



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2015-0125946
(43) 공개일자 2015년11월10일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H01L 23/14 (2006.01) H01L 23/00 (2006.01)
H01L 23/498 (2006.01) H05K 1/02 (2006.01)
(52) CPC특허분류
H01L 23/145 (2013.01)
H01L 23/4985 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2015-7024298
(22) 출원일자(국제) 2014년02월05일
심사청구일자 없음
(85) 번역문제출일자 2015년09월04일
(86) 국제출원번호 PCT/US2014/014932
(87) 국제공개번호 WO 2014/124044
국제공개일자 2014년08월14일
(30) 우선권주장
61/761,412 2013년02월06일 미국(US)
(뒷면에 계속)

(71) 출원인
더 보오드 오브 트러스티스 오브 더 유니버시티
오브 일리노이즈
미국 61801 일리노이 어바나 사우스 라이트 스트리트 506 헨리 어드미니스트레이션 빌딩 352
노오쓰웨스턴 유니버시티
미국 일리노이 60208 에반스톤클라크 스트리트 633
(72) 발명자
로거스, 존 에이.
미국, 일리노이즈 61822, 엘바나, 브리타니 트레일 드라이브 4305
판, 조나단
미국, 오하이오 43220, 콜럼버스, 캐슬톤 로드 엔 1286
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
이원희

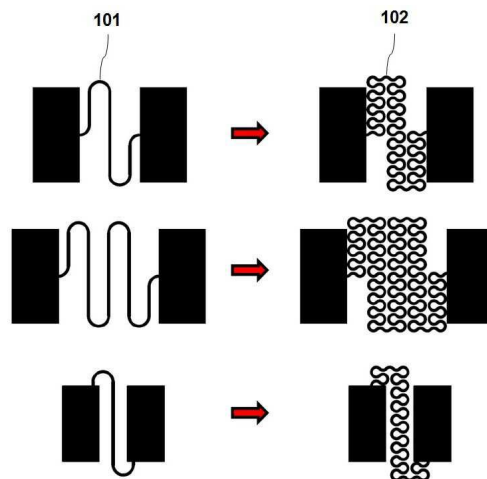
전체 청구항 수 : 총 67 항

(54) 발명의 명칭 인장성의 전자장치에 대한 자기 유사형 및 프랙탈 설계

(57) 요약

본 발명은 전자 회로, 장치 및 인장성의 전기적 배선, 전극 및/또는 반도체 구성요소와 같은 하나 이상의 인장성의 구성요소를 포함하는 장치 구성요소를 제공한다. 본 발명 시스템 일부의 인장성은 반복가능하고 명확한 방법으로 발생하는 탄성 변형이 가능한 구조에서 연성, 탄성의 재료로 인장성의 금속 또는 반도체 구조의 물질 수준의 집적을 통해 성취된다. 본 발명의 인장성의 장치 구조 및 경화-연성 재료의 집적 접근법은 감지(sensing), 액츄에이션(actuation), 전력 저장 및 통신을 포함하는 넓은 범위의 장치 적용을 지지하는 진보된 전기적 기능 및 부합하는 역학의 조합을 제공한다.

대표도 - 도1a



(52) CPC특허분류

H01L 24/18 (2013.01)

H05K 1/0283 (2013.01)

H01L 2924/12032 (2013.01)

H01L 2924/12041 (2013.01)

H01L 2924/1461 (2013.01)

H05K 2201/09263 (2013.01)

(30) 우선권주장

13/835,284 2013년03월15일 미국(US)

61/930,732 2014년01월23일 미국(US)

(72) 발명자

여운홍

미국, 버지니아 23284, 리치몬드, 룸 이2232, 더블
유. 메인 스트리트 401

수, 예왕

미국, 일리노이즈 60208, 에반스톤, 웨리단 로드
2145

황, 용강

미국, 일리노이즈 60022, 글렌코, 스트로베리 힐
드라이브 758

장, 이휘

미국, 일리노이즈 60201, 에반스톤, 에이퍼티. #2,
에멀손 스트리트 1241

명세서

청구범위

청구항 1

탄성 기관; 및

상기 탄성 기관에 의해 지지되는 인장성의 금속 또는 반도체 소자 구성요소; 상기 인장성의 금속 또는 반도체 소자 구성요소는 각각 제1단위 셀 형상을 가지는 복수의 전기 전도성 요소들을 포함하며, 연속적으로 연결된 상기 전기 전도성 요소들은 복수의 공간 주파수를 특징으로 하는 전체적인 2차원 공간 구조를 제공하는 제2형상을 가지고;

상기 금속 또는 반도체 소자 구성요소의 2차원 공간 구조는 하나 이상의 면내 또는 면외 차원에 따른 탄성 변형의 조절이 가능하게 하며, 그렇게 함으로써 상기 전자회로의 인장성을 제공하는 것을 포함하는 전자회로.

청구항 2

제1항에 있어서, 상기 2차원 공간 구조는 탄성 변형을 수행하기 위한 상기 금속 또는 반도체 소자 구성요소로 가능한 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 3

제1항 또는 제2항에 있어서, 상기 2차원 공간 구조는 이축변형, 반경방향 변형 또는 모두를 수행하기 위한 상기 금속 또는 반도체 소자 구성요소로 가능한 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 4

제1항 내지 제3항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 2차원 공간 구조는 면내 변형, 면외 변형 또는 모두를 수행하기 위한 상기 금속 또는 반도체 소자 구성요소로 가능한 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 5

제1항 내지 제4항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 2차원 공간 구조는 상기 제1단위 셀 형상에 해당하는 제1길이 규모를 포함하는 제1공간 주파수 및 상기 제2형상에 해당하는 제2길이 규모를 포함하는 제2공간 주파수를 특징으로 하는 전자회로.

청구항 6

제5항에 있어서, 상기 제1공간 주파수의 제1길이 규모는 상기 제2공간 주파수의 제2길이 규모보다 적어도 2배 작은 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 7

제5항에 있어서, 상기 제1공간 주파수의 제1길이 규모는 상기 제2공간 주파수의 제2길이 규모보다 적어도 2 내지 10배 작은 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 8

제5항에 있어서, 상기 제1공간 주파수의 제1길이 규모는 100nm 내지 1mm의 범위이고, 상기 제2공간 주파수의 제2길이 규모는 1 마이크로미터 내지 10mm의 범위인 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 9

제5항에 있어서, 상기 복수의 공간 주파수는 멱급수(power series)로 특징지어진 복수의 길이 규모를 특징으로 하는 전자회로.

청구항 10

제1항 내지 제9항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 2차원 공간 구조는 둘 이상의 공간 주파수에 의하는 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 11

제10항에 있어서, 상기 전기 전도성 요소의 연속성은 상기 제2형상을 포함하는 전기 전도성 요소의 반복되는 직렬을 포함하는 제 3 형상에 의해 추가적으로 수행됨을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 12

제1항 내지 제11항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 2차원 공간 구조는 2 내지 5 공간 주파수에 의한 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 13

제1항 내지 제12항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 2차원 공간 구조는 반복 2차원 구조인 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 14

제1항 내지 제13항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 전기 전도성 요소의 연속성은 직렬 구성(serial configuration) 또는 병렬 구성(branched configuration)을 포함하는 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 15

제1항 내지 제14항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 2차원 공간 구조는 결정 2차원 형상 또는 랜덤 2차원 형상을 포함하는 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 16

제1항 내지 제15항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 2차원 공간 구조는 상기 제2형상을 포함하는 하나 이상의 제2 스프링 구조를 형성하기 위해 연결된 상기 제1단위 셀 형상을 각각 독립적으로 포함하는 제1스프링 구조의 시리즈를 포함하는 스프링 내부의 스프링 구조(spring-within-in-spring)를 포함하는 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 17

제16항에 있어서, 상기 제1스프링 구조, 상기 제2스프링 구조 또는 두 구조는 압축(compression) 스프링 구조 또는 코일(coiled) 스프링 구조를 포함하는 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 18

제1항 내지 제17항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 2차원 공간 구조는 자기 유사형 2차원 구조인 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 19

제18항에 있어서, 상기 자기 유사형 2차원 구조는 상기 제1단위 셀 형상과 유사하지만 다른 길이 규모를 가진 상기 제2형상에 의한 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 20

제18항에 있어서, 상기 자기 유사형 2차원 구조는 상기 제1단위 셀 형상의 길이 규모보다 적어도 2배 큰 상기 제2형상의 길이 규모에 의해 형상화되는 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 21

제18항에 있어서, 상기 제2형상의 길이 규모는 상기 제1단위 셀 형상의 길이 규모보다 2 내지 20배 큰 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 22

제18항에 있어서, 상기 자기 유사형 2차원 구조는 상기 제1단위 셀 형상에 해당하는 제1길이 규모를 가지는 제1공간 주파수, 상기 제2형상에 해당하는 제2길이 규모를 가지는 제2공간 주파수 및 제 3 형상에 해당하는 제3길이 규모를 가지는 제3공간 주파수에 의한 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 23

제22항에 있어서, 상기 제 3 형상은 상기 제1단위 셀 형상 및 상기 제2형상과 유사하지만 다른 길이 규모를 가지는 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 24

제1항 내지 제23항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 2차원 공간 구조는 1 이상의 프랙탈 차원으로 특징지어진 프랙탈 기반의 2차원 구조인 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 25

제1항 내지 제24항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 2차원 공간 구조는 1 내지 2의 범위에서 선택된 프랙탈 차원으로 특징지어진 프랙탈 기반의 2차원 구조인 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 26

제1항 내지 제25항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 인장성의 금속 또는 반도체 소자 구성요소의 상기 2차원 공간 구조는 제 1 및 제 2 소자 구성요소 사이의 충전율(fill factor)을 제공하거나 상기 전자회로의 20%이상의 활성 영역으로 제공되는 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 27

제1항 내지 제26항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 인장성의 금속 또는 반도체 소자 구성요소의 상기 2차원 공간 구조는 제 1 및 제 2 소자 구성요소 사이의 충전율(fill factor)을 제공하거나 상기 전자회로의 20% 내지 90%의 범위에서 선택되는 활성 영역으로 제공되는 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 28

제1항 내지 제27항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 금속 또는 반도체 소자 구성요소의 상기 전기 전도성 요소는 연속적인 구조를 포함하는 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 29

제1항 내지 제28항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 금속 또는 반도체 소자 구성요소의 상기 전기 전도성 요소는 단일 일체의 구조를 포함하는 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 30

제1항 내지 제29항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 금속 또는 반도체 소자 구성요소의 상기 전기 전도성 요소는 하나 이상의 박막 구조를 포함하는 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 31

제1항 내지 제30항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 인장성의 금속 또는 반도체 소자 구성요소의 상기 전기 전도성 요소들은:

상기 탄성 기판에 의해 적어도 부분적으로 지지되는 프리 스탠딩 구조;

상기 탄성 기판과 적어도 부분적으로 연결되는 결합(tethered) 구조;

상기 탄성 기판과 적어도 부분적으로 결합한 결합(bound) 구조;

상기 탄성 기판 또는 상기 기판에 의해 지지되는 내장형 층에 적어도 부분적으로 내장된 임베디드(embedded) 구조; 또는

유체 수용 또는 고체 수용과 물리적인 접촉이 있는 격납 구조내부의 구조인 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 32

제1항 내지 제31항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 전기 전도성 요소들은 각각 독립적으로 10nm 내지 1mm의 범위에서 선택된 두께를 가지는 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 33

제1항 내지 제32항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 전기 전도성 요소들은 각각 독립적으로 1 마이크로미터 이하의 두께를 가지는 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 34

제1항 내지 제33항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 전기 전도성 요소들의 단위 셀 형상은 각각 독립적으로 100nm 내지 10μm의 범위에서 선택되는 측면 치수에 의한 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 35

제1항 내지 제34항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 인장성의 금속 또는 반도체 소자 구성요소는 0.1μm 내지 100cm의 범위에서 선택되는 경로길이(pathlength)에 의하는 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 36

제1항 내지 제35항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 인장성의 금속 또는 반도체 소자 구성요소는 0.1μm 내지 100cm의 범위에서 선택되는 직선 길이에 의해 분리된 두 접속점 사이에 전기적 접속을 제공하는 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 37

제1항 내지 제36항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 인장성의 금속 또는 반도체 소자 구성요소는 첫번째 및 두번째 접속점 사이에 전기적 접속을 제공하고, 상기 첫번째 및 두번째 접속점 사이에 최단 길이의 직선보다 적어도 2배 길게 연장된 상기 첫번째 및 두번째 접속점 사이의 경로길이(pathlength)를 가지는 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 38

제1항 내지 제37항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 인장성의 금속 또는 반도체 소자 구성요소는 첫번째 및 두번째 접속점 사이에 전기적 접속을 제공하고, 상기 첫번째 및 두번째 접속점 사이에 최단 길이의 직선보다 적어도 2 내지 6배 길게 연장된 상기 첫번째 및 두번째 접속점 사이의 경로길이(pathlength)를 가지는 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 39

제1항 내지 제38항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 전기 전도성 요소는 와이어(wire), 리본(ribbon) 또는 나노박막(nanomembrane)을 포함하는 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 40

제1항 내지 제39항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 전기 전도성 요소는 독립적으로 금속, 합금, 단결정형 무기 반도체 또는 비정질 무기 반도체를 포함하는 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 41

제1항 내지 제40항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 전기 전도성 요소의 상기 제1단위 셀 형상은 스프링, 폴드

(fold), 루프(loop), 메시(mesh) 또는 이들의 조합을 포함하는 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 42

제1항 내지 제41항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 제1단위 셀 형상은 대향 부분(opposing segments), 인접 부분(adjacent segments) 또는 대향 및 인접 부분의 조합을 포함하는 군으로부터 선택되는 복수의 공간적 오프셋(offset) 형상을 포함하는 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 43

제42항에 있어서, 상기 제1단위 셀 형상의 상기 공간적 오프셋 형상은 복수의 볼록부분(convex segments), 오목부분(concave segments), 원형부분, 타원형부분, 삼각형부분, 직사각형부분, 정사각형부분, 또는 이들의 조합을 포함하는 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 44

제43항에 있어서, 상기 단위 셀 형상의 상기 볼록부분, 오목부분, 원형부분, 타원형부분, 삼각형부분, 직사각형부분 또는 정사각형부분은 하나 이상의 직선부분에 의해 분리되는 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 45

