(2G) 와이어는 높은 상부(upper) 임계장과 임계 온도를 기록하여, 비싸지 않은 일 단(single-stage) 사이로쿨러(cryocooler)들로 냉각될 수 있는 고온 초전도성 자석의 설계를 잠재적으로 가능하게 한다. 코어(core) 2G 와이어 기술은 50 내지 100미크론 두께를 갖는 금속 기판 상에 증착된(deposited) 얇은(2 미크론 미만) YBCO 층으로서 설명될 수 있다. 도 1은 이후 테이프(100)라고 부르는 상업적으로 이용 가능한 RABiTS-계(based) 2G 와이어(암페리움 와이어(Amperium wire)라고 시장에서 거래되는 AMSC사의 제품)의 구성을 보여준다. 테이프(100)는 대략 100미크론 두께의 금속 기판(103)을 포함한다. 기판(103)은 산화물 버퍼(oxide buffer)(102)로 코팅되고, 이러한 산화물 버퍼는 예를 들면 산화 이트륨, 산화 이트륨-지르코늄, 및 산화 세륨과 같은 다양한 산화물의 층들의 연속된 것으로부터 형성된다. 산화물 버퍼(102)는 보통 반응성(reactive) 스퍼터링 또는 전자빔 증발과 같은 진공 증착법에 의해 증착된다. 본 명세서에서 초전도성 층(101)이라고 부르는 이트륨 바륨 구리 산화물 초전도체인  $Y-ReBa_2Cu_3O_{7-x}$ (YBCO)의 층은 산화물 버퍼(102) 상에서 성장한다. 이러한 상업적으로 이용 가능한 제품에서, Re는 Dy, Gd, Nd와 같은 희토류 금속이고, x는 산소 지수이며,  $x < 1$ 이다. 보호 은 층(104)은 마그네트론(magnetron) 스퍼터링에 의해 초전도성 층(101)의 상부에 증착된다. 마지막으로, 테이프(100)는 반대쪽에 있는 상부(top) 금속 포일(foil)과 저부(bottom) 금속 포일을 가지고 땀납-도금(solder-

plate)되어, 안정화 층들(105, 107)을 각각 형성한다. 안정화 층들(105, 107)은 테이프의 나머지 부분보다 1 내지 2mm 더 폭이 넓어서, 2개의 안정화기 포일을 연결하기 위해서 한 쌍의 반대쪽에 있는 땀납 필릿(solder fillet)(106)이 형성된다.

[0003] 도 1에 도시된 와이어와 같이, 상업적으로 이용 가능한 2G 와이어는 4 내지 12mm 크기를 갖는 넓은 사이드(wide side)를 갖는 높은 종횡비와 100 내지 150미크론의 크기를 갖는 두께를 가지고 자주 전달되는데 반해, 초전도성 층(101)의 두께는 1 내지 2미크론의 크기를 가진다. 알려진 상업적으로 이용 가능한 와이어들과 연관된 체계는 다수의 문제를 보여주는데, 특히 이러한 체계가 자석 응용예에서 사용될 때 그러하다. 즉,

[0004] i) 높은 종횡비(≈ 1:1000)는 자화(AC) 손실에 기여하고, 이러한 자화 손실은 와이어의 J/m의 10's만큼 클 수 있다. 이는 낮은 필드의 77K 장치들까지 와이어의 상업적 응용을 제한한다.

[0005] ii) 초전도성 층(101)의 상면만이 테이프(100)의 외면까지 양호한 전기적 통로를 가지기 때문에 초전도성 층(101)은 불충분하게 안정화된다. 이에 반해, 초전도성 층(101)의 저면(bottom surface)은 절연 산화물 버퍼(102)와 접촉한다. 그 결과, 기관에 인접한 안정화 층, 즉 안정화 층(107)은 상부 안정화 층(105)에 의해 겪는 것보다 실질적으로 적은 전류 흐름을 겪는다. 도체 체계의 이러한 비대칭적 성질은 퀘칭(quench) 동안의 균일하지 않은 도체 가열에 기여하고, 이는 초전도성 층의 층간 박리(delamination)과 이어지는 고장(failure)을 야기하는 것으로 알려져 있다.

[0006] iii) 테이프(100)는 매우 이방성인 기계적 특성을 보여준다. 상업적으로 이용 가능한 2G 와이어는 테이프를 따른 방향에서는 대단히 강하고, 인장 축 항복 강도(tensile axial yield strength)는 대략 500 내지 600MPa이다. 하지만, c축 풀(pull)(휨) 강도는 대략 10배 더 낮고, 쪼갬(cleavage) 강도는 거의 무시할 수 있다(<1MPa). 이는 적어도 부분적으로는 초전도성 층(101)과 산화물 버퍼(102) 사이의 빈약한 접착에 기인한다. 심지어 매우 적당한 스트레스(<10MPa) 하에서도 산화물 버퍼로부터의 초전도성 층의 예측할 수 없는 분리는 몇몇 자석 고장의 원인으로 인지도어 왔다.

[0007] iv) 도 1에서 도시된 것과 같은 2G 테이프는 팬케이크(pancake) 타입의 권선(winding)들만을 허용한다. 팬케이크들로부터 솔레노이드 자석을 조립하는 것은 대각선 스플라이스(splice)들을 거쳐 개별 팬케이크들을 노동 집약적으로 스플라이스하는 것을 요구한다.

[0008] v) 2G 테이프의 체계는 멀티-스트랜드(multi-strand) 케이블의 간단한 스플라이싱을 허용하지 않는다. YBCO 층(101)과 상부 안정화기 층(105) 사이의 접촉면은 보통 50nΩ/cm<sup>2</sup> 미만인 저항을 가진다. 하지만, YBCO 층(101)과 저부 안정화기(107) 사이의 저항은 100μΩ/cm<sup>2</sup> 크기를 가진다. 그러므로 멀티-스트랜드 케이블의 제조는 상부 안정화기 표면들만이 서로 접촉하는 것을 보장하는 정성을 들여 행하는 스플라이싱 절차(procedure)를 요구한다.

[0009] 2G 와이어 자석의 현재 설계는 편평한 "팬케이크" 스택(stack)으로서 설명될 수 있다. 도 2는 간단한 솔레노이드(200)의 전형적인 설계를 보여준다. 스택의 각각의 팬케이크는 축(T) 주위로 테이프(100)와 같은 2G 테이프를 휘감는 것으로부터 형성된다. 테이프(100)는 안정화 층들(105, 107)이 도 2에서 볼 때 스택의 내부 방사상 면과 외부 방사상 면을 형성하도록 배향된다. 예를 들면, 방사상 면(206)은 테이프(100)의 가닥(length)의 안정화 층(105)에 의해 또는 안정화 층(107)에 의해 형성된다. 개별적으로 형성된 팬케이크는 이후 함께 스플라이스되어(대각선 스플라이싱을 통해), 전체 솔레노이드를 통한 전기 전도도를 제공한다. 솔레노이드(200)에 의해 발생된 자기장은 2개의 성분으로 되어 있는데, 하나는 팬케이크 스택의 높이(h)에 평행한 것, 즉 성분(201)이고, 하나는 팬케이크 스택의 높이(h)에 수직인 것, 즉 성분(202)이다. 이러한 설계에서, 외부 팬케이크(203, 205)는 예컨대 팬케이크(204)와 같은 내부 팬케이크보다 큰 정상(normal) 자기장 성분을 겪게 되고, 따라서 가장 높은 AC 손실을 발생시킨다. 잃어버린 에너지는 권선에서 열로서 소비된다. 대부분의 재료들의 열 전도율 계수와 일정한 열이 극저온 온도에서 매우 낮아지기 때문에(포논 프리즈 아웃(phonon freeze-out)), 심지어 상대적으로 작은 양의 열이 상당한 온도 상승을 야기할 수 있다. 자석의 매우 느린(수 시간) 램프(ramp) 동안에, 팬케이크(203, 205)의 온도는 초전도체의 임계 온도에 걸쳐 상승할 수 있어서, 자석의 고장을 야기한다. 그러므로 자석의 램핑 레이트(ramping rate)는 종종 외부 팬케이크들의 과열에 의해 제한된다. 많은 응용예에서, 램핑 레이트가 안전하게 증가될 수 있도록 램핑 손실을 최소화하는 것이 바람직하다.

**발명의 내용**

**해결하려는 과제**

[0010] 그러므로 예를 들면 신중한 팬케이크들과 대각선 스플라이싱을 이용할 필요성 없이, 그리고 증대된 기계적 특성을 가지고, 초전도성 층의 층간 박리의 감소된/제거된 위험을 가지고 초전도성 자석을 제조하기 위해 사용될 수 있는 고온 초전도성 필라멘트에 관한 필요성이 관련 분야에 존재한다. 자화 손실이 감소된 파워(power) 전달을 위해 사용될 수 있는 고온 초전도성 케이블에 관한 필요성이 관련 분야에 또한 존재한다. 또한, 자화 손실을 감소한 것을 나타내는 초전도성 재료들을 이용하는 고장 전류 리미터에 관한 필요성이 또한 관련 분야에 존재한다. 마지막으로, 더 균일한 전기적 특성을 나타내고, 증대된 기계적 특성을 나타내며, 즉시 함께 스플라이스될 수 있는, 초전도성 층의 층간 박리의 위험이 감소/제거된 고온 초전도성 필라멘트와 케이블을 제조하는 방법에 관한 필요성이 관련 분야에 존재한다.

**과제의 해결 수단**

[0011] 관련 분야의 필요성을 다루는 본 발명은 2G 와이어로부터 고온 초전도성 필라멘트를 제조하는 방법에 관한 것이다. 2G 와이어는 금속 기관상에 위치한 초전도성 층을 포함한다. 이러한 방법은 금속 기관으로부터 초전도성 층을 분리하여, 박리된 초전도성 테이프를 제공하는 단계를 포함한다. 박리된 초전도성 테이프는 이후 좁은 스트립들로 얇게 잘라진다. 그 후 좁은 스트립들은 캡슐 모양으로 감싸져서 고온 초전도성 필라멘트를 제공한다. 바람직한 일 실시예에서, 박리된 초전도성 테이프는 좁은 스트립들로 테이프를 얇게 잘라내기 전에 보호층으로 코팅된다. 또 다른 바람직한 실시예에서는, 좁은 스트립들이 예컨대 (i) 근처에서의 금속 안정화기의 납땜 또는 (ii) 근처에서 전도성 금속(예컨대, 구리)을 갈바니 전기에 의해 전기 도금하는 것을 통해 전기적으로 전도성인 재료로 캡슐 모양으로 감싸진다. 또 다른 실시예에서는, 좁은 스트립들로 테이프를 잘라내기 전에 박리된 초전도성 테이프의 가닥들이 쌓이고, 그로 인해 다수의 도체를 포함하는 멀티-플라이(multi-ply) 스트립을 제공한다. 금속 안정화기 층은 쌓인 박리된 초전도성 테이프의 인접한 가닥들 사이에 있을 수 있다. 바람직한 일 실시예에서, 개별 필라멘트들은 연속된 필라멘트의 연장된 가닥을 제공하기 위해 함께 스플라이스된다. 특정 실시예에서는, 초전도성 필라멘트의 길이가 100미터보다 크고 그 폭은 1 내지 2mm이다. 또 다른 실시예에서는, 유도성 코일로 기관을 급속히 가열함으로써 박리가 이루어진다. 또 다른 실시예에서는, 박리 전에 테이프를 변형함으로써 박리가 이루어진다. 또 다른 실시예에서는, 에너지가 주어진(energetic) 이온들로 테이프를 조사함으로써 박리가 이루어진다.