제1항 내지 제44항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 전기 전도성 요소의 상기 제1단위 셀 형상은 코흐 곡선(von Koch curve), 페아노 곡선(Peano curve), 힐버트 곡선(Hilbert curve), 무어 곡선(Moore curve), Vicsek 프랙탈(fractal), 정십자형(Greek cross) 및 이들의 조합을 포함하는 군으로부터 1종 이상이 선택되는 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 46

제1항 내지 제45항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 인장성의 금속 또는 반도체 소자 구성요소는 전극 또는 전극 어레이(array)를 포함하는 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 47

제46항에 있어서, 상기 전극 또는 상기 전극 어레이(array)는 센서(sensor), 액츄에이터(actuator), 또는 RF(radio frequency)소자의 구성요소인 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 48

제46항에 있어서, 상기 전극 또는 상기 전극 어레이(array)는 25% 내지 90%의 범위에서 선택되는 상기 전자 회로의 활성 영역에 대한 충전율(fill factor)을 제공하는 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 49

제1항 내지 제45항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 인장성의 금속 또는 반도체 소자 구성요소는 하나 이상의 전기적 배선을 포함하는 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 50

제49항에 있어서, 상기 하나 이상의 전기적 배선의 적어도 한 부분이 하나 이상의 리지드 아일랜드(rigid island)구조와 전기적 접촉이 있을 때, 상기 하나 이상의 리지드 아일랜드(rigid island)를 추가적으로 포함하는 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 51

제49항에 있어서, 상기 리지드 아일랜드(rigid island)구조는 무기 반도체 소자 또는 소자 구성요소를 포함하는 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 52

제49항에 있어서, 상기 리지드 아일랜드(rigid island)구조 각각과 전기적으로 접촉하는 복수의 상기 인장성의 금속 또는 반도체 소자 구성요소를 추가적으로 포함하는 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 53

제50항에 있어서, 상기 무기 반도체 소자 또는 소자 구성요소는 트랜지스터(transistor), 다이오드(diode), 증폭기, 멀티플렉서(multiplexer), 발광 다이오드, 레이저, 포토다이오드(photodiode), 집적 회로, 센서, 온도 센서, 서미스터(thermistor), 히터, 저항성 히터, 액츄에이터(actuator) 또는 이들의 조합을 포함하는 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 54

제1항 내지 제53항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 탄성 기판은 $0.25\mu\text{m}$ 내지 $10,000\mu\text{m}$ 의 범위에서 선택되는 평균 두께를 가지는 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 55

제1항 내지 제54항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 탄성 기판은 $1000\mu\text{m}$ 이하의 평균 두께를 가지는 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 56

제1항 내지 제55항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 탄성 기판은 사전변형된 탄성 기판인 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 57

제1항 내지 제56항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 탄성 기판은 0.5KPa 내지 100GPa 의 범위에서 선택된 탄성계수(Young's modulus)를 가지는 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 58

제1항 내지 제57항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 탄성 기판은 $0.1 \times 10^4 \text{ GPa } \mu\text{m}^4$ 내지 $1 \times 10^9 \text{ GPa } \mu\text{m}^4$ 의 범위

에서 선택되는 순굽힘 강성(net bending stiffness)을 가지는 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 59

제1항 내지 제58항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 탄성 기관은 고분자, 무기 고분자, 유기 고분자, 플라스틱, 탄성재(elastomer), 생체고분자(biopolymer), 열경화성(thermoset), 러버 실크(rubber silk) 및 이들의 조합을 포함하는 군으로부터 선택된 재료를 포함하는 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 60

제1항 내지 제59항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 전자회로는 에너지 저장소자, 광소자, 광센서, 변형률 센서, 전자 센서, 온도센서, 화학적 센서, 액츄에이터, 통신 장치, 미세 또는 나노 유체 소자, 집적 회로 또는 이들의 구성요소를 포함하는 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 61

제1항 내지 제60항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 전자회로는 조직 장착 전기적 소자(tissue mounted electronic device), RF(radio frequency) 안테나 또는 자기 공명 영상과 호환하는 센서를 포함하는 것을 특징으로 하는 전자회로.

청구항 62

탄성 기관; 및

상기 탄성 기관에 의해 지지되는 인장성의 전극 어레이(array); 각각 제1단위 셀 형상을 가지는 복수의 전기 전도성 요소를 포함하는 상기 전극 어레이(array), 복수의 공간 주파수로 특징지어지는 전체 2차원 공간 구조를 제공하는 제2형상을 가지는 연속적으로 연결된 상기 전기 전도성 요소;

1MHz 내지 100GHz의 범위에서 선택되는 주파수를 가지는 RF(radio frequency) 전자기 복사에 주로 투명한 상기 인장성의 전극 어레이(array), 및 상기 전자 센서의 인장성을 제공하는 하나 이상의 면내 또는 면외 차원에 대해 탄성 변형을 조절할 수 있는 상기 인장성의 전극 어레이(array)의 상기 2차원 공간 구조를 포함하는 자기 공명 영상에 적합한 전자 센서.

청구항 63

제62항에 있어서, 상기 인장성의 전극 어레이(array)는 상기 전자 센서의 활성 영역에 대한 폐루프(closed loop) 구조를 포함하지 않는 것을 특징으로 하는 전자 센서.

청구항 64

제62항 내지 제63항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 인장성의 전극 어레이(array)는 자기 공명 영상과 결합하여 사용할 때 나타날 수 있는 왜곡(distortion) 또는 가림(shadowing)이 나타나지 않는 것을 특징으로 하는 전자 센서.

청구항 65

제64항에 있어서, 상기 자기 공명 영상은 100 내지 300 MHz의 범위에서 선택되는 상기 주파수를 가지는 RF 펄스(pulse)에 대한 상기 전자 센서의 노광을 포함하는 것을 특징으로 하는 전자 센서.

청구항 66

상기 탄성 기관에 의해 지지되는 복수의 인장성의 금속 또는 반도체 소자 구성요소, 제1단위 셀 형상을 각각 가지는 복수의 전기 전도성 요소들을 독립적으로 포함하는 상기 인장성의 금속 또는 반도체 소자 구성요소, 복수의 공간 주파수로 특징지어지는 전체 2차원 공간 구조를 제공하는 제2형상을 가지면서 연속적이면서 각각 독립적으로 연결된 인장성의 금속 또는 반도체 소자 구성요소의 상기 전기 전도성 요소;

전극 어레이(array)의 활성 영역에 50% 이상의 충전율(fill factor)을 제공하는 상기 복수의 인장성 금속 또는 반도체 소자 구성요소; 및 상기 전극 어레이(array)의 인장성을 제공하기 위하여, 하나 이상의 면내 또는 면외 차원에 대한 탄성 변형의 조절이 가능한 상기 금속 또는 반도체 소자 구성요소의 상기 2차원 공간 구조를 포함하는 전극 어레이(array).

청구항 67

탄성 기관에 의해 지지되는 복수의 리지드 아일랜드(rigid island)구조; 무기 반도체 소자 또는 소자 구성요소를 각각 독립적으로 포함하는 상기 리지드 아일랜드(rigid island)구조;

상기 리지드 아일랜드(rigid island)구조의 적어도 한 부분과 전기적으로 상호접속하는 복수의 인장성 금속 또는 반도체 소자 구성요소, 제1단위 셀 형상을 각각 가지는 복수의 전기 전도성 요소들을 독립적으로 포함하는 상기 인장성의 금속 또는 반도체 소자 구성요소, 복수의 공간 주파수로 특징지어지는 전체 2차원 공간 구조를 제공하는 제2형상을 가지면서 연속적이면서 각각 독립적으로 연결된 인장성의 금속 또는 반도체 소자 구성요소의 상기 전기 전도성 요소;

인장성의 전자 장치의 인장성을 제공하기 위하여, 하나 이상의 면내 또는 면외 차원에 대한 탄성 변형의 조절이 가능한 상기 금속 또는 반도체 소자 구성요소의 상기 2차원 공간 구조를 포함하는 인장성의 전자 장치.

발명의 설명

기술 분야

[0001]

본 발명은 인장성의 전기적 배선, 전극 및/또는 반도체 구성요소와 같은 하나 이상의 인장성의 구성요소를 포함하는 전자 회로, 소자 및 소자 구성요소에 관한 것이다.

배경 기술

[0002]

1994년의 인쇄된, 모든 고분자 트랜지스터들의 첫번째 입증(demonstration)으로부터, 플라스틱 기관 상의 플렉서블(flexible) 집적 전자 소자를 포함하는 전자 시스템의 잠재적인 새로운 단계에 대하여 많은 관심이 집중되어왔다[Garnier, F., Hajlaoui, R., Yassar, A. 및 Srivastava, P., Science, Vol. 265, pgs 1684 - 1686]. 최근에는, 플렉서블 플라스틱 전자 소자의 전도체, 절연체 및 반도체를 위한 새로운 용액 공정이 가능한 물질들을 개발하기 위한 실질적인 연구가 집중되어 왔다. 플렉서블 전자 분야에서의 진척은, 그러나 새로운 용액 공정이 가능한 물질들의 개발에 의해 주도되는 것만이 아니라, 또한 새로운 소자 부품 구조, 효율적인 소자 및 소자 부품의 제조방법 및 플렉서블 전자 시스템에 적용가능한 고해상도 패터닝 기술에 의해서도 주도되어 왔다. 이러한 물질들, 소자 구성 및 제조방법은 플렉서블 집적 전기 소자, 시스템 및 회로의 새로운 단계를 빠르게 등장시키는 필수적인 역할을 수행할 것으로 기대되고 있다.

[0003]

플렉서블 전자 분야에서의 관심은 이 기술에 의해 제공되는 몇몇의 중요한 장점에서 비롯되었다. 예를 들어, 기관재료의 내재된 유연성은, 취성인 종래의 실리콘 기반 전자 소자에서는 불가능하였던 유용한 소자 구성들의 대부분이 다양한 형태로 집적되는 것을 이들이 가능토록 하였다. 게다가, 용액 공정 가능한 부품 재료들 및 플렉서블 기관의 조합은, 연속공정, 빠른 속도, 낮은 가격으로 대면적의 기관 상에 전자 소자를 제조할 수 있는 인쇄기술을 가능토록 하였다.

[0004]

우수한 전기적 성능을 나타내는 플렉서블 전자 소자의 설계 및 제조는, 그러나 여러 중요한 도전이 존재한다.

첫째, 잘 개발된 종래의 실리콘 기반 전자 소자들의 제조방법은 대부분의 플렉서블 재료들과 양립할 수 없다. 예를 들어, 단결정 실리콘 또는 게르마늄 반도체와 같은 대표적인 고성능 무기 반도체 부품들은 일반적으로 대부분의 플라스틱 기판들이 용융 또는 분해되는 온도를 크게 초과하는 온도(>1000 °C)에서 박막 형태로 성장함에 의해 제조된다. 게다가, 대부분의 무기 반도체들은, 용액기반의 제조 및 이송을 가능토록 하는 종래의 용매들 내에서 본질적으로 용해되지 않는다. 나아가, 비록 많은 비정질 실리콘, 유기물 또는 하이브리드 유무기 반도체들이 플렉서블 기판 내로의 결합과 양립가능하고, 상대적으로 저온에서 제조될 수 있긴 하나, 이러한 물질들은, 좋은 전기적 성능을 나타낼 수 있는 집적 전자 소자들을 제공하기에 충분한 전기적 특성을 갖지 않는다. 예를 들어, 이러한 재료들로부터 제조된 반도체 요소들을 포함하는 박막 트랜지스터는, 상보형 단결정 실리콘 기반 소자보다 거의 10^3 배 낮은 전계 효과 이동도를 나타낸다. 이와 같은 제한들의 결과로 인하여, 현재 플렉서블 전자 소자들은 높은 성능이 요구되지 않는 예를 들어 비발광 픽셀을 갖는 액티브 매트릭스 평면 패널 디스플레이 및 발광 다이오드에서의 스위칭 요소로의 용도와 같은 특정 용도로 제한된다.

[0005] 플렉서블 전자 회로망은 플렉서블 디스플레이, 전자 섬유와 같은 임의의 형상인 전기 활성면, 및 전자피부를 포함하는 다양한 분야에서의 연구 중 활성영역이다. 이러한 회로들은 때때로 이들 주변에 대하여 따르는 것이 불가능하다. 이는 형태 변화에 응답하기 위한 연신이 전도성 부품에서는 불가능하기 때문이다. 따라서, 이러한 플렉서블 회로들은 데미지 및 전기적 감소를 받는 경향이 있고, 가혹한 및/또는 반복된 형태 변화 하에서는 신뢰될 수 없다. 플렉서블 회로는 신축 및 이완을 반복하는 중에도 손상되지 않는 신축성 및 굽힘성 배선이 요구된다.

[0006] 굽힘 및 탄성 모두가 가능한 전도체는 실리콘과 같은 탄성재(elastomer) 내로 금속 입자들을 삽입(embedding)함에 의해 일반적으로 제조된다. 이러한 전도성 고무들은 기계적 탄성(mechanically elastic) 및 전기적 전도성 모두이다. 전도성 고무의 결점들은 높은 전기 저항 및 신축 중의 상당한 저항 변화를 포함한다.

[0007] Gray 등은 전도성을 유지하면서 54%까지 선형변형이 가능한 실리콘 탄성재(elastomer) 내로 매입된(encased) 마이크로제조된 서펜타인(serpentine) 와이어들을 사용하여 탄성 전자장치를 제조하는 것에 대해서 논의하였다. 이 연구에서, 상기 와이어들은 나선형 스프링 형태로 형성되었다. 반면, 직선의 와이어들은 낮은 변형(예를 들어 2.4%)에서 파괴되었고, 서펜타인 와이어들은 충분히 높은 변형(예를 들어 27.2%)에서도 전도성을 유지하였다. 이러한 와이어 형상은 연신보다는 굽힘에 의하여 인장될때 와이어의 능력에 의존한다. 이 시스템은 조종가능한 능력 및 다른 형태로의 정확한 패턴이 제한적인 문제를 겪고 있고, 이에 따라 추가적인 면으로는 상이한 변형 및 굽힘 체계에 대한 정확한 시스템에 대한 능력을 제한한다.