[0012] 본 발명은 또한 2G 와이어로부터 일정 길이를 갖는 고온 초전도성 케이블을 제조하는 방법에 관한 것이다. 2G 와이어는 금속 기관상에 있는 초전도성 층을 포함한다. 이러한 방법은 금속 기관으로부터 초전도성 층을 분리하여, 박리된 초전도성 테이프를 제공하는 단계를 포함한다. 박리된 초전도성 테이프는 이후 좁은 스트립들로 얇게 잘려진다. 좁은 스트립들은 캡슐 모양으로 감싸져서 고온 초전도성 필라멘트를 제공한다. 바람직한 일 실시예에서, 박리된 초전도성 테이프는 좁은 스트립들로 테이프를 얇게 잘라내기 전에 보호층으로 코팅된다. 또 다른 바람직한 실시예에서는, 좁은 스트립들이 예컨대 (i) 근처에서의 금속 안정화기의 납땜 또는 (ii) 근처에서 전도성 금속(예컨대, 구리)을 갈바니 전기에 의해 전기 도금하는 것을 통해 전기적으로 전도성인 재료로 캡슐 모양으로 감싸진다. 또 다른 실시예에서는, 좁은 스트립들로 테이프를 얇게 잘라내기 전에 박리된 초전도성 테이프의 가닥들이 쌓이고, 그로 인해 다수의 도체를 포함하는 멀티-플라이 스트립을 제공한다. 금속 안정화기 층은 쌓인 박리된 초전도성 테이프의 인접한 가닥들 사이에 있을 수 있다. 그 후 고온 초전도성 필라멘트가 초전도성 케이블의 다발로 묶어진다. 바람직한 일 실시예에서, 개별 필라멘트는 연속된 필라멘트의 연장된 가닥을 제공하기 위해 함께 스플라이스된다. 또 다른 바람직한 실시예에서는, 필라멘트를 보호하고 추가적인 퀘칭(quench) 안정성을 제공하기 위해 초전도성 케이블이 전도성 금속으로 둘러싸인다. 특정 실시예에서는, 초전도성 케이블의 길이가 100미터보다 크고 그 폭은 1 내지 2mm이다. 또 다른 실시예에서는, 케이블의 자화 손실을 감소시키기 위해 필라멘트들이 비틀린다. 또 다른 실시예에서는, 필라멘트의 개수가 1과 100 사이에 있다. 또 다른 실시예에서는, 유도성 코일로 기관을 급속히 가열함으로써 박리가 이루어진다. 또 다른 실시예에서는, 박리 전에 테이프를 변형함으로써 박리가 이루어진다. 또 다른 실시예에서는, 에너지가 주어진 이온들로 테이프를 조사함으로써 박리가 이루어진다. 또 다른 실시예에서는, 케이블의 전기적 손실을 감소시키기 위해 필라멘트의 위치가 바뀌어 놓여진다.

[0013] 본 발명은 또한 고온 초전도성 필라멘트에 관한 것이다. 이러한 필라멘트는 실질적으로 그것의 각 표면을 덮는 보호 코팅을 가지는 초전도성 층을 포함한다. 필라멘트에는 또한, 적어도 하나의 금속 안정화 층이 부착되어 있다. 그러한 필라멘트는 전기 전도성 재료 내에서 캡슐 모양으로 감싸여 있다. 마지막으로, 그러한 필라멘트는 버퍼 층이 없을 때와 초전도체 기관이 없을 때 캡슐 모양으로 감싸짐으로써, 초전도성 층의 양쪽 표면이 초전도체를 에워싸는 전도성 재료와 실질적으로 같은 전기 전도 상태에 있다. 바람직한 일 실시예에서는, 필라멘트는 강자성 재료 또는 층이 없을 때 캡슐 모양으로 감싸진다. 또 다른 바람직한 실시예에서는, 전기 전도성 재료가

그것의 외면 주위에 남뿔된 금속 안정화기이다. 또 다른 바람직한 실시예에서는, 전기 전도성 재료가 그것의 외면 주위에 갈바니 전기에 의해 전기 도금된 도전성 금속이다. 또 다른 실시예에서는, 필라멘트가 다수의 쌓인 초전도체를 포함한다. 또 다른 실시예에서는, 필라멘트가 인접한 적층체 사이에 있는 금속 안정화기 층을 가지는 다수의 쌓인 초전도체를 포함한다. 특정 실시예에서는, 초전도성 필라멘트의 길이가 100미터보다 크고 그 폭은 1 내지 2mm이다.

[0014] 본 발명은 또한 고온 초전도성 케이블에 관한 것이다. 이러한 케이블은 복수의 비틀린 필라멘트를 포함한다. 이러한 필라멘트 각각은 그것의 각 표면을 실질적으로 덮는 보호 코팅을 가지는 초전도성 층을 포함한다. 그러한 필라멘트에는 적어도 하나의 금속 안정화 층이 부착되어 있다. 그러한 필라멘트는 전기 전도성 재료 내에서 캡슐 모양으로 감싸여 있다. 마지막으로, 그러한 필라멘트는 비퍼 층이 없을 때 그리고 초전도체 기관 층이 없을 때 캡슐 모양으로 감싸져서, 그러한 초전도성 층의 양쪽 표면이 초전도체를 에워싸는 전기적으로 전도성인 재료와 실질적으로 같은 전기 전도 상태에 있다. 바람직한 일 실시예에서, 필라멘트는 강자성 재료 또는 층이 없을 때 캡슐 모양으로 감싸진다. 또 다른 바람직한 실시예에서는, 전기 전도성 재료가 그것의 외면 주위에 남뿔된 금속 안정화기이다. 또 다른 바람직한 실시예에서는, 전기 전도성 재료가 그것의 외면 주위에 갈바니 전기에 의해 전기 도금된 도전성 금속이다. 또 다른 실시예에서는, 필라멘트가 다수의 쌓인 초전도체를 포함한다. 또 다른 실시예에서는, 필라멘트가 인접한 적층체 사이에 있는 금속 안정화기 층을 가지는 다수의 쌓인 초전도체를 포함한다. 바람직한 일 실시예에서는, 케이블이 그것 주위에 둘러싸진 보호 금속성 테이프를 더 포함한다. 특정 실시예에서는, 초전도성 필라멘트의 길이가 100미터보다 크고 그 폭은 1 내지 2mm이다. 또 다른 실시예에서는, 케이블의 자화 손실을 감소시키기 위해 필라멘트가 비틀려진다. 또 다른 실시예에서는, 필라멘트의 개수가 1과 100 사이에 있다. 또 다른 실시예에서는, 케이블의 전기적 손실을 감소시키기 위해 필라멘트의 위치가 바뀌어 놓여 진다.

[0015] 본 발명의 추가 특징, 장점, 및 실시예는 이어지는 상세한 설명, 도면, 및 청구항을 고려함으로써 설명이 시작될 수 있다. 또한, 본 개시물의 전술한 개요 및 이어지는 상세한 설명 모두 본보기적인 것이고, 주장된 본 개시물의 범주를 제한하지 않으면서 추가 설명을 제공하기 위해 의도된 것이라는 점이 이해되어야 한다.