[0008] 연구들은, 기계적 변형에 저항성이 향상된 경험이 있는 탄성의 신축성 금속 배선을 제안한다. Mandlik 등은 피라미드형으로 나노패터닝된 표면 상에 금속 필름을 증착함에 의해 이러한 저항 변화를 최소화하기 위하여 시도한 바 있다. 이 연구에서는, 그러나 박막 금속 라인들에 대해 신축성을 전달하는 미세 균열을 형성시키는 돌출부들에 의존하였다. 상기 미세 균열은 면 비틀림(plane twisting) 및 변형에 의한 금속 탄성 변형을 가능하게 한다. 이들 금속 균열은, 그러나 박막 금속 필름과는 양립할 수 없고, 대신에 패터닝된 탄성재(elastomer)들의 상부로 증착된 박막 금속 필름들(예를 들어 대략 30 nm 미만)의 상당히 좁은 범위와는 양립할 수 있다.

[0009] 금속 배선으로 신축성을 전달하는 하나의 방법은, 전도체(예를 들어 금속)가 적용되는 중, 기판을 예비변형(예를 들어 15 내지 25%)하고, 예비변형을 자연스럽게 이완하여, 이에 따라 금속 전도체 배선으로 파형을 가해주는 것에 의한 것이다(예를 들어, Lacour 외 (2003); (2005); (2004), Jones 외 (2004); Huck 외 (2000); Bowden 외 (1998)). Lacour 등은 자연스럽게 주름진 금 줄무늬(gold stripes)를 생성시키기 위하여, 금 줄무늬를 초기 압축하는 것에 의해 전기적 연속성이 22%의 변형(매우 낮은 퍼센트의 탄성 기판 상에 금 필름의 파괴변형과 비교하여)까지 유지되는 것을 보고한 바 있다. 상기 연구에서는, 그러나 금속 필름이 상대적으로 얇은 막으로 사용되었고, 약 10%까지 인장되는 전기적 전도체를 잠재적으로 제조하는 시스템으로 비교적 제한된다.

[0010] 미국 특허 7,557,367, 7,521,292, 및 8,217,381, 미국 공개특허 2010/0002402, 2012/0157804, 및 2011/0230747에서는 인쇄기반 기술을 포함하는 미세제조 경로에 의해 접속가능한 플렉서블 및/또는 신축가능한 전자 시스템을 개시하고 있다. 상기 문헌들의 신축가능한 시스템들은 변형가능한 배선을 통해 상호연결되고, 선택적으로 큰 응력변형에도 대응하는 연신이 가능한 분산된 전자 소자 부품을 갖는 소자들을 포함한다. 상기 문헌들의 시스템들은 조직이 고정된 바이오의학 소자, 태양에너지 및 대면적 매크로 전자 시스템을 포함하는 용도인 전자 소자를 포함한다.

[0011] 상기한 바와 같이, 배선 및 향상된 인장성, 전기적 특성을 갖는 다른 소자 부품과 같은 전기 소자, 및 다양한 서로 다른 구성들에서 인장성의 배선의 빠르고 신뢰있는 제조를 위한 관련 공정들에 대한 필요가 있는 것으로

나타내어진다. 플렉서블 전자 분야의 발전은 중요한 신흥 및 확립기술들에서 중요한 역할을 할 것으로 기대된다. 플렉서블 전자 기술의 이러한 적용 성공은, 그러나 구부러지고(flexed), 변형 및 굽힘(bent) 상태에서도 우수한 전기적, 기계적 및 광학적 특성을 나타낼 수 있는 집적 전자 회로 및 소자를 제조하기 위한 새로운 재료, 소자 구성 및 상업적으로 실현 가능한 제조경로의 계속된 발전에 강하게 의존한다. 특히 고성능, 기계적으로 신장가능한 재료 및 소자 구성들은, 접혀지고, 연신되고 및/또는 수축된 형태에서도 유용한 전자 및 기계적 특성을 나타내는 것이 요구된다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0012] 본 발명의 목적은 인장성의 전자장치에 대한 자기 유사형 및 프랙탈 설계를 제공하는 데 있다.

과제의 해결 수단

[0013] 본 발명은 2013년 3월 15일에 출원한 미국 특허 출원 13/835,284, 2013년 2월 6일에 출원한 미국 가특허 출원 61/761,412, 및 2014년 1월 23일 출원한 미국 가특허 출원 61/930,732 에 우선권을 주장하며, 이는 본 발명에 전체가 참조문헌으로 포함되어 있다.

발명의 효과

[0014] 본 발명은 전자 회로, 장치 및 인장성의 전기적 배선, 전극 및/또는 반도체 구성요소와 같은 하나 이상의 인장성의 구성요소를 포함하는 장치 구성요소를 제공함으로써, 본 발명 시스템 일부의 인장성을 반복가능하고 명확한 방법으로 발생시키는 탄성 변형이 가능한 구조에서 연성, 탄성의 재료로 인장성의 금속 또는 반도체 구조의 물질 수준의 집적을 가능하게 한다. 본 발명의 인장성의 장치 구조 및 경화-연성 재료의 집적 접근법은 감지(sensing), 액추에이션(actuation), 전력 저장 및 통신을 포함하는 넓은 범위의 장치 적용을 지지하는 진보된 전기적 기능 및 부합하는 역학의 조합을 제공할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0015] 도 1a, 1b 및 1c는 본 발명의 관점에 유용한 2차원 공간 구조의 예시를 나타낸다.

도 2는 경화-연성(hard-soft) 재료 집적에 대한 대표적인 프랙탈 기반의 레이아웃(layout)의 개요를 나타낸다. 탄성 기판에 완전히 결합된 금속 와이어(wire)의 6가지 다른 패턴(pattern)은 인장성의 전자장치에 대한 일반적인 레이아웃으로써, 결정적 프랙탈 설계(fractal design)의 적용을 보여준다. 이러한 패턴은 라인(line), 루프(loop), 및 분기(branch)와 같은 구조를 포함하며, 이들은 능동(active) 및 수동(passive)형의 전자부품의 넓은 범위에 적용 가능하다. 모든 경우에 있어서, 아크(arc)부분은 탄성 역학(상단, top row)을 향상시키기 위해 수학적으로 정의된 프랙탈(fractal) 레이아웃으로부터 샤프 코너(sharp corners)를 대신할 수 있다. 탄성 인장 변형(중간줄, middle row)하의 각 구조의 FEM 이미지 및 이들의 대응되는 MicroXCT 이미지(하단, bottom row)는 탄성 역학을 나타낸다. 와이어(wire)는 폴리이미드(polyimide, 1.2 μm)에 의해 끼워지고, 탄성 기판(0.5mm)에 장착된 금(gold)층(300nm)을 포함한다.

도 3은 프랙탈 설계(fractal design)에 있어서, 인장성의 전극에 대한 페아노 곡선(Peano curve)의 수행의 개요를 나타낸다. 패널(Panel) (a)는 2차원 페아노 곡선(Peano curve)의 3가지 반복되는 사례를 보여준다. (N-1)번째 곡선(붉은 박스 점선으로 표시된)의 9가지 버전은 N번째 곡선을 구성하기 위해서 연속된 붉은 선으로 함께 연결된다. 패널(b)는 역학을 향상시키기 위해 샤프 벤드(sharp bends)를 대신하는 아크(arc)부분을 나타낸다. 패널(c)는 피부에 붙인 "ILLINOIS"의 글자를 판독하는 전체 구조와 함께, 페아노 레이아웃(Peano layouts)으로 금속 와이어의 이미지를 제공한다. 이때, 각 글자는 제1 및 2차의 페아노 곡선(Peano curve)의 시리즈를 포함한다. 패널(d)는 와이어로써, 블록선도(block diagram)형태(작은 블록은 제1차 곡선, 큰 블록은 제2차 곡선)에서의 패널(c)에서의 N(연속된 붉은 선)의 상세한 부분을 제공한다. 패널(e)는 광학 이미지를 제공하고, 패널(f)는 기판에 와이어의 등각 접촉을 보여주는 표피 및 표피 모형(색이 있는 금속 와이어) 각각에 제3차의 페아노 기반의 와이어의 스캐닝 전자현미경 이미지를 제공한다. 실험적인 수치는 다음과 같다: 제2차의 금 와이어는 R=620 μm 및 w=70 μm 를 가지고; 제3차 금 와이어는 R=190 μm 및 w=70 μm 를 가지고; 실리콘 나노박막(nanomembrane)(Si NMs)은 R=190 μm 및 w=70 μm 를 가진다.

도 4a 내지 4c는 금속 및 반도체의 프랙탈 기반 구조의 기계적 특성의 개요를 제공한다. 도 4a 및 도 4d는 제2

및 3차 절반씩의 페아노 레이아웃으로 패턴된 금속 와이어의 광학 이미지를 나타낸다. 샘플은 4개 지점 프로빙(probing)을 위해 사용된 4개의 와이어의 인장성 세트에 연결된다. 도 4b 및 도 4e는 최대로 적용된 변형의 증가한 정도에서 측정된 미분저항(differential resistances)의 그래프를 나타낸다. 플라스틱 변형의 개시(onset)는 미분저항이 0이 아닐 때의 변형에 관한 것이다. 도 4c 및 도 4f는 변형의 다른 정도에서 제2 및 3차 구조의 실험적 광학 이미지 및 FEM 기반의 이미지 사이의 비교를 나타낸다. 도 4g 및 도 4h는 40% 사전변형된 탄성 기관에 완전히 결합되고, 페아노 레이아웃으로 패턴된 실리콘 나노박막(Si NMs)의 MicroXCT 및 FEM 이미지를 제공한다. 릴리스(release) 및 단일축의 인장에 따라서, 두 구조는 탄성 변형의 높은 정도에 잘 맞는 기계적 방법으로, 미세규모 버클(buckle)을 통해 기계적 스트레스(stress)를 제거할 수 있다.

도 5a 내지 5f는 기록(recording), 기준(reference) 및 접지(ground) 전극을 통합하는 패치(patch)타입의 장치를 나타내는 방법에 관한 프랙탈 기반의 표피(epidermal)장치의 개요를 제공한다. 도 5a는 정십자형(Greek cross) 프랙탈 설계에 기반한 다기능 장치의 도식적 이미지를 제공한다. 도 5b는 웨이퍼(wafer)에서 장치의 대응되는 이미지를 제공하고, 도 5c는 피부에 붙인 장치의 이미지를 제공한다. 도 5d는 절연된 가열 와이어를 통해 수행된 전류에 의한 줄(Joule) 가열 수행모드에서 사용된 장치를 나타낸다. 도 5e는 4개 지점 프로빙(probing)을 통한 온도 센싱(sensing)을 이용한 장치로부터의 데이터를 제공한다. 도 5f는 ECG 측정에 사용된 장치로부터의 데이터를 제공한다.

도 6a 내지 6d는 인장성의 프랙탈 구조의 RF 특성의 개요를 제공한다. 도 6a는 인장 변형의 다른 정도 하에 박스 프랙탈 안테나의 손실 파라미터(loss parameter)의 회복을 나타내는 데이터를 제공한다. 도 6a의 삽입은 탄성재(elastomer)에 완전히 결합된 변형되지 않은 안테나의 광학 이미지를 나타낸다. 도 6b는 30% 인장 변형 하에서 박스 프랙탈 안테나의 광학 이미지 및 같은 구조의 대응하는 FEM 기반의 이미지를 제공한다. 도 6c는 변형이 없고, 30% 변형 하에서 안테나의 파필드(far-field)개요를 제공한다. 도 6d는 물병에 부착된 다른 구리(copper)샘플(1-7 라벨의)의 크로스(cross)부분의 MRI 이미지를 나타낸다. 프랙탈 기반의 샘플이 가림(shadowing)없이 보여질 때, 입체(solid) 및 메시(mesh) 샘플은 MRI 이미지에서 가림(shadowing)이 나타난다. 샘플 레이아웃 모두는 1×1인치이며, (1)입체 정사각형, (2)두꺼운 메시, (3)얇은 메시, (4)스페이서(spacer)에 의해 분리된 수평 및 수직의 선, (5)페아노 곡선, (6)힐버트 곡선, (7)서펜타인 정십자형이다.

도 7은 도 1a에 나타난 것과 같이, 제3차의 페아노 곡선의 개요를 제공하며, 작고(왼쪽), 중간 크기의(중간, 녹색 강조), 및 큰(오른쪽, 녹색 강조) 길이 규모에서 스프링과 같은 모티프(motifs)를 포함한다. 나아가, 스프링과 같은 모티프는 중간 그래프에서 두 중간 스프링에 의해 나타난 것과 같이, x- 또는 y-축을 따라 맞출 수 있다.

도 8은 반복과정의 개요를 제공한다. 패널(a)는 함께 연결됨에 의해 수행된 N번째 반복을 수행하기 위하여 연속적인 선에 함께 연결된 (N-1)번째 서브 단위 셀의 9 버전을 나타낸다. 화살표는 서브-단위 셀 각각의 시작과 종료 지점을 나타낸다. 이러한 9개 서브단위들 각각은 제1차 반복 서브단위(패널(b))로 보여지는 것과 같이, 시작과 종료 지점을 바꾸지 않고 수직 또는 수평 중 어느 것에도 맞출 수 있다. 이와 같이, 페아노 곡선(272 차이의 제2차 페아노 곡선 단독)의 많은 변화가 존재할 수 있다. 패널(c)는 90, 180, 및 270도의 입체각으로 아크(arc)영역의 시리즈를 포함하는 모형의, 실험적인 구조를 나타낸다. 아크(arc)영역 사이의 교차지점들은 이들의 구역을 제한하는 수학적으로 정의된 페아노 곡선과 일치한다. 이와 같이, 곡률 반경(radius of curvature, R), 와이어 폭(wire width, w), 및 와이어 두께(wire thickness, t)는 주어진 레이아웃 유형과 프랙탈 차원에 대한 완전한 구조를 정의한다.

도 9는 실험적인 시스템 및 결과의 개요를 제공한다. 패널(a)는 장치 측정 및 테스트를 위한 실험적 구성을 나타낸다. 4개 지점 프로빙(probing)을 통해 장치 저항성을 측정하기 위하여, 한쌍의 와이어가 있는 장치에 1mA의 일정한 전류를 공급하고, 록-인 증폭기(lock-in amplifier)를 이용하여 두번째 쌍의 와이어가 있는 장치에서 전압 하락을 측정하였다. 패널(b)는 ACF 케이블과 결합되고 단축형 인장기(uniaxial stretcher)에 장착된 프랙탈 기반의 샘플의 상세한 사진을 제공한다. 패널(c)는 기계적 로딩(loading) 및 언로딩(unloading) 중에 사전변형된 프랙탈 샘플의 상세한 사진을 제공한다. 패널(d)는 탄성에서 가소성(plastic)으로 변형되는 전환점을 기술하면서, x- 또는 y-축을 따라 절반씩의 샘플에 대한 인장성을 실험적으로 측정하고 계산된 요약을 제공한다.

도 10은 인장된 장치의 개요를 제공한다. 패널(a)는 변형, 사전변형, 인장이 없는 조건하에, 모든 수직의 제2차 구조의 FEM-기반의 이미지 및 실험적 광학 이미지 사이의 비교를 나타낸다. 패널(b)는 최대로 적용된 변형의 정도가 증가함에 따라 샘플에서 측정된 미분저항(differential resistances)의 그래프를 나타낸다.

도 11은 두개의 다른 절반씩의 샘플(검고 붉은색의 선)에 대하여 인장 변형의 기능으로써 실리콘 나노박막의 저

항성의 그래프를 나타낸다. 박막 크랙(crack) 및 저항성이 극적으로 증가할 때 실패가 명백히 정의된다. 본 발명에서 최대의 탄성 변형은 63%값을 가지는 모형의 FEM 변형과 일치한다.

도 12a는 다른 박막 두께에 대한 y-축을 따라 변형된 모든 수직의 페아노 실리콘 나노박막에 대해 측정된 인장성을 보여주는 데이터를 제공한다. 평면 구조는 도 3에 나타난 것과 동일하다. 도 12b는 박막 두께가 증가함에 따라, 변형된 박막이 주름(wrinkling), 마이크로-버클링(micro-buckling), 전체적인 버클링(global buckling)에 걸친 기계적 방법을 수행하는 과정을 보여주는 개략도를 제공한다. 최대의 장치 인장성은 연성 기관에 장착된 기계적으로 경화된 실리콘 박막에서 스트레스를 제거하기에 특히 적합한 마이크로-버클을 가리키는 마이크로-버클(micro-buckle)방법과 일치한다.

도 13은 패널(a)에서 피부에 붙인 제3차 페아노 온도센서의 광학 이미지를 나타내고, 동시에 우수한 일치(패널(b))를 보이는 적외선 카메라로 피부의 온도 측정도 나타낸다. 패널(c)는 금 와이어를 통하는 더 많은 양의 전류(10mA의 흐름)가 흐름에 의한 히터(heater)로서 제3차 페아노 장치 기능을 나타낸다. 장치 내에 열 분포는 와이어 레이아웃의 공간 충전 특성 때문에 인장이 없고 있고 간에 일정하다.

도 14는 십자형의 공간 충전 특성을 나타낸다. 패널(a)는 제1차 구조가 십자형임을 나타낸다. 더 높은 차수의 구조는 나타난 바와 같이, 기하급수적으로 작은 차수의 십자형에 더해짐에 의해 반복적으로 구성된다. 패널(b)는 본 발명에 나타난 전극에 대하여, 구조체들(붉은 선들) 사이의 연결이 네트워크에서 와이어의 페루프 없이 정의됨을 나타낸다. 패널(c)는 수학적 구조의 직선들이 인장성을 가능하게 하기 위해 서펜타인 레이아웃으로 대체됨을 나타낸다.

도 15는 비교할만한 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratios)를 보이는 팔에 붙인 프랙탈 표피(epidermal)전극(패널(a)) 및 겔(gel)기반 전극으로부터 발생한 EMG 신호의 비교를 보여주는 데이터를 제공한다. 피크(peak)점들은 주먹을 쥐었기 때문이다.

도 16은 Vicsek 프랙탈의 제1차 세번의 반복의 도해를 제공한다.

도 17a는 박스 프랙탈 안테나(box fractal antenna) 구조를 나타낸다. 안테나의 급전점(feed point)은 같은 축의 피드(feed)와 충분히 맞는 기본적인 모드의 임피던스로 선택된다. 도 17b는 인장의 세가지 다른 정도에 대한 박스 프랙탈 안테나(box fractal antenna)의 손실 스펙트럼(loss spectra)이 되돌아오는 것을 보여주는 데이터를 제공한다. 이때 안테나에 만들어진 큰 유도성 부하때문에, 박스 프랙탈의 밴드 폭은 매우 좁다. 도 17c는 공명에서 비인장된 안테나의 파필드(far field)강도 개요를 나타낸다.

도 18은 다섯 가지의 다른 페아노(Peano) 기반의 와이어 구조의 탄성 역학의 개요를 제공한다. 와이어의 어느 구역에서나 0.3%의 최대 주변형 기준이 주어진 다섯 가지의 다른 제2차 페아노 레이아웃에서 탄성체에 장착된 금속 와이어의 측정된 인장성이 나타난다. 레이아웃은 "모든 수평"(서브단위들이 모두 x-축을 따라 배향되어 있다)에서 "모든 수직"(서브단위들이 모두 y-축을 따라 배향되어 있다)의 범위이다. 변형 기준은 와이어에서 탄성에서 가소성(plastic) 변형으로의 전환을 정의한다.

도 19는 아크 입체각(arc solid angle)의 함수로써 서펜타인 와이어에 대한 가상의 단일축의 탄성 인장성의 개요를 제공한다. 중간 세로단의 삽입은 아크 입체각을 정의한다. 가로 구역의(cross-sectional) 구조 및 재료는 도 3과 맞으며, 모든 구조는 $R=620\text{ }\mu\text{m}$ 및 $w=70\text{ }\mu\text{m}$ (도 S2에 정의된다)를 가진다. 이러한 시뮬레이션(simulation)은 탄성 인장성이 초기의 서펜타인 구조에서 아크각(arc angle)의 함수로써 증가하는 것을 명확히 나타낸다. 이와 같이, 와이어 유형의 구조에서 아크 구역 구조를 결정적으로 정의하는 것은 역학을 최적화할 수 있다.

도 20은 절반씩의 페아노 구조에 대한 단위 셀 크기의 함수로써 유사 이축의 인장성의 개요를 제공한다. 십자형 구역의 구조 및 재료는 도 4a내지 4h에서와 맞으며, 모든 구조는 $w=70\text{ }\mu\text{m}$ (도 8에서 정의된)를 가진다. 1.5mm 및 4.5mm 사이의 단위 셀 크기의 구조들은 20% 초과와 이축의 인장성을 나타내며, 표피의 탄성의 특성과 일치한다.

도 21a 내지 21e는 전지 레이아웃 및 설계에서의 측면의 개요를 제공한다. 도 21a는 인장 및 벤딩(bending)의 상태에 있는 완성된 장치의 개략도를 나타낸다. 도 21b는 전지 구조에서 다양한 층의 분해도 레이아웃을 나타낸다. 도 21c는 배선(검은색: 제1단계 서펜타인; 노란색: 제2단계 서펜타인)으로 사용된 '자기 유사형'의 서펜타인(serpentine) 구조의 도해를 제공한다. 도 21d는 알루미늄(Al) 전극 패드 및 실리콘 웨이퍼(Si wafer)에서 자기 유사형 배선(왼쪽 패널; 하향식 관점; ~4단위 셀), 실리콘 시트에서 전사 인쇄(transfer printing)후(중간 패널; 하향식 관점, 구부러진 구조), 및 리튬코발트옥사이드(LiCoO₂)의 몰드된 슬러리(오른쪽 패널; 하향식 관점, 구부러진 구조)의 광학 이미지를 나타낸다. 도 21e는 구리(Cu) 전극 패드 및 실리콘 웨이퍼(Si wafer)에서

자기 유사형 배선(왼쪽 패널; 하향식 관점; ~4단위 셀), 실리콘 시트에서 전사 인쇄(transfer printing)후(중간 패널; 하향식 관점, 구부러진 구조), 및 리튬티타늄옥사이드($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$)의 몰드된 슬러리(오른쪽 패널; 하향식 관점, 구부러진 구조)의 광학 이미지를 나타낸다. 도 21d 및 도 21e 에서 스케일 바(scale bar)는 2mm이다.

도 22는 자기 유사형의 서펜타인(serpentine) 레이아웃과 배선에 있어서, 버클링(buckling)물리학에 대한 실험적 및 컴퓨터를 이용한 연구의 개요를 제공한다. 적용된 인장 변형(ϵ)의 다양한 정도에 대한 대칭(왼쪽 세로줄) 및 비대칭(중간 세로줄)의 변형 모드의 광학 이미지 및 대응하는 한정 요소 분석(FEA, finite element analysis)에 대해 나타난다. FEA 결과에서의 색은 금속 층의 최대 주변형을 나타낸다. 스케일 바(scale bar)는 2mm이다. 오른쪽 세로줄은 적용된 변형이 풀린 후의 배선 구조를 나타낸다.

도 23a 내지 23h는 전지의 전기화학적 및 기계적 특성의 개요를 제공한다. 도 23a는 300% 단축의 변형이 있고(붉은색), 없는(검은색) 전지 전극의 정전류 충전 및 방전의 결과를 나타낸다. 도 23b는 2.5 내지 1.6V의 차단 전압(cutoff voltage)으로 20회 순환한 것에 대한 용량 보유력(capacity retention)(검은색 사각형) 및 쿨롱 효율(coulombic efficiency)(붉은색 원)을 나타내는 결과를 제공한다. 도 23c는 적용된 이축형 변형의 함수로써 출력전력(output power)을 나타내는 데이터를 제공한다. 도 23d는, 도 23e 내지 23h가 이축으로 300% 인장된 장치의 이미지(도 23e), 접혀진(도 23f), 구부러진(도 23g), 및 사람 팔에 붙었을 때의 컴플라이언트(compliant)(도 23h)의 이미지를 나타낼 때, 붉은색 LED와 연결된 전지의 작동의 이미지를 나타낸다.

도 24a 내지 24d는 무선 충전에 대한 인장성의 시스템의 개요를 제공한다. 도 24a는 회로의 도식을 나타낸다. 도 24b는 표시된 다른 구성요소들로 통합된 시스템의 이미지를 나타낸다. 도 24c는 도 24a에 표시된 것과 같이, 44.5MHz의 진동수로 입력되는 교류전압(검은색) 및 직류전압 출력의 결과(붉은색)로 무선 코일의 특성을 보여주는 데이터를 제공한다. 도 24d는 인장성 전지로서 충전 전압(위) 및 전류(아래)곡선이 무선 회로로부터 3V의 출력으로 충전됨을 보여주는 데이터를 제공한다. 도 24b의 스케일 바는 1cm이다.

도 25는 자기 유사형의 배선(구리층)에 대한 치수의 도해를 나타낸다.

도 26은 제조과정 및 수용성 테이프(tape)에서 몰드된 음극(오른쪽 상단) 및 양극 슬러리(오른쪽 하단)의 이미지의 개략도를 제공한다.

도 27은 30%까지의 사전변형이 풀어진 후에 에코플렉스(ecoflex) 시트의 표면에 버클된 알루미늄(Al)박(600nm)/폴리이미드(PI, 1200nm) 이중층의 SEM 이미지를 나타낸다. 이러한 이중층 구조는 물, 공기 및 용매의 침투를 막기 위하여 파우치 셀(pouch cell)에서 사용되는 적층된 알루미늄(Al)/고분자 패키징 재료의 유형과 비슷하다.

도 28a 및 28b는 다른 시점의 각도들(예를 들어, 상단, 앞, 측면, 및 3차원 시점)에서, 50%의 적용된 변형 하에서 대칭(도 28a) 및 비대칭(도 28b)의 버클링 모드(buckling mode)에 대한 자기 유사형 전극의 변형된 구성(FEA 결과)을 나타낸다.

도 29는 변형의 전개와 함께, 적용된 변형(ϵ_{app1})의 함수로써 자기 유사형의 배선의 금속층에서 최대 주변형의 최대값(ϵ_{max})을 나타낸다.

도 30은 금속층에서 최대 주변형의 분포를 나타낸다. 이때 변형 최대값이 1%에 도달할 때: (위) 제2차 자기 유사형의 배선; 및 (아래) 제1차 배선을 나타낸다. 두 구조는 같은 전체 치수 및 십자형 구역을 가진다.

도 31은 자기 유사형 및 단순 서펜타인(simple serpentine) 설계에 대해 적용된 변형(ϵ_{app1})의 함수로써 배선의 금속층에서 최대 주변형의 최대값(ϵ_{max})을 나타내는 그래프를 제공한다. 두 배선은 같은 값의 총 길이(l_{total}), 스패(span, L), 진폭(h), 폭(w), 및 두께(t)를 가진다.

도 32는 압축하에 수직으로 정렬된 자기 유사형 배선의 버클링(buckling) 프로파일의 한정 요소 분석의 결과, 및 실험으로부터의 광학 이미지에 대한 비교를 제공한다. FEA결과에서 색의 구분은 금속층에서 최대 주변형의 분포를 나타낸다.

도 33a는 알루미늄 및 구리 패드의 레이아웃을 나타내고, 도 33b는 알루미늄 패드의 반경 및 대표적인 단위 셀의 크기에서의 충전율의 상관성을 나타낸다. 오프셋(offset) 길이(d)는 전지가 인장됨으로써, 가능한 단축된 회로를 방지하기 위한 모델에서 0.5mm로 맞춰질 수 있다.

도 34는 10mV의 섭동(perturbation)진폭으로 1MHz 내지 10MHz에서의 파우치(pouch)유형의 인장성 전지에 대한 나이퀴스트 임피던스(Nyquist impedance) 그래프를 나타낸다.

도 35는 실온(room temperature)에서 측정된, 다양한 구조에서 전지에 대한 개방회로 전압 감쇠(decay)곡선(위) 및 누설전류(leakage current)곡선(아래)을 나타내는 데이터를 제공한다.