**도면의 간단한 설명**

- [0016] 도 1은 상업적으로 이용 가능한 2G 와이어에서의 에피택셜 층들의 예시 도면.
- 도 2는 쌓인 팬케이크 코일들로 형성된 전형적인 초전도성 솔레노이드의 단면도.
- 도 3은 저면 안정화 층이 없는 2G 와이어의 예시 도면.
- 도 4는 박리 공정 동안의 도 3의 2G 와이어를 보여주는 예시 도면.
- 도 5는 기관의 박리 후, 그리고 보호 은층의 증착 후의 도 4의 와이어를 보여주는 도면.
- 도 6은 안정화 층으로 캡슐 모양으로 감싸진 후 도 5의 와이어를 보여주는 도면.
- 도 7은 본 발명에 따라 형성된 비틀린 필라멘트들로 형성된 케이블을 보여주는 도면.
- 도 8은 중간 안정화기와 도 5의 와이어로부터 형성된 2개의 플라이(ply) 타입의 테이프를 보여주는 도면.
- 도 9a는 77K에서 1.5mm의 폭을 갖는 1개의 플라이 와이어 쿠폰(coupon)(1개의 필라멘트)과 1.5mm의 폭을 갖는 2개의 플라이 와이어 쿠폰(2개의 필라멘트)의 임계 전류의 도식적 표현.
- 도 9b는 77K에서 1mm의 폭과 2mm의 폭을 갖는 와이어의 임계 전류 밀도의 도식적 표현.
- 도 9c는 와이어 폭의 함수로서 각각 1mm의 폭, 2mm의 폭, 및 2.5mm의 폭을 갖는 와이어 쿠폰들의 임계 전류들의 도식적 표현으로서, 점선이 최초 와이어의 임계 전류를 나타내는 도면.
- 도 10은 3mm의 폭을 갖는 필라멘트와, 함께 잘려지고 스프라이스된 후의 동일한 3mm의 폭을 갖는 필라멘트의 전류-전압 곡선의 도식적 표현으로서, 점선이 200nΩ/cm<sup>2</sup> 근사치(approximation)를 나타내는 도면.
- 도 11은 4.2K에서, 필드가 최대 5.3T인 1mm의 폭을 갖는 와이어 쿠폰의 전류-전압 곡선의 도식적 표현.
- 도 12는 4.2K에서 인가된 자기장의 함수로서 1mm의 폭을 갖는 쿠폰의 임계 전류 밀도의 도식적 표현으로서, 상기 자기장은 와이어 쿠폰의 넓은 측(side)에 수직인, 도면.

**발명을 실시하기 위한 구체적인 내용**

- [0017] 제2세대(2G) 테이프, 즉 테이프(300)는 도 3에 도시되어 있다. 테이프(300)는 바람직하게는 100 내지 1000미터의 길이와 1 내지 100mm의 폭의 크기를 바람직하게 가진다. 테이프(300)는 금속 기관(303), 버퍼 층(302), 및 초전도성 층(301), 은 보호 코팅(304), 및 안정화 금속 층(305)을 가진다. 안정화 층(305)은 구리, 스테인리스강, 청동 또는 또 다른 전도성 금속으로 만들어진다. 바람직한 일 실시예에서, 테이프는 외부 작용을 받는데, 이는 초전도성 층(301)과 버퍼 층(302) 사이의 응력(stress) 레벨을 증가시킨다. 이러한 외부 작용은 예를 들면 유도성 코일 또는 적외 복사선과 같은 외부 소스에 의한 급속 가열에 의해 이루어질 수 있다. 이러한 외부 작용은 또한 굽힘(bending)과 같은 테이프의 기계적 변형에 의해 이루어질 수 있다. 이러한 응력 레벨은 박리라고 부르는 공정에서 초전도성 층(301)을 손상시키지 않고, 초전도성 층(301)으로부터 기관(303)과 버퍼 층(302)이 기계적으로 분리될 수 있는 레벨까지 바람직하게 끌어 올려진다. 도 4는 기관(303)과 버퍼 층(302)이 테이프의 나머지에서부터 분리되는 박리 공정을 예시한다. 박리 후, 노출된 YBCO 표면은 바람직하게는 도 5에 도시된 것처럼, 은 층(501)과 같은 보호 층으로 코팅된다. 보호층이 인가된 후, 테이프는 예를 들면 레이저(laser) 커팅에 의해 좁은 스트립으로 얇게 잘라진 다음, 그러한 좁은 스트립은 예를 들면 필라멘트를 제공하기 위해 구리와 같은 전도성 금속으로 도금함으로써 캡슐 모양으로 감싸진다. 도 6은 안정화 구리 층(601)으로 도 5의 좁은 스트립을 캡슐 모양으로 감싸는 것으로부터 형성된 필라멘트(600)를 예시한다. 고온 초전도성 필라멘트는 초전도성 케이블을 형성하기 위해 다발로 묶어질 수 있다.
- [0018] 기관(303)은 버퍼 층(302)과 초전도성 층(301)에 의해 물려받은 조직(texture)을 포함할 수 있다. 이러한 조직은 결정면 정렬을 포함하는, 초전도성 층(301)의 미세구조를 묘사한다. 정렬된 초전도성 층(301)은 다결정(조직화되지 않은) 초전도체보다 훨씬 더 높은 임계 전류 밀도를 가진다. 조직화된(textured) 기관은 휘기 쉬운 금속 막이거나 전술한 다른 층들 중 하나일 수 있다.
- [0019] 기관은 다양한 공정으로 만들어질 수 있다. 일 실시예에서, 기관은 소위 RABiTS(rolling-assisted biaxially textured substrate) 공정에 의해 제작된다. RABiTS 코팅된 전도체 기관은 조직화된 Ni 또는 산화물 버퍼로 코팅된 다른 Ni-합금 금속 테이프로 이루어진다.
- [0020] 또 다른 실시예에서, 기관은 IBAD(ion-beam assisted deposition)라고 알려진 공정에 의해 만들어질 수 있다. IBAD 코팅된 도체는 조직화되지 않은 금속 막 기관, 산화물 버퍼층들이 연속된 것, 초전도체 층, 및 금속 안정화기 층으로 이루어진다.
- [0021] 비슷한 테이프들을 구성하기 위해 다른 방법 또는 재료가 사용될 수 있고, 그것들은 본 발명에 따라 사용될 수 있다는 점이 이해된다.
- [0022] YBCO 또는 Bi계 HTS 재료로 형성된 초전도성 층은 임의의 알려진 공정에 의해 증착될 수 있다. 일 실시예에 따르면, 초전도성 층은 펄스 레이저 증착에 의해 증착될 수 있다. 또 다른 실시예에 따르면, 초전도성 층은 MOCVD(metal-organic chemical vapor deposition)에 의해 증착될 수 있다. 또 다른 실시예에서는, 초전도성 층이 MOD(metal-organic deposition)에 의해 증착된다. 초전도성 층은 임의의 두께를 가질 수 있지만, 보통 10미크론 미만의 두께를 가진다.
- [0023] 초전도체 층을 보호하고, 만약 초전도체가 과열 또는 자연스럽게 생기는 초전도성의 손실로 인해 국부적으로 저항력이 있게 되면 전류를 위한 통로를 제공할 목적으로 초전도성 테이프의 초전도체 층 위에 보호 금속(501) 층이 증착될 수 있다. 저항이 있는 상태에서의 초전도성 층은  $300 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ 의 구체적인 전기 저항을 가진다. 만약 초전도성 층의 저항성 부분을 통해 전류가 흐르는 것이 허용된다면, 열 소비가 도체의 재해적 파괴를 가장 잘 초래할 것이다. 구리 또는 은은 대략  $2 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ 의 구체적인 전기 저항을 가지고, 이는 초전도체의 저항성 부분으로부터의 멀어지게 전류를 안전하게 단 곳으로 돌리는 것을 허용한다. 보호 금속 층은 임의의 알맞은 금속 합금일 수 있다. 일 실시예에 따르면, 보호 금속 층은 마그네트론 스퍼터링에 의해 적층된 은층이다.
- [0024] 안정화기 층은 보호 금속 층 위에 증착될 수 있다. 일 실시예에서, 안정화기 층은 저온 땀납에 의해 은 코팅에 고리 포일(foil)로 납땀이 이루어질 수 있다. 포일 두께는 바람직하게는 25미크론보다 크다. 또 다른 실시예에서는, 안정화기가 전기 도금에 의해 증착된다. 도 6은 전기 도금에 의해 증착된 안정화기 층(601)에 의해 감싸진 YBCO 스트립을 보여준다.
- [0025] 초전도성 층은 임의의 적절한 초전도체에 의해 형성될 수 있다. 일 실시예에 따르면, 초전도체 층은 희토류 금속-알칼리 토금속-전이 금속-산화물 초전도체일 수 있다.