도 36은 완전히 같은 슬러리 및 음극 및 양극 구조에 맞는 정전용량(capacitance)의 코인 셀(coin cell) 구조에 대한, 2.5 내지 1.6V의 차단전압(cutoff voltage)으로 20회 순환한 것에 대한 용량 보유력(capacity retention)(검은색 사각형) 및 쿨롱 효율(coulombic efficiency)(붉은색 원)을 나타낸다.

도 37은 100%(붉은색 원 곡선, 1.60 내지 2.50V의 차단전압) 및 75%(검은색 사각형 곡선, 2.25 내지 2.50V의 차단전압)까지의 방전의 깊이에 대한 용량 보유력(capacity retention) 곡선을 나타낸다.

도 38은 약 1.7V의 전압에서의 작동을 나타내는 판매용의 붉은색 LED(light emitting diode)의 전류-전압(I-V)곡선을 나타낸다.

도 39는 무선 재충전 시스템(위); 별개의 다이오드 및 서펜타인(serpentine) 배선 둘 다를, 무선 코일의 대표적인 구성요소에 대하여, 32.3%의 적용된 변형하에서 최대 주변형의 분포 및 측정된 변형(중간); 서펜타인 배선만으로, 무선 코일의 대표적인 구성요소에 대하여, 32.6%의 적용된 변형하에서 최대 주변형의 분포 및 측정된 변형(아래)의 레이아웃의 개략도를 제공한다.

도 40a는 전체적인 구조에서 최대 주변형의 측정된 분포를 나타내고, 도 40b는 시스템이 수직방향을 따라 30%에 의해 인장될 때 다이오드/기판 인터페이스(interface)에서 기판 평균 변형(ϵ_{33})의 측정된 분포를 나타낸다.

도 41은 무선 충전 시스템의 입력 및 출력 전기적 특성을 나타낸다. 쇼트키 다이오드(schottky diode)는 0V 에서 4.6V로 표면상으로 발진하는 정류된 출력(파란색 곡선)을 내기 위해서, 함수발생기(functional generator)(분홍색 곡선)로부터 교류전압 입력을 정류한다. 병렬의 1.7nF 커패시터(capacitor)는 직류(붉은색 곡선)에 가까운 거동으로 전류원을 제공하기 위하여 이러한 발진을 통합한다. 정전용량(capacitance)의 증가는 전류를 추가적으로 평탄하게 한다.(검은색 곡선)

도 42는 약 2.3K Ω 의 직렬 저항을 나타내는 정류 칩(rectifying chip)이 있는 무선 코일의 전류-전압(I-V)곡선을 나타낸다.

도 43a는 18 μm 두께의 구리 박(foil)의 무선 코일의 입력 및 출력 전압(검은색) 및 전류(붉은색)를 나타낸다. 도 43b는 적용된 단축성 변형의 다른 정도에서 7 μm 두께 구리 코일의 광학 현미경사진을 나타낸다. 스케일 바(scale bar)는 모두 1cm이다. 도 43c는 7 μm 두께를 가진 서펜타인 코일의 일부분의 인장을 한정요소 분석한 결과를 나타낸다.

도 44a 및 44b는 무선코일 충전 회로에서 측정된 전류변화(도 44a) 및 모의의 결과(도 44b)사이의 비교를 나타낸다.

도 45(a)는 인장성의 리튬이온 전지에 대하여, 알루미늄(Al) 전극 패드 및 실리콘 웨이퍼(Si wafer)에서 자기 유사형 배선(왼쪽 패널; 하향식 관점; ~4단위 셀), 실리콘 시트에서 전사 인쇄(transfer printing)후(중간 패널; 사선의 관점, 구부러진 구조), 및 리튬코발트옥사이드(LiCoO₂)의 몰드된 슬러리(오른쪽 패널; 사선의 관점, 구부러진 구조)의 광학 이미지이고; (b)는 자기 유사형의 직사각형 배선의 구조적 구성에 대한 개략도이고; (c)는 자기 유사형의 서펜타인 배선의 구조적 구성에 대한 개략도이다. (a)에서의 스케일 바는 2mm이다. (a)는 Xu et al. [19], Copyright 2013, Nature Publishing Group 으로부터의 승인으로 재인쇄한 것이다.

도 46(a)는 오른쪽 끝에 축력 N, 전단력 Q, 및 굽힘 모멘트 M이 있는 조건으로, 자유롭게 서스펜드(suspend)된 제1차 직사각형 배선이 왼쪽 끝에 고정되어 있다. (b)는 제1차 직사각형 배선의 제k차 단위 셀의 분해도 및 자유물체도를 나타낸다.

도 47은 (a)제2차 및 (b)제3차 자기 유사형의 직사각형 배선에 대하여 대표적인 단위 셀의 분해도를 나타낸다.

도 48은 자기 유사형의 서펜타인 배선이 일반화된 제3차 구조 구성에 대한 개략도를 나타낸다.

도 49는 유연성에 대한 자기 유사형 차수의 영향에 대한 것이며, 자기 유사형 차수에 대한 무차원 유연성 구성

요소($\bar{T}_{11}^{(n)}$, $\bar{T}_{12}^{(n)}$ 및 $\bar{T}_{33}^{(n)}$)(a) 및 ($\bar{T}_{22}^{(n)}$ 및 $\bar{T}_{23}^{(n)}$)(b)를 나타낸다. FEA에서, 폭은 다른 차수들의 구조에 대하여 $\mu=0.4l^{(1)}$ 로 고정된다.

도 50은 제1차 서펜타인 배선에 있어서, 단위 셀의 다른 숫자($m^{(1)}$)의 높이/간격 비($n^{(1)}$)에 대한 무차원 인장성을 나타낸다.

도 51은 ($m^{(1)}, n^{(1)}$)=(8,2)일 때, 단위 셀의 다른 숫자($m^{(2)}$)의 높이/간격 비($n^{(2)}$)에 대한 제2차 서펜타인 배선의 무차원 인장성을 나타낸다.

도 52는 자기 유사형 차수의 함수로써 무차원 인장성을 나타내며, FEA에서, 폭은 다른 차수들의 구조에 대하여 $w=0.4l^{(1)}$ 로 고정된다.

도 53은 아일랜드-브릿지 구조에 대한 제2차 서펜타인 배선의 최적화 설계를 나타낸다. (a)는 8×8 배열로 된 아일랜드-브릿지 구조의 개략도, 및 구조적 파라미터에 대한 개요를 나타내며; (b)는 단위 셀의 숫자($m^{(2)}$)에 대한 최대 인장성(왼쪽 패널), 및 최적화된 구성(오른쪽 패널)을 나타낸다.

도 54(a)는 인장성의 리튬이온 전지에 대하여, 전극 패드 및 실리콘 웨이퍼(Si wafer)에서 프랙탈 기반의 배선(상단 패널; 하향식 관점; ~4단위 셀), 실리콘 시트에서 전사 인쇄(transfer printing)후(중간 패널; 사선의 관점, 구부러진 구조), 및 리튬코발트옥사이드(LiCoO₂)의 몰드된 슬러리(하단 패널; 사선의 관점, 구부러진 구조)의 광학 이미지이고; (b)는 적용된 인장 변형 ϵ 의 다양한 정도에 대하여, 대칭적 변형 모드의 대응하는 기존의 FEA 결과 및 광학 이미지를 나타낸다. (a)와 (b)에서의 스케일 바는 2mm이다. (a) 및 (b)는 Xu et al. (2013), Copyright 2013, Nature Publishing Group 으로부터의 승인으로 재인쇄한 것이다.

도 55는 프랙탈 기반의 배선의 구조적 구성에 대한 개략도를 나타낸다.

도 56은 프랙탈 기반의 배선에 상당한 구조의 개략도를 나타낸다. (a)는 수직적으로 정렬된 (n-1)차수의 배선, 및 수평적으로 정렬된 (n-2)차수의 배선을 포함하는 n-차수의 프랙탈 배선을 나타내고; (b)는 수직 빔(straight beam)만을 포함하는 동등한 구조를 나타낸다.

도 57은 제2차 프랙탈 배선에 대한 계산적 위계 모델(hierarchical computational model, HCM)의 도해를 나타낸다. (a)는 단계 로, 수직 빔의 동등한 구조에 의해 설계된 전체 배선에서, 제2차 구조를 푸는 단계이다. (b)는 단계 II로, 구조체의 원래 구조를 사용하여 연구된 제1차 구조를 푸는 단계이다.

도 58은 다른 프랙탈 차수의 구조에 대하여, (m, n)=(4,8/ $\sqrt{11}$), 두께/폭 측면의 비율($t/w=0.03$), 및 간격에 대한 폭의 비율($w/l^{(1)}=0.4$)로, $n=1$ 내지 4의 프랙탈 배선의 차수에 대한 탄성 인장성을 나타낸다.

도 59는 (m, n)=(4,8/ $\sqrt{11}$)로 제1차 서펜타인 배선에 있어서 적용된 변형에 대한 최대 주변형을 나타낸다. 삽입된 도면은 탄성 인장성에 도달함으로써 서펜타인 배선의 변형된 패턴을 나타낸다.

도 60(a)는 (m, n)=(4,8/ $\sqrt{11}$)로 제2차 프랙탈 배선에 있어서 적용된 변형에 대한 최대 주변형을 나타내며; (b)는 제2차 구조가 완전히 풀렸을 때 비변형 및 변형된 구성을 나타낸다.

도 61(a)는 (m, n)=(4,8/ $\sqrt{11}$)로 제3차 프랙탈 배선에 있어서 적용된 변형에 대한 최대 주변형을 나타내며; (b)는 제3차 및 제2차 구조가 완전히 풀렸을 때 비변형 및 변형된 구성을 나타낸다.

도 62(a)는 (m, n)=(4,8/ $\sqrt{11}$)로 제4차 프랙탈 배선에 있어서 적용된 변형에 대한 최대 주변형을 나타내며; (b)는 제4차, 제3차 및 제2차 구조가 완전히 풀렸을 때 비변형 및 변형된 구성을 나타낸다.

도 63은 실험(Xu et al., 2013)에서의 대칭(왼쪽 패널) 및 비대칭(오른쪽 패널) 변형 모드 및 적용된 인장 변형 (0 내지 300%의 ϵ)의 다양한 정도에 대한 HCM에 의한 숫자상의 결과를 나타낸다. 스케일 바는 2mm이다.

도 64는 Xu et al.(2013)의 실험에서 반영된 프랙탈 배선에 있어서, 기존의 FEA 및 HCM에서의 변형에 대한 금속 층의 최대 주변형을 나타낸다.

도 65는 배선의 동일한 총길이(16.77mm), 장치 아일랜드 사이의 간격(1.6mm), 제1차 배선의 높이(0.4mm), 폭($w=30\mu\text{m}$), 및 두께($t=3.0\mu\text{m}$)를 가지는 제1차 및 제2차 프랙탈 배선을 나타낸다.

도 66은 중앙에서 구조가 분리된 후, 제1차 직사각형(a) 및 서펜타인(b) 배선의 자유물체도를 나타낸다. 배선은

양끝에 고정되고, 변위 하중(displacement loading)을 조건으로 한다. 도면의 붉은 지점은 도식적으로 최대 변형의 지점을 나타낸다.

도 67은 분석적인 모델, 극소의 변형 기반의 FEA 및 한정된 변형 기반의 FEA에 의해 측정된 것으로써, 다양한 구조적 파라미터의 무차원적 인장성을 나타낸다: (a)는 제1차 서펜타인 배선이고; (b)는 $m(1)=8$ 및 $n(1)=2$ 에서의 제2차 서펜타인 배선이며; (c)는 $m(2)=1$ 및 $n(2)=2$ 에서의 제2차 서펜타인 배선이다. 제1차 및 제2차 구조 모두의 FEA에서, 폭은 $w=0.4l(1)$ 의 일반적인 값으로 고정된다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0016] 본 발명은 인장성의 전기적 배선, 전극 및/또는 반도체 구성요소와 같은 하나 이상의 인장성의 구성요소를 포함하는 전자 회로, 소자 및 소자 구성요소를 제공한다.
- [0017] 본 시스템 일부의 인장성은 반복가능하고 적절한 방법으로 나타나는 탄성 변형이 가능한 구성에 있어서, 연성의 탄성 재료와 인장성의 금속 또는 반도체 구조의 재료 수준의 집적을 통해 나타날 수 있다. 본 발명의 인장성의 장치 구조 및 경화-연성(hard-soft) 재료의 집적 방식은 센싱, 액츄에이션, 전력저장 및 통신을 포함하는 넓은 범위의 장치 적용을 지원하는 사전 전자적 기능 및 부합하는 역학의 조합을 제공한다. 본 발명 시스템의 향상된 기계적 물성으로 이로운 장치의 특정 단계는 자기 공명 영상과 호환되는 인장성의 전지, RF(radio frequency)안테나, 조직 장착 전자 소자(tissue mounted electronics) 및 센서를 포함한다.
- [0018] 일부 관점에서, 본 발명은 탄성 변형을 조절하기 위한 기존의 연성 및 인장성의 장치에 비해 향상된 특정 구조를 가지는 인장성 시스템의 새로운 단계를 제공한다. 예를 들어, 실시형태에 있어서 본 발명의 인장성의 금속 또는 반도체 구조는 복수의 공간 주파수에 의해 특성화되는 2차원 구조에 의한 것을 특징으로 하며, 예를 들어, 수행의 실패 또는 현저한 저하 없이 넓은 범위의 변형 모드를 지지할 수 있는 스프링 내부의 스프링(spring-within-in-spring)을 통한 전체 구조가 있을 수 있다. 본 발명의 특정 장치 구조는 인장성의 전기적 및/또는 광학 시스템의 범위에서 다용도의 장치 플랫폼을 제공함으로써, 이축 및/또는 반경방향의 변형 모드의 범위를 지지할 수 있는 구조와 같은 프랙탈(fractal) 및/또는 자기 유사성 구조를 가지는 인장성의 금속 또는 반도체 구조를 포함한다.
- [0019] 하나의 관점에서, 본 발명은 인장성을 나타내는 전자 회로를 제공한다. 실시형태에 있어서, 예를 들어, 전자회로는 탄성 기관; 및 탄성 기관에 의해 지지되는 인장성의 금속 또는 반도체 소자 구성요소; 인장성의 금속 또는 반도체 소자 구성요소는 각각 제1단위 셀 형상을 가지는 복수의 전기 전도성 요소들을 포함하며, 연속적으로 연결된 전기 전도성 요소들은 복수의 공간 주파수에 의해 특성화된 전체적인 2차원 공간 구조를 제공하는 제2형상을 가지고; 상기 금속 또는 반도체 소자 구성요소의 2차원 공간 구조는 전자회로의 인장성을 제공함으로써, 하나 이상의 면내 또는 면외 차원(방향)에 따른 탄성 변형의 조절이 가능한 것을 포함한다.
- [0020] 일 실시형태에 있어서, 예를 들어, 인장성의 금속 또는 반도체 소자 구성요소의 적어도 한 부분은 탄성 기관 또는 기관과 인장성의 금속 또는 반도체 소자 구성요소 사이에 제공되는 중간 구조와 물리적인 접촉이 있다. 일 실시형태에 있어서, 본 발명의 전자 회로는 인장성의 전자 장치, 반도체 소자, 소자 어레이(array) 또는 예를 들어, 탄성 기관에 의해 지지되는 복수의 금속 또는 반도체 소자 구성요소를 포함하는 구성요소를 포함한다.
- [0021] 실시형태에 있어서, 금속 또는 반도체 소자 구성요소의 2차원 공간 구조는, 예를 들어, 압축, 확장, 비틀림(twisting) 및/또는 굽힘(bending) 변형을 통한 전기적 수행의 실질적인 저하 또는 실패 없이 현저한 변형이 가능하다. 일 실시형태에 있어서, 예를 들어, 2차원 공간 구조는 금속 또는 반도체 소자 구성요소가 탄성 변형이 가능하도록 한다. 일 실시형태에 있어서, 예를 들어 2차원 공간 구조는 금속 또는 반도체 소자 구성요소가 이축 변형, 반경방향 변형 또는 둘다 가능하도록 한다. 일 실시형태에 있어서, 예를 들어, 2차원 공간 구조는 금속 또는 반도체 소자 구성요소가 면내 변형, 면외 변형 또는 둘다 가능하도록 한다.
- [0022] 본 발명의 시스템은 향상된 인장성을 제공하는 2차원 공간 구조의 넓은 범위를 가지는 금속 또는 반도체 소자 구성요소를 포함한다. 일부 실시형태에 있어서 2차원 공간 구조의 측면은 예를 들어, 스프링 내부의 스프링(spring-within-in-spring) 유형 구성에 제공되는 반복 패턴 또는 패턴의 패턴을 나타내는 공간 구조와 같은 자기 유사형 특성을 나타낸다. 자기 유사형 및/또는 프랙탈(fractal) 기반의 구조를 가진 본 발명 시스템의 금속 또는 반도체 소자 구성요소는 높은 충전율(fill factor) 및 유용한 기계적 인장성의 이로운 조합을 포함한다. 예를 들어, 곡면(예를 들어, 0.01mm이상, 바람직하게는 0.1mm의 곡률 반경) 및 하나 이상의 릴리프(relief) 또는 리세스된(recessed) 특성을 특징으로 하는 표면과 같은 복잡한 표면형태(complex topography)를 가지는 표면의 고면적 정각 범위(high area conformal coverage)를 제공한다. 본 발명의 일부 인장성의 전자 회로는 예를

들어, 복합적 형태학(complex morphology)에 의해 특성화된 조직 표면과 같은 생체 조직의 표면의 고면적 정각 범위(high area conformal coverage)일 수 있다.

[0023]

실시형태에 있어서, 금속 또는 반도체 소자 구성요소의 2차원 공간 구조는 제1단위 셀 형상에 관한 제1길이 규모를 가지는 제1공간 주파수 및 예를 들어, 제1단위 셀 형상을 가지는 요소들의 연속성을 이용한 제2형상에 관한 제2길이 규모를 가지는 제2공간 주파수에 의해 특성화된다. 일부 실시형태에 있어서, 제1길이 규모는 제2길이 규모와 현저히 다르다. 예를 들어, 하기 도 1C의 실시형태에 있어서, 제1길이 규모(L_1)는 제2길이 규모(L_2)의 거의 27%이고; 추가적으로, 제1길이 규모(L_1)는 제3길이 규모(L_3)의 거의 8%이다. 본 예시에서 더 일반적으로, 비율 L_N/L_{N+1} 은 0.27 및 0.34 사이로 감소하고, 이때 N은 N번째 길이 규모이다. 이러한 비율 L_N/L_{N+1} 은 일반적으로 조정될 수 있다; 하기 도 1B의 요소 111 및 112는 각각 L_N/L_{N+1} 이 거의 0.26 및 0.18일 때 자기 유사형의 구부러진 말굽(serpentine horseshoe)의 두가지 예시를 나타낸다.

[0024]

예를 들어, 일 실시형태에 있어서, 제1공간 주파수의 제1길이 규모는 제2공간 주파수의 제2길이 규모보다 적어도 2배 작다. 또한, 선택적으로 일부 실시형태에 있어서, 제1공간 주파수는 제2공간 주파수의 제2길이 규모보다 적어도 5배 작으며, 제1공간 주파수는 제2공간 주파수의 제2길이 규모보다 적어도 10배 작다. 예를 들어, 일 실시형태에 있어서, 제1공간 주파수의 제1길이 규모는 제2공간 주파수의 제2길이 규모보다 2 내지 10배 작다. 또한, 선택적으로 일부 실시형태에 있어서, 제1공간 주파수의 제1길이 규모는 제2공간 주파수의 제2길이 규모보다 3 내지 5배 작다. 특정 실시형태에 있어서, 제1공간 주파수의 제1길이 규모는 100nm 내지 1mm의 범위에서 선택되고, 제2공간 주파수의 제2길이 규모는 1 마이크로미터 내지 10mm의 범위에서 선택될 수 있다. 일 실시형태에 있어서, 복수의 공간 주파수는 power series에 의해 특징지어지는 복수의 길이 규모(예를 들어, 제 1, 2, 3 등)에 의해 추가적으로 특징지어질 수 있다.

[0025]

일부 실시형태에 있어서, 인장성의 금속 또는 반도체 소자 구성요소의 2차원 공간 구조는 둘 이상의 공간 주파수, 예를 들어, 제 3, 4, 5 등의 공간 주파수로 특징지어진다. 예를 들어, 일 실시형태에 있어서, 전기 전도성 요소들의 연속성은 제2형상을 포함하는 전기 전도성 요소들의 반복되는 시리즈를 포함하는 제 3 형상에 의해 추가적으로 특징지어진다. 실시형태에 있어서, 2차원 공간 구조는 2 내지 5 공간 주파수로 특징지어질 수 있다. 둘 이상의 공간 주파수에 의해 특징지어진 2차원 공간 구조의 사용은 향상된 면 범위, 인장성 및/또는 전기 저항, 예를 들어, 안테나 및 RF(radio frequency)소자 적용을 제공함으로써, 일부 실시형태에 있어서 이점을 나타낸다.

[0026]

실시형태에 있어서, 2차원 공간 구조는 같거나 유사한 형상(예를 들어, 단위 셀 형상으로 특징지어지는)을 가지는 요소들의 반복적인 패턴을 포함하는 공간 구조와 같은, 반복 2차원 구조이다. 일 실시형태에 있어서, 예를 들어, 전기 전도성 요소들의 연속성은 직렬 구성(serial configuration) 또는 병렬 구성(branched configuration)을 포함한다. 본 시스템에서 유용한 2차원 공간 구조는 결정성 2차원 형상 또는 임의의 2차원 형상을 가질 수 있다. 선택적으로, 일부 실시형태에 있어서, 2차원 공간 구조는 스프링 내부의 스프링(spring-within-in-spring) 구조를 가진다. 예를 들어, 실시형태에 있어서, 스프링 내부의 스프링(spring-within-in-spring) 구조는 제2형상을 각각 독립적으로 가지는 하나 이상의 제2스프링 구조를 형성하기 위하여 직렬 또는 병렬 구성으로 연결된 제1단위 셀 형상을 각각 독립적으로 가지는 제1스프링 구조의 시리즈를 포함한다. 선택적으로, 제1스프링 구조, 제2스프링 구조 또는 두 구조는 압축(compression) 스프링 구조 또는 코일(coiled) 스프링 구조를 포함한다. 일부 실시형태에 있어서, 스프링 내부의 스프링(spring-within-in-spring) 구조는 적어도 두 스프링 구조를 포함하는 2차원 구조에 의해 특징지어지며, 이때 변형에 따라 제1스프링 구조는 제2스프링 구조의 인장에 앞서 약간의 인장이 수행될 수 있다.

[0027]

일부 실시형태에 있어서, 2차원 공간 구조는 자기 유사형의 2차원 구조이다. 예를 들어, 실시형태에 있어서, 자기 유사형 2차원 구조는 제1단위 셀 형상과 유사하지만 다른 길이 규모를 가지는 제2형상으로 특징지어진다. 일부 실시형태에 있어서, 자기 유사형 2차원 구조는 제1단위 셀 형상의 길이 규모보다 적어도 2배 큰 제2형상의 길이 규모로 특징지어지며, 선택적으로 제1단위 셀 형상의 길이 규모보다 적어도 3배 큰 제2형상의 길이 규모로 특징지어질 수 있다. 예를 들어, 실시형태에 있어서, 제2형상의 길이 규모는 2 내지 20의 범위, 선택적으로는 3 내지 10의 범위에서 선택되는 요소에 의해 제1단위 셀 형상의 길이 규모보다 크다. 일 실시형태에 있어서, 자기 유사형 구조는 제1단위 셀로 구성된 하나 이상의 더 높은 순서의 패턴과 하나의 단위 셀 형상 및 전체적인 공간 구조와 유사하지만 다른 길이 규모를 가지는 제1단위 셀에 의해 특징지어진다. 일부 실시형태에 있어서, 예를 들어, 단위 셀 형상의 길이 규모 및 높은 순서 패턴의 길이 규모는 복수의 공간 주파수에 의해 특징지어진 전체

2차원 구조를 나타냄으로써, 서로의 배수이다.(예를 들어, 상수에 의해 연결되는)

- [0028] 일부 실시형태에 있어서, 자기 유사형의 2차원 구조는 제1단위 셀 형상에 관한 제1길이 규모를 가지는 제1공간 주파수, 제2형상에 관한 제2길이 규모를 가지는 제2공간 주파수 및 제3형상에 관한 제3길이 규모를 가지는 제3공간 주파수에 의해 특징지어진다. 선택적으로, 제3형상은 제1단위 셀 형상 및 제2형상과 유사하지만 다른 길이 규모를 가진다. 예를 들어, 실시형태에 있어서, 제1공간 주파수의 제1길이 규모는 제3공간 주파수의 제3길이 규모보다 3 내지 50배 작으며, 선택적으로 일부 실시형태에 있어서는, 제2공간 주파수의 제2길이 규모는 제3공간 주파수의 제3길이 규모보다 2 내지 10배 작을 수 있다. 특정 실시형태에 있어서, 제1공간 주파수의 제1길이 규모는 100nm 내지 1mm의 범위에서 선택되고, 제2공간 주파수의 제2길이 규모는 1 마이크로미터 내지 10mm의 범위에서 선택되며, 제3공간 주파수의 제3길이 규모는 10 마이크로미터 내지 100mm의 범위에서 선택된다. 실시형태에 있어서, 복수의 공간 주파수는 멍급수(power series)에 의해 특징지어지는 복수의 길이 규모(예를 들어, 제1,2,3 등)에 의해 추가적으로 특징지어질 수 있다. 또한, 본 발명의 시스템은 자기 유사형상(예를 들어, 4,5,6, 등 순서)의 높은 순서에 의해서도 특징지어지는 자기 유사형의 2차원 구조를 포함한다.
- [0029] 일부 실시형태에 있어서, 예를 들어, 2차원 공간 구조는 프랙탈(fractal) 기반의 2차원 구조이며, 예를 들어, 1 이상의 프랙탈 차원, 선택적으로는 1.3이상으로 일부 적용되는, 또한 선택적으로 1.5이상으로 일부 적용되는 프랙탈 차원에 의해 특징지어지는 프랙탈(fractal) 기반의 2차원 구조일 수 있다. 일부 실시형태에 있어서, 2차원 공간 구조는 1 내지 2의 범위에서 선택되는 프랙탈 차원에 의해 특징지어진 프랙탈(fractal) 기반의 2차원 구조이다. 인장성 금속 또는 반도체 소자 구성요소에 대한 자기 유사형 및/또는 프랙탈 기반의 2차원 구조의 사용은 기존의 서펜타인 시스템(serpentine system)에 비해 더 큰 탄성 변형을 수행할 수 있는 시스템을 제공함으로써, 이점을 가진다.
- [0030] 일부 실시형태에 있어서, 인장성 금속 또는 반도체 소자 구성요소의 2차원 공간 구조는 오직 단일 공간 주파수에 의해 특징지어지는 서펜타인(serpentine) 또는 메시(mesh) 구조를 가지지 않는다. 일부 실시형태에 있어서, 인장성 금속 또는 반도체 소자 구성요소의 2차원 공간 구조는 직사각형 또는 정사각형의 제2형상에 의해 특징지어지는 서펜타인(serpentine) 또는 메시(mesh) 구조를 가지지 않는다.
- [0031] 일부 실시형태에 있어서, 인장성 금속 또는 반도체 소자 구성요소의 2차원 공간 구조는 제1 및 2 장치 구성요소 사이의 높은 충전율(fill factor) 또는 전자회로의 활성영역에 대한 높은 충전율(fill factor)을 제공한다. 예를 들어, 상기 충전율은 25%이상이거나, 선택적으로 일부 적용에서는 50%이상, 선택적으로 다른 적용에서는 70% 이상의 수치를 가질 수 있다. 예를 들어, 일부 실시형태에 있어서, 인장성 금속 또는 반도체 소자 구성요소의 2차원 공간 구조는 제1 및 2 장치 구성요소 사이의 충전율을 제공하거나 25% 내지 90%의 범위, 선택적으로는 일부에서 적용되는 50% 내지 90%의 범위에서 선택되는 전자회로의 활성영역에 대하여 제공될 수 있다.
- [0032] 본 발명의 실시형태는 서로의 전기적 통신에 제공되는 하나 또는 다중 구조를 이용한다. 예를 들어, 일 실시형태에 있어서 다수의 구성요소들은 전자회로, 장치 또는 장치 구성요소의 둘 이상의 구성요소 사이에 전기적 통신을 제공하기 위하여 직렬 구성(serial configuration) 또는 병렬 구성(branched configuration)에 제공된다. 일부 실시형태로써, 전기적 통신은 복수의 공간 주파수에 의해 특징지어지는 2차원 구조를 각각 독립적으로 가지는 하나 이상의 전도성 또는 반도체성 요소에 의해 제공된다. 일부 실시형태에 있어서, 본 발명의 전자회로의 유연성, 제조성, 신뢰도는 유니터리(unitary)구조와 같은 단일 연속 구조 또는 개별적 유니터리(unitary)구조와 같은 복수의 개별 연속 구조의 사용에 의해 향상될 수 있다. 다중 구조의 사용은 선택적으로 다른 실시형태에 있어서 유연성 및 제조성의 향상을 제공할 수 있다. 예를 들어, 일부 실시형태에 있어서, 단일 단위-셀 타입의 구조는 많은 양으로 제조되고, 전자회로 제2형상을 제공하기 위해 나중에 시리즈(series) 또는 연속적으로 제조된다. 다른 실시형태에 있어서, 다수의 개별 단위 셀 구조는 제2형상에 의해 특징지어지는 더 큰 전자회로를 생성하기 위해 제조된다.
- [0033] 실시형태에 있어서, 예를 들어, 금속 또는 반도체 소자 구성요소의 전기 전도성 요소는 연속적인 구조를 포함한다. 예를 들어, 실시형태에 있어서, 금속 또는 반도체 소자 구성요소의 전기 전도성 요소는 금속 또는 반도체 재료를 포함하는 모노리식(monolithic)구조와 같은, 단일 유니터리(unitary)구조를 포함한다. 일 실시형태에 있어서, 예를 들어, 금속 또는 반도체 소자 구성요소의 전기 전도성 요소는 하나 이상의 박막 구조를 포함할 수 있으며, 예를 들어, 박막 구조는 증착(물리적 기상 증착, 화학 기상 증착, 원자층 증착, 등), 에피택셜 성장(epitaxial growth) 및/또는 프린팅-기반의 제조기술에 의해 생성된다. 일 실시형태로, 예를 들어, 금속 또는 반도체 소자 구성요소의 전기 전도성 요소는 연속 및 모노리식(monolithic) 박막구조를 포함한다.
- [0034] 일부 실시형태에 있어서, 전기 전도성 요소들은 하나 이상의: 탄성 기반에 의해 적어도 부분적으로 지지되는 프