- [0026] 일 실시예에서, 본 발명의 감싸진 필라멘트는 복합 케이블을 형성하기 위해, 구리와 같은 전도성 금속의 스트립들로 함께 다발로 묶인다. 그러한 케이블의 일 예가 도 7에 케이블(700)이다. 케이블(700)은 필라멘트(600)를 묶음(701)으로 비틀고, 그 다음 보호 금속성 테이프(702)로 묶음(701)을 둘러싸으로써 형성된다.
- [0027] 또 다른 실시예에서는, 안정화 구리층이 전기화학적 공정(galvanic process)에 의해 좁은 스트립 상에 증착된다. 그러한 금속층은 좁은 스트립이 기본 또는 산성(acidic) 구리 용액으로 채운 전기 도금조를 통과하게 함으로써 증착된다. 바람직한 일 실시예에서, 증착된 구리 두께는 10미크론보다 크다.
- [0028] 본 발명의 필라멘트/케이블의 증가된 임계 전류 성질은 그러한 필라멘트/케이블을 AC 손실의 감소가 요망되는 높은 전류 밀도를 수반하는 응용예에 특히 알맞게 한다. 그러한 필라멘트/케이블은 빠른 램핑(fast-ramping) 초전도성 자석, 발전기, 및 변압기에서 사용될 수 있다.
- [0029] 일 실시예에서, 본 발명은 초전도성 자석을 제공한다. 이러한 자석은 솔레노이드를 제공하기 위해 미리 선택된 구성으로 감긴 연속된 필라멘트의 연장된 가닥을 포함한다. 당업자라면 연속된 필라멘트의 연장된 가닥이 별개의 팬케이크를 형성할 필요성을 없애고, 그러한 팬케이크를 함께 전기적으로 스플라이스할 필요성을 또한 없앤다는 점을 알게 된다. 필라멘트의 좁은 폭으로 인해, 자석은 비례하여 더 낮은 자화 손실을 가지고, 그로 인해 자석의 충전 및 방전 동안에 액체 헬륨과 같은 냉각제의 손실 감소를 초래한다.
- [0030] 또 다른 실시예에서는, 본 발명은 전기 전송 케이블을 제공한다. 이러한 전송 케이블은 복수의 묶음으로 된 필라멘트를 포함한다. 그러한 필라멘트의 층들은 바람직하게는 모든 강자성 재료를 배제한다. 초전도성 층은 고저항성 금속으로 바람직하게 안정화된다. 당업자라면 필라멘트 내의 임의의 강자성 층들의 제거가 동력(power)을 전송하는 동안에 강자성 층들의 자화와 연관된 손실을 감소시키게 되고, 따라서 효율 증가와 비용 절감을 제공한다는 것을 알게 된다.
- [0031] 또 다른 실시예에서, 본 발명은 전력망(electrical grid)에 관한 고장 전류 리미터(fault current limiter)를 제공한다. 이러한 고장 전류 리미터는 초전도성 층이 높은 저항성을 갖는 금속으로 바람직하게 안정화되는 필라멘트를 포함한다. 이러한 필라멘트는 자화와, 그것과 연관된 손실을 감소시키기 위해 바람직하게 얇게 잘라지고 비틀린다. 그러한 필라멘트는 임의의 강자성 재료를 함유하지 않고, 이는 작동하는 동안 AC 전류에 의한 장치의 자화로 인한 손실을 없앤다.
- [0032] 첨부되는 상세한 설명에서, 그러한 설명의 부분을 형성하는 첨부 도면에 대한 참조가 이루어진다. 상세한 설명, 도면, 및 청구항에서 설명된 예시적인 실시예는 그것에 제한하는 것으로 의도되는 것이 아니다. 다른 실시예가 이용될 수 있고, 본 명세서에서 제공된 주제의 취지 또는 범주로부터 벗어나지 않으면서 다른 변경이 이루어질 수 있다. 일반적으로 본 명세서에서 설명되고 도면에서 예시된 바와 같은 본 발명의 양태들은 매우 다양한 상이한 구성으로 배열, 대체, 결합, 및 설계될 수 있고, 이들 모두는 명백히 예측되며 본 개시물의 부분을 이루고 있다는 점을 바로 이해하게 될 것이다.
- [0033] 예들
- [0034] 예 1
- [0035] AMSC사에 의해 제공된 표준 와이어(8602-FCL)가 박리 실험용으로 사용되었다. 와이어는 2개의 12mm 폭을 가지고 75 $\mu$ m 두께의 316L 스테인리스강 포일 사이에서 납땜된 10mm 폭을 갖는 YBCO-RABiTS 테이프였다. YBCO 층은 테이프의 사이드 필렛(side fillet)들을 기계적으로 트리밍(trimming) 한 후 박리되었다. YBCO 층이 얇은 조각으로 갈라지는 것을 촉진하기 위해, 테이프는 테이프에 결합된 유도성 코일에 의해 금속히 가열되었다. 유도성 코일은 16cm 길이를 가지고 1cm의 폭을 갖는 레이스-트랙(race-track) 모양과 일치되게 하기 위해 8번 감긴 게이지(gauge) 14 리츠선(litz wire)을 포함하였다. 코일은 테이프 바로 밑에 놓였고, 이는 코일에 의해 생성된 AC 필드에 테이프가 양호하게 결합하는 것을 보장하였다. 그러한 코일은 대략 200W의 AC 파워 50kHz를 인가함으로써 1 내지 2초 동안 에너지가 공급되었다. YBCO 층은 기관으로부터 즉시 박리되었다. 대략 10cm 길이를 갖는 테이프의 가닥들이 한 번의 실행(typical run)시마다 박리되었다. 테이프의 이러한 가닥들은 CO<sub>2</sub> 레이저에 의해 1 내지 4mm의 쿠폰들로 얇게 잘렸다. 레이저는 260W의 CO<sub>2</sub> 레이저와 움직이는 테이블을 포함한 Kern Mirco 레이저 시스템이었다. 질소 기체의 흐름에 의해 절단이 도움을 받았다. 레이저는 20%의 파워로 작동하였고, 초당 대략 1인치의 스트립들로 절단될 수 있었다. In95% 내지 Ag5%의 납땜 합금을 사용하여 25미크론 두께의 구리 포일로 박리된 초전도성 테이프의 2개의 가닥을 납땜함으로써 다양한 폭을 갖는 2개의 플라이(ply) 테스트 쿠폰이 마련되었다. 도 8은 2개의 플라이 와이어의 구성을 예시한다. 이 경우 박리된 초전도성 테이프의 2개의 가닥은 보호