리스탠딩(free standing)구조; 탄성 기관과 적어도 부분적으로 연결되는 결합(tethered)구조; 탄성 기관과 적어도 부분적으로 결합되어 있는 결합(bound) 구조; 탄성 기관 또는 기관에 의해 지지되는 내장형 층에 적어도 부분적으로 내장된 임베디드(embedded) 구조; 또는

[0035] 유체 수용 또는 고체 수용과 물리적인 접촉이 있는 격납(containment) 구조내부의 구조일 수 있다. 일부 실시형태에 있어서, 전기 전도성 요소의 일부분(예를 들어, 10%이하)만이 탄성 기관 또는 인장성의 금속 또는 반도체 소자 구성요소와 탄성 기관 사이에 제공된 중간 구조에 결합된다. 일부 실시형태에 있어서, 금속 또는 반도체 소자 구성요소의 전기 전도성 요소의 적어도 일부분은 격납(containment) 구조 내부에 제공된다. 예를 들어, 낮은 탄성계수(Young's modulus, 예를 들어, 1MPa 이하, 또는 0.5MPa 이하, 또는 200KPa이하의 탄성계수)를 가지는 유체 수용 또는 고체 수용 재료를 가지는 격납 구조일 수 있다. 본 발명의 격납구조는 유체 수용 또는 고체 수용을 조정함으로써, 어레이(array)되는 기관 및 상부덮개(슈퍼스트레이트, superstrate)에 의해 형성되는 구조를 포함한다. 일부 실시형태에 있어서, 본 발명의 장치 및 장치 구성요소는 기관 및 금속 또는 반도체 소자 구성요소 사이에 제공되는 낮은 탄성계수 중간층(예를 들어, 1MPa 이하, 또는 0.5MPa 이하, 또는 200KPa이하의 탄성계수)을 추가적으로 포함할 수 있다. 이때 선택적으로 금속 또는 반도체 소자 구성요소와 적어도 부분적으로 물리적 접촉 또는 결합이 있을 수 있다. 이러한 관점의 일 실시형태에 있어서, 낮은 탄성계수 중간층은 1000 μm 이하, 또는 500 μm 이하, 또는 250 μm 이하, 또는 100 μm 이하의 두께를 가진다.

[0036] 넓은 범위의 재료를 포함하고 넓은 범위의 물리적 특성을 가지는 전기 전도성 요소들은 본 발명에 있어서, 유용하다. 특정 실시형태에 있어서, 전기 전도성 요소들의 각각은 독립적으로 10nm 내지 1mm의 범위에서 선택된 두께를 가지며, 선택적으로 10nm 내지 100 μm 의 범위에서 선택되어 일부 적용될 수 있고, 선택적으로 10nm 내지 10 μm 의 범위에서 선택되어 일부 적용될 수 있다. 일부 실시형태에 있어서, 전기 전도성 요소들의 각각은 독립적으로 1 마이크로미터 이하의 두께를 가질 수 있으며, 선택적으로 500nm이하의 두께가 적용될 수 있다. 선택적으로, 전기 전도성 요소들의 각 단위 셀 형상은 100nm 내지 10mm의 범위에서 선택되는 수평적 수치(예를 들어, 길이, 폭, 반경 등)에 의해 독립적으로 특징지어진다.

[0037] 일부 실시형태에 있어서, 본 발명 시스템의 인장성의 금속 또는 반도체 소자 구성요소들은 0.1 μm 내지 100cm의 범위에서 독립적으로 선택되는 제1 및 2 말단 사이의 경로길이(pathlength)에 의해 특징지어지며, 선택적으로는 1 μm 내지 1mm의 범위에서 선택되는 경로길이가 일부 실시형태에 적용될 수 있다. 본 발명에서 사용되는 것과 같이, 경로길이(pathlength)는 2차원 공간구조를 추적하는 인장성의 금속 또는 반도체 소자 구성요소의 경로에 따른 제1 및 2 말단 사이의 최단 거리를 나타낸다. 예를 들어, 제1 및 2 배선 장치 구성요소로부터 인장성의 배선 지점의 우회 경로에 따르거나, 인장성 전극의 제1 및 2 말단으로부터의 우회 경로에 따를 수 있다. 일 실시형태에 있어서, 예를 들어, 하나 이상의 전기적 배선은 0.1 μm 내지 100cm의 범위에서 선택되는 직선거리에 의해 분리되는 두 접속점 사이에 전기적 연결을 제공할 수 있다. 일 실시형태에 있어서, 인장성의 금속 또는 반도체 소자 구성요소는 제1 및 2 접속점 사이에 전기적 연결을 제공하며, 제1 및 2 접속점 사이의 최단 직선길이보다 적어도 2배 증가한 경로길이를 독립적으로 가진다. 또한, 선택적으로 제1 및 2 접속점 사이의 최단 직선길이보다 적어도 4배 증가한 경로길이를 가질 수 있다. 일 실시형태에 있어서, 인장성의 금속 또는 반도체 소자 구성요소는 제1 및 2 접속점 사이에 전기적 연결을 제공하고, 제1 및 2 접속점 사이의 최단 직선 길이보다 2 내지 6배 증가한 경로길이를 독립적으로 가질 수 있다.

[0038] 실시형태에 있어서, 전기 전도성 요소는 와이어(wire), 리본(ribbon) 또는 나노막막(nanomembrane)을 포함한다. 일부 실시형태에 있어서, 전기 전도성 요소들은 금속, 합금, 단결정형 무기 반도체 또는 비정질 무기 반도체를 독립적으로 포함할 수 있다. 전기 전도성 요소에 대한 단결정형 재료, 도핑된 재료(doped materials) 및/또는 고순도의 재료(예를 들어, 99.9%이상, 선택적으로 99.99% 및 선택적으로 99.999%의 순도)의 사용은 특정 장치 실시형태에 유용하다. 특정 실시형태에 있어서, 전기 전도성 요소의 제1단위 셀 형상은 스프링, 폴드(fold), 루프(loop), 메시(mesh) 또는 이들의 조합을 포함할 수 있다.

[0039] 일부 실시형태에 있어서, 예를 들어, 제1단위 셀 형상은 대향 부분(opposing segments), 인접 부분(adjacent segments) 또는 대향 및 인접 부분의 조합과 같은 복수의 공간 오프셋(offset) 형상을 포함한다. 예를 들어, 일 실시형태에 있어서, 제1단위 셀 형상의 공간 오프셋 형상은 복수의 볼록부분(convex segments), 오목부분(concave segments), 원형부분, 타원형부분, 삼각형부분, 직사각형부분, 정사각형부분, 또는 이들의 조합을 포함할 수 있다. 선택적으로, 단위 셀 형상의 볼록부분(convex segments), 오목부분(concave segments), 원형부분, 타원형부분, 삼각형부분, 직사각형부분 또는 정사각형부분은 하나 이상의 직선부분에 의해 분리된다. 제1단위 셀의 공간 오프셋 형상은 전체적인 면내 구조에 제공될 수 있으며, 상기 형상은 기관의 표면을 지지하는 것에 평행한 면 내에 공간적 변화를 제공할 수 있다. 선택적으로, 제1단위 셀의 공간 오프셋 형상은 전체적인 면

외 구조에 제공될 수 있으며, 상기 형상은 기관의 표면을 지지하는 것에 직교인 면 내에 공간적 변화를 제공할 수 있다. 실시형태에 있어서, 전기 전도성 요소의 제1단위 셀 형상은 코흐 곡선(von Koch curve), 페아노 곡선(Peano curve), 힐버트 곡선(Hilbert curve), 무어 곡선(Moore curve), Vicsek 프랙탈(fractal), 정십자형(Greek cross) 또는 이들의 조합의 하나 이상을 포함하는 군으로부터 선택될 수 있다.

[0040]

특정 실시형태에 있어서, 예를 들어, 인장성의 금속 또는 반도체 소자 구성요소는 복수의 곡선 모양의 형상(curved features)에 의해 특징지어지는 곡선 모양의 구성(curved configuration)을 가지며, 선택적으로 지지 기관에 평행하는 면 내에 제공되며, 예를 들어, 주기적(periodic), 서펜타인(serpentine), 메시(mesh)의 분기된(branched)구조에 제공될 수 있다. 특정 실시형태에 있어서, 예를 들어, 인장성의 금속 또는 반도체 소자 구성요소는 전극 또는 전극 어레이(array)를 포함한다. 일 실시형태에 있어서, 전극 또는 전극 어레이(array)는 센서(sensor), 액추에이터(actuator), 또는 RF(radio frequency)소자의 구성요소이다. 일 실시형태에 있어서, 예를 들어, 전극 또는 전극 어레이(array)는 25% 내지 90%의 범위에서 선택되는 전자 회로의 활성 영역에 대한 충전율(fill factor)을 제공하며, 선택적으로는, 50% 내지 90%의 범위에서 일부 적용되고, 70% 내지 90%에서 일부 적용될 수 있다.

[0041]

본 발명의 일부 전자회로 실시형태는 다른 전자회로 및/또는 회로 구성요소들 사이에 전기적 통신을 제공하는 데에 이용될 수 있다. 예를 들어, 실시형태에 있어서, 인장성의 금속 또는 반도체 소자 구성요소는 하나 이상의 전기적 배선을 포함한다. 본 발명의 실시형태의 전자회로의 전기적 배선으로의 사용은 본 발명 실시형태의 전자회로의 측면에 기존의 또는 리지드(rigid)회로 구성요소 사이의 상호접속점으로써, 이로인 인장성을 제공함에 의해 기존의 또는 리지드(rigid)회로에 인장성을 제공할 수 있다. 예를 들어, 일부 실시형태에 있어서, 전자회로는 하나 이상의 리지드 아일랜드(rigid island)를 추가적으로 포함할 수 있으며, 하나 이상의 전기적 배선의 적어도 일부분은 하나 이상의 리지드 아일랜드(rigid island)와 전기적으로 접속할 수 있다. 일 실시형태에 있어서, 예를 들어, 리지드 아일랜드(rigid island) 구조는 무기 반도체 소자 또는 소자 구성요소를 포함한다. 실시형태에 있어서, 전자회로는 리지드 아일랜드(rigid island) 구조 각각과 전기적으로 접촉하여, 복수의 인장성 금속 또는 반도체 소자 구성요소를 추가적으로 포함할 수 있다. 예를 들어, 실시형태에 있어서, 무기 반도체 소자 또는 소자 구성요소는 트랜지스터(transistor), 다이오드(diode), 증폭기, 멀티플렉서(multiplexer), 발광다이오드, 레이저, 포토다이오드(photodiode), 집적 회로, 센서, 온도 센서, 서미스터(thermistor), 히터, 저항성 히터, 액추에이터(actuator) 또는 이들의 조합을 포함한다.