은층(501)으로 코팅되고, 중간 구리 안정화기(801)를 통해 접합되며, In-Ag와 같은 저온의 납땜 합금이 접합제로서 사용된다. 추가적인 구리 안정화기는 초전도성 층(301)들이 저항성이 되고 전류가 금속 안정화기로 돌려질 필요가 있는 경우에 전류에 관한 여분의 통로를 제공함으로써 와이어 안정성을 개선한다.

[0036] 예 2

[0037] 예 1에 따라 마련된 와이어 쿠폰들의 운반 임계 전류는 스트립의 폭의 함수로서 77K에서 측정되었다. 그러한 측정시, 스트립들은 저온의 인듐 기반의 납땜을 사용하여 10mm의 폭과 50미크론의 두께를 갖는 구리 전류 리드(lead)들에 납땜되었다. 전압 리드는 저온 납땜에 의해 스트립들에 부착된 25미크론의 두께를 갖는 구리 와이어들이었다. 와이어 쿠폰들은 시험 고정부(test fixture) 상에 장착되었고, 그러한 고정부는 액체 질소 조(bath)에서 담겨졌다. DC 전류가 점진적으로 증가하였고 전압이 전류의 함수로서 기록되었다(I-V 곡선). 도 9a는 77K에서 1.5mm의 폭을 갖는 1개의 플라이 와이어 쿠폰(1개 필라멘트)과 1.5mm의 폭을 갖는 2개의 플라이 와이어 쿠폰(2개 필라멘트)에 관한 임계 전류를 보여준다. 시험 데이터는 2개의 플라이 와이어 쿠폰(2개의 필라멘트)의 전류 용량(current capacity)이 1개의 플라이 와이어 쿠폰(1개 필라멘트)의 전류 용량의 대략 2배임을 보여준다. 도 9b는 77K에서 1mm의 폭을 갖는 쿠폰과 2mm의 폭을 갖는 쿠폰의 I-V 곡선을 보여준다. 실선은 파워 근사치인  $V \sim I^n$ 이고, 여기서 n은 소위 n값 지수이다. 데이터는 박리된 스트립이 최초 값의 n값을 보유하고 있음을 설명하고, 이 경우 n값은 전형적인 샘플의 경우 20보다 크다. 와이어 쿠폰들의 임계 전류 밀도는 도 9c에 요약되어 있고, 이 경우 점선은 최초 와이어의 임계 전류 밀도를 나타낸다. 데이터는 박리된 스트립들로부터 형성된 와이어 쿠폰들이 최하 1mm인 폭을 갖는 스트립들까지 임계 전류를 보유하고 있음을 설명한다.

[0038] 예 3

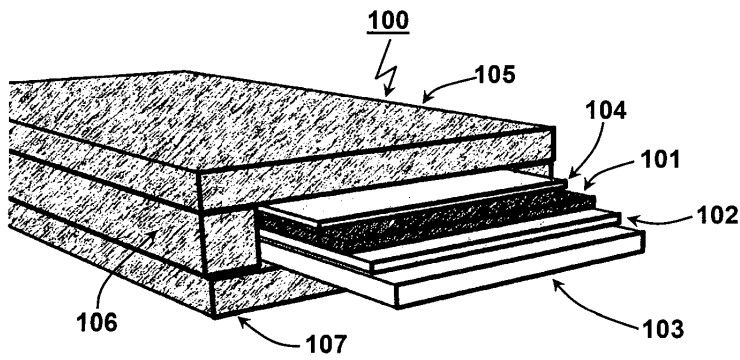
[0039] 만나는(joint) 면적과 저항의 곱으로서 정의된 비저항(specific resistivity)은 도체의 중요한 파라미터이다. 납땜 공정 동안에 만나는 표면들을 누르기 위해, RE123 프리-틴된(pre-tinned) 또는 알루미늄 히터 블록이 있는 SnAg, InSn, SnPb와 같은 2개의 성분으로 된 합금으로 최상의 결과가 이루어짐이 잘 알려져 있다. 일반적으로 77K에서 측정된 비저항은  $30n\Omega/cm^2$ 보다 크고  $500n\Omega/cm^2$ 보다 작은 범위를 가진다. 박리된 YBCO 표면의 표면 저항을 결정하기 위해, 인듐을 사용하여 면대면으로(face to face)으로 필라멘트를 납땜함으로써 3mm의 폭을 갖는 필라멘트들의 스플라이스가 마련되었다. 77K에서 필라멘트와 스플라이스의 I-V 곡선이 기록되었다. 도 10은 3mm의 폭을 갖는 필라멘트와 단일 스플라이스를 함유하고 3mm의 폭을 갖는 필라멘트의 I-V 곡선을 비교한다. 3mm의 폭을 갖는 필라멘트가 테스트되었고, 도 10에 그 결과 데이터가 기록되어 있다. 그 다음 동일한 3mm의 폭을 갖는 필라멘트가 절단되었고, 함께 다시 스플라이스되어 테스트되었다. 스플라이스 I-V 곡선의 저항성 부분은 선형 함수를 가지고 근사되었고, 그 곡선의 기울기가 면적 저항을 결정하기 위해 사용되었다. 5개의 쿠폰에 걸쳐 측정된 평균 스플라이스 저항은  $190 \pm 20n\Omega/cm^2$ 이었다.

[0040] 예 4

[0041] 도 11과 도 12는 4.2K(액체 헬륨) 측정의 결과를 도시한다. 1개의 플라이 와이어 쿠폰이 특별히 만들어진 G10 홀더(holder) 상에 장착되었고, 8T Nb-Ti 자석 안쪽에 놓였다. 그러한 쿠폰은 GE 니스를 가지고 홀더에 고착되었다. 저온 유지 장치(cryostat)가 액체 헬륨으로 채워진 후 액체 질소 조에서 자석이 미리 냉각되었다. 자기장은 쿠폰의 넓은 측(side)과 수직이 되게 인가되었다(YBCO 층의 c축을 따라서). I-V 곡선들은 DC 4-포인트 모드에서 기록되었고, 최대 전류는 300A이었다. 도 11은 4.2K에서 최대 5.3테슬라까지 쿠폰의 I-V 곡선을 보여준다. 도 12는 자기장의 함수로서 쿠폰의 임계 전류 밀도의 의존도를 보여준다. 최초 와이어의 0(zero) 필드 임계 전류 밀도가 수평의 점선으로서 도시된다. 최대 300A까지의 DC 전류에 대해 4.3K에서 쿠폰이 테스트되었다. 데이터는 와이어의 임계 전류 밀도가 최초 테이프의 10% 내에 있다는 것을 보여준다.

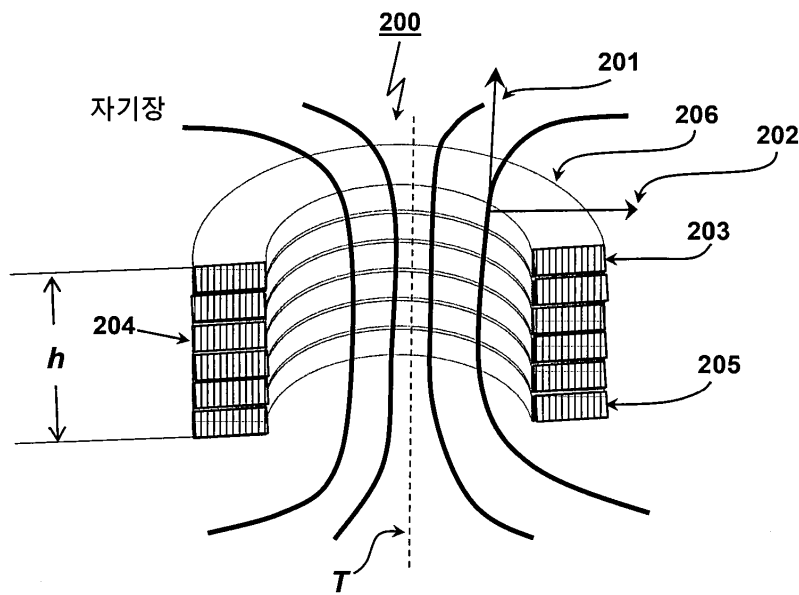
도면

도면1



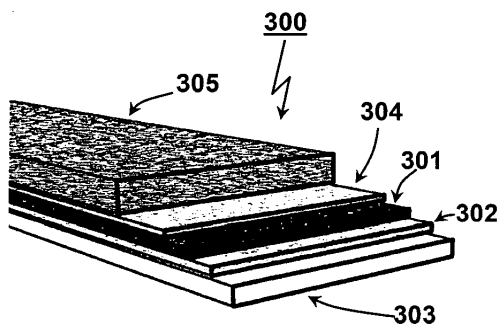
(종래 기술)

도면2

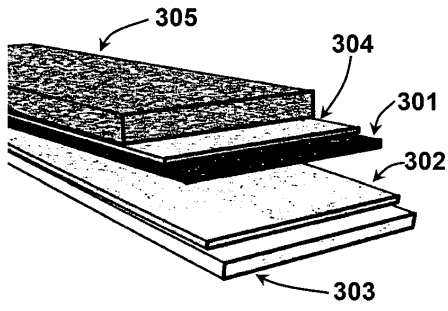


(종래 기술)

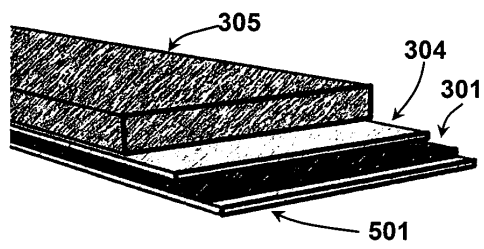
도면3



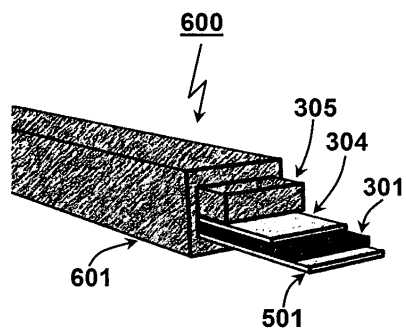
도면4



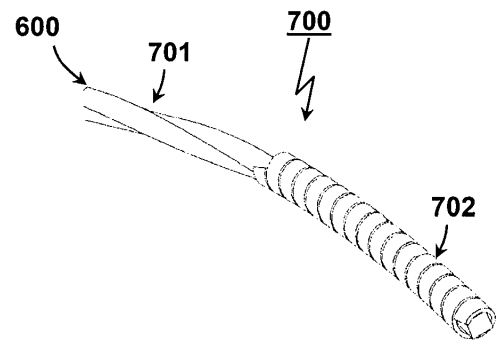
도면5



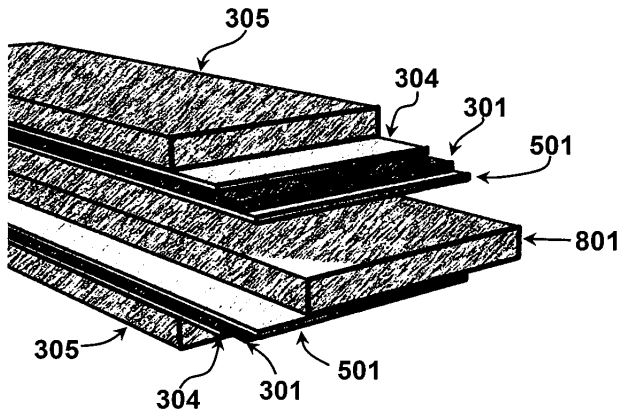
도면6



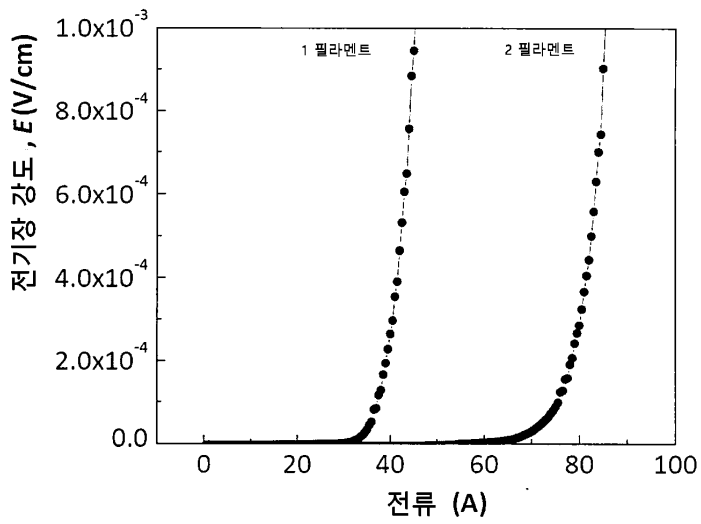
도면7



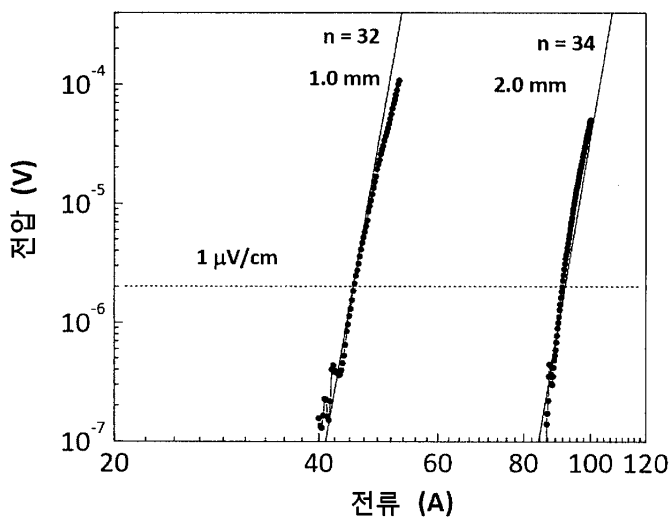
도면8



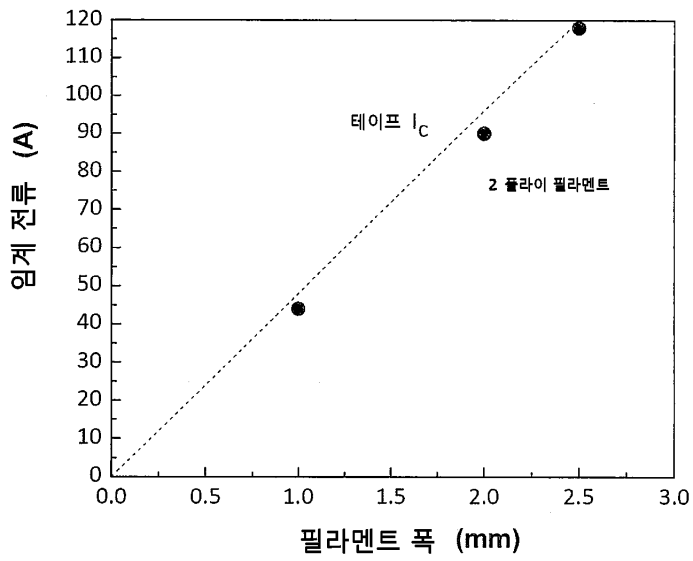
도면9a



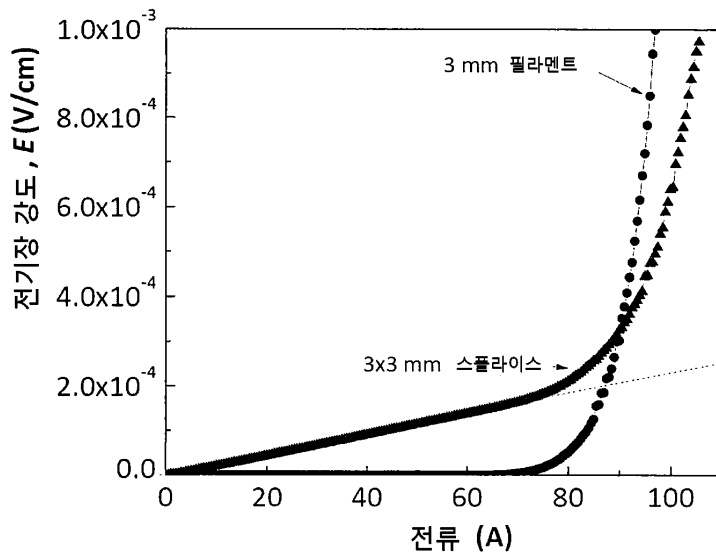
도면9b



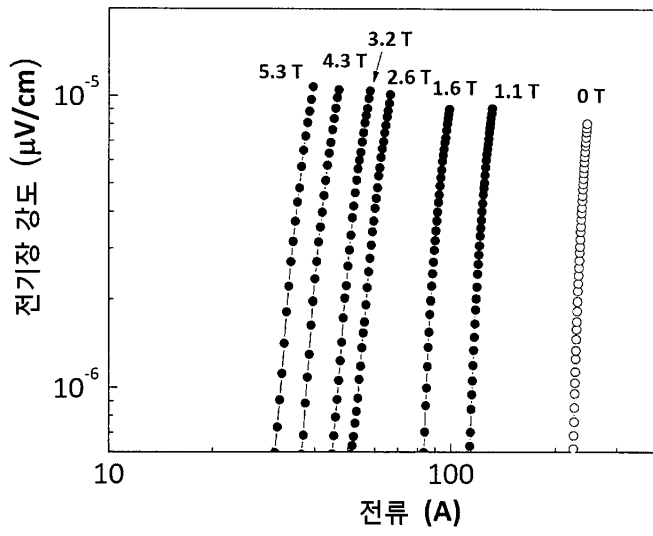
도면9c



도면10



도면11



도면12