[0042]

다양한 탄성 기관은 시스템의 전자회로 구성요소에 대한 지지 및 인장성을 제공하기 위한 본 발명의 실시형태에 유용하다. 특정 실시형태에 있어서, 탄성 기관은 0.25 μm 내지 10,000 μm 의 범위에서 선택되는 평균 두께를 가지며, 선택적으로는 10 μm 내지 1,000 μm 의 범위에서 선택되는 평균 두께로 일부 적용될 수 있다. 예를 들어, 일 실시형태에 있어서, 탄성기관은 1000 μm 이하의 평균 두께를 가질 수 있다. 선택적으로, 탄성 기관은 사전변형된 탄성 기관일 수 있다. 유용한 탄성 기관은 0.5KPa 내지 100GPa의 범위에서 선택된 탄성계수(Young's modulus)를 가지는 것을 포함할 수 있으며, 선택적으로는 10KPa 내지 100MPa의 범위에서 선택되는 탄성계수, 또한 선택적으로는 50KPa 내지 10MPa의 범위에서 선택되는 탄성계수로 일부 적용될 수 있다. 유용한 탄성 기관은 1MPa이하, 또는 0.5MPa이하, 또는 200KPa이하의 탄성계수(Young's modulus)를 가지는 것을 포함할 수 있다. 유용한 탄성 기관은 $0.1 \times 10^4 \text{ GPa } \mu\text{m}^4$ 내지 $1 \times 10^9 \text{ GPa } \mu\text{m}^4$ 의 범위에서 선택되는 순굽힘 강성(net bending stiffness)을 가지는 것을 포함할 수 있다. 특정 실시형태에 있어서, 탄성 기관은 고분자, 무기 고분자, 유기 고분자, 플라스틱, 탄성재(elastomer), 생체고분자(biopolymer), 열경화성(thermoset), 러버 실크(rubber silk) 및 이들의 조합을 포함하는 군으로부터 선택된 재료를 포함한다. 일 실시형태에 있어서, 탄성 기관은 실리콘과 같은 유기규소(organosilicon) 화합물을 포함할 수 있다. 일 실시형태에 있어서, 탄성 기관은 폴리디메틸실록산(PDMS, polydimethylsiloxane)을 포함할 수 있다.

[0043]

본 발명은 광학, 전기적, 열적, 기계적 및 화학적 센싱(sensing) 및/또는 액추에이션(actuation)을 포함하는 장치 적용의 범위에 대한 시스템 및 구성요소를 제공한다. 예를 들어, 다양한 실시형태에 있어서, 본 관점의 전자회로는 하나 이상의 에너지 저장소자, 광소자, 광센서, 변형률 센서, 전자 센서, 온도센서, 화학적 센서, 액추에이터, 통신 장치, 미세 또는 나노 유체 소자, 집적 회로 또는 이들의 구성요소를 포함할 수 있다. 특정 실시형태에 있어서, 전자회로는 조직 장착 전기적 소자(tissue mounted electronic device), RF(radio frequency) 안테나 또는 자기 공명 영상과 호환하는 센서를 포함할 수 있다.

[0044]

본 발명의 적절하게 구조적으로 설계된 및/또는 구성된 회로 실시형태는 기존과 다른 상태 및/또는 전자 장치가 일반적으로 요구되지 않고, 호환성이 없는 때 및/또는 수행불가능할 때에 본 발명의 전자회로를 사용할 수 있다

록 제공한다. 예를 들어, 본 발명의 특정 실시형태의 전자회로는 자기 공명 영상과 호환되는 특성을 나타낸다. 그러한 실시형태는 자기 공명 영상 측정이 준비 및/또는 형성될 때에 본 발명의 전자회로 실시형태와 접속하는 조직(tissue)과 같은 재료의 특성을 측정 및/또는 조절할 수 있도록 제공한다. 하나의 관점에서, 예를 들어, 본 발명은 자기 공명 영상과 호환되는 전자 센서를 제공한다. 본 관점의 특정 실시형태는 탄성 기관; 및 탄성 기관에 의해 지지되는 인장성의 전극 어레이(array); 각각 제1단위 셀 형상을 가지는 복수의 전기 전도성 요소를 포함하는 전극 어레이(array), 복수의 공간 주파수로 특징지어지는 전체 2차원 공간 구조를 제공하는 제2형상을 가지는 연속적으로 연결된 전기 전도성 요소; 1MHz 내지 100GHz의 범위에서 선택되는 주파수를 가지는 RF(radio frequency) 전자기 복사에 주로 투명한(예를 들어, 0.1미만의 흡수, 선택적으로 일부 실시형태에 있어서는 0.05 미만 및 0.01미만의 흡수) 인장성의 전극 어레이(array), 및 상기 전자 센서의 인장성을 제공하는 하나 이상의 면내 또는 면외 차원에 대해 탄성 변형을 조절할 수 있는 상기 인장성의 전극 어레이(array)의 상기 2차원 공간 구조를 포함하는 자기 공명 영상에 적합한 전자 센서를 포함한다. 일부 실시형태에 있어서, 예를 들어, 인장성의 전극 어레이(array)는 전극 패드 내에 페루프(closed loop)가 없는 것과 같이 전자 센서의 활성 영역에 대한 페루프(closed loop) 구조를 포함하지 않는다. 특정 실시형태에 있어서, 인장성의 전극 어레이(array)는 자기 공명 영상과 결합하여 사용할 때 나타날 수 있는 왜곡(distortion) 또는 가림(shadowing)이 나타나지 않는다. 실시형태에 있어서, 예를 들어, 자기 공명 영상은 100 내지 300 MHz의 범위에서 선택되는 주파수를 가지는 RF 펄스(pulse)에 대한 전자 센서의 노광을 포함한다.

[0045]

본 발명은 다수의 개별적 주소지정가능(addressable) 및 선택적으로는 전기적으로 분리된 회로 구성요소 또는 전자장치와 같은 어레이(array)에 제공되는 복수의 전자 장치 또는 장치 구성요소를 포함하는 인장성의 회로를 포함한다. 어레이(array) 구조의 사용은 본 발명의 전자회로를 제공하며, 실시형태에 있어서, 샘플(sample) 또는 조직(tissue)의 표면의 개별 특정 영역과 같은 넓은 영역 또는 표면과 접속할 수 있도록 한다. 하나의 관점에서, 본 발명은 개체(object) 또는 조직(tissue)에 걸친 복수의 영역과 접속하는데 유용한 전극 어레이(array)를 제공한다. 특정 실시형태에 있어서, 전극 어레이(array)는 탄성 기관에 의해 지지되는 복수의 인장성의 금속 또는 반도체 소자 구성요소, 제1단위 셀 형상을 각각 가지는 복수의 전기 전도성 요소들을 독립적으로 포함하는 인장성의 금속 또는 반도체 소자 구성요소, 복수의 공간 주파수로 특징지어지는 전체 2차원 공간 구조를 제공하는 제2형상을 가지면서 연속적이면서 각각 독립적으로 연결된 인장성의 금속 또는 반도체 소자 구성요소의 전기 전도성 요소; 전극 배열의 활성 영역에 50% 이상의 충전율(fill factor)을 제공하는 복수의 인장성 금속 또는 반도체 소자 구성요소; 및 전극 배열의 인장성을 제공함으로써, 하나 이상의 면내 또는 면외 차원에 대한 탄성 변형의 조절이 가능한 금속 또는 반도체 소자 구성요소의 2차원 공간 구조를 포함하는 전극 배열을 포함한다.

[0046]

또한, 본 발명의 실시형태는 본 발명의 전자회로 실시형태를 포함하는 장치와 같은 인장성의 전자장치를 제공한다. 예를 들어, 자기 유사형 구조 및/또는 더 큰 전자장치에의 2차원 공간 주파수를 포함하는 전자회로는 향상된 인장성과 같은 장점을 가진 전자장치를 선택적으로 제공할 수 있다. 실시형태에 있어서, 인장성의 장치는 장치의 전체적인 구성에 이로운 인장성의 측면을 제공하는 구성에서, 리지드(rigid) 및/또는 기존의 회로 또는 회로 구성요소 및 유연성/인장성의 구성요소 모두를 포함할 수 있다. 예를 들어, 실시형태에 있어서, 본 발명은 전자회로 및 장치를 포함하는 전자장치와 같은 인장성의 전자장치를 제공한다.

[0047]

하나의 관점에서, 인장성의 전자장치는 탄성 기관에 의해 지지되는 복수의 리지드 아일랜드(rigid island)구조; 무기 반도체 소자 또는 소자 구성요소를 각각 독립적으로 포함하는 리지드 아일랜드(rigid island)구조; 리지드 아일랜드(rigid island)구조의 적어도 한 부분과 전기적으로 상호접속하는 복수의 인장성 금속 또는 반도체 소자 구성요소, 제1단위 셀 형상을 각각 가지는 복수의 전기 전도성 요소들을 독립적으로 포함하는 인장성의 금속 또는 반도체 소자 구성요소, 복수의 공간 주파수로 특징지어지는 전체 2차원 공간 구조를 제공하는 제2형상을 가지면서 연속적이면서 각각 독립적으로 연결된 인장성의 금속 또는 반도체 소자 구성요소의 전기 전도성 요소; 인장성의 전자 장치를 제공함으로써, 하나 이상의 면내 또는 면외 차원에 대한 탄성 변형의 조절이 가능한 금속 또는 반도체 소자 구성요소의 2차원 공간 구조를 포함하는 인장성의 전자 장치를 포함한다.

[0048]

특정 이론에 의해 제한되는 사항 없이, 본 발명에 나타난 장치 및 방법과 관련된 근본적인 원칙의 이해 또는 의견이 본 발명에서 논의될 수 있다. 기계적인 설명 또는 가설의 근본적인 정확성에 관계가 없다고 하더라도 본 발명의 실시형태는 실시되거나 유용할 수 있다.

[0049]

일반적으로, 본 발명에서 사용되는 용어 및 구문은 본 기술분야에 알려진 의미를 가지며, 당해 분야에 알려진 일반적인 내용, 학술 참조 및 문맥을 통해 참조에 의해 알 수 있다. 하기의 정의들은 본 발명의 문맥에서 특정

사용을 명확히 하기 위해 제공된다.

- [0050] "2차원 공간 구조"는 물체의 표면 또는 기관을 가로지르는 또는 평면을 정의하는 두 축과 같이, 두 독립된 축을 따라 분포되는 것과 같은 공간에서 재료, 구조 또는 구성요소의 배열을 나타낸다. 실시형태에 있어서, 2차원 공간 구조를 가지는 물체는 x-y 평면에서와 같은 2차원의 각각의 길이를 따라 적어도 부분을 가로지르는 재료, 구조 또는 구성요소를 포함한다. 본 발명에서 사용된 "2차원 공간 구조"는 공간에서 두 지점 사이를 직접적으로 늘리는 선 또는 재료의 박막에 관한 공간과 같은 1차원 구조와 구별된다. 실시형태에 있어서, 2차원 공간 구조는 표면을 가로지르는 등각법(conformal manner), 예를 들어, 평면 또는 비평면 표면에서 재료, 구조 또는 구성요소의 배열을 포함한다.
- [0051] "복수의 공간 주파수를 특징으로 하는 2차원 공간 구조"는 독립적인 두 축을 따라 분포되는 공간 내의 재료, 구조 또는 구성요소의 배열을 나타내고, 이때 재료, 구조 또는 구성요소들은 적어도 다른 길이 규모를 특징으로 하는 주기적 또는 반복되는 공간적 구성요소에 의해 특징지어진다. 실시형태에 있어서, 복수의 공간 주파수는 제1차, 단위-셀 또는 짧은 범위의 길이 규모, 제2차, 제2형상 또는 더 긴 범위의 길이 규모, 제3차, 제3형상 또는 긴 범위의 길이 규모, 등과 같은 복수의 길이 규모를 특징으로 한다. 일부 실시형태에 있어서, 2차원 공간 구조의 복수의 공간 주파수는 둘 이상의 최대로 특징지어지는 재료의 공간적 분포를 나오게 하는 푸리에 변환 분석과 같은 2차원 공간 구조에서 배열된 재료의 공간적 분포의 주파수 분석에 의해 특징지어질 수 있다. 실시형태에 있어서, 복수의 공간 주파수를 특징으로 하는 2차원 공간 구조는 자기 유사형 구조, 프랙탈 구조, 1 및 2사이의 프랙탈 차원을 가지는 구조, 선택적으로 1.3 및 2 사이의 프랙탈 차원을 가지는 구조를 포함하나, 이에 제한되는 것은 아니다. 실시형태에 있어서, 복수의 공간 주파수를 특징으로 하는 2차원 공간 구조는 스프링 내부의 스프링 유형의 구조를 포함할 수 있으나, 이에 제한되는 것은 아니다.
- [0052] "프랙탈 기반의 2차원 구조"는 하나 이상의 결정형 프랙탈 패턴을 기반으로 하거나 도출된 인장성의 금속 또는 반도체 소자 구성요소의 2차원 구조를 나타낸다. 본 발명의 프랙탈 기반의 구조에 대한 유용한 프랙탈 패턴은 페아노(Peano), Vicsek, 정십자형(Greek cross), 및 힐버트 프랙탈(Hilbert fractal)을 포함할 수 있으나, 이에 제한되는 것은 아니다. 프랙탈 기반의 구조의 공간적 레이아웃은, 예를 들어, 레이아웃 설계 법칙으로써 선, 주변(perimeter) 또는 형상(부분적으로 또는 전체적으로)을 사용하는 하나 이상의 프랙탈 패턴의 특성을 포함한다. 프랙탈 기반의 구조는 인장성 및/또는 충진율과 같은 전체적인 기계적 또는 다른 물리적 특성을 향상시키기 위하여 프랙탈 패턴의 변형을 선택적으로 포함할 수 있다. 예를 들어, 서펜타인 구조에 있어서 프랙탈 패턴의 루프(loop) 또는 직선으로 프랙탈 패턴의 샤프 코너(sharp corners)를 대체하는 것에 의해 향상시킬 수 있다. 실시형태에 있어서, 본 발명에서 유용한 프랙탈 기반의 구조는 1.2 내지 2의 범위에서 선택되는 근사 프랙탈 차원에 의해 특징지어진다. 실시형태에 있어서, 본 발명에서 유용한 프랙탈 기반의 구조는 다수의 길이규모에 의한 더 높은 차수의 프랙탈 패턴으로 특징지어지는 정확하거나 근사의 반복적인 법칙에 의해 정의되는 공간적 특성을 가진다. 예를 들어, 만약 제N차 반복 패턴이 길이 규모 L_N 을 가지고, 제N-1차 반복 패턴이 길이 규모 L_{N-1} 을 가지면, 모든 N's에 대한 평균비 L_N/L_{N-1} 은 A이고, 주어진 N에 대한 비율 L_N/L_{N-1} 은 A의 $\pm 30\%$ 로 감소한다. 일부 실시형태의 프랙탈 기반 구조는 더 큰 프랙탈 패턴을 형성하기 위해서 둘 이상의 기본 프랙탈 패턴을 선 또는 메시에 결합한다.(예를 들어, 도 3C에서 나타난다.)
- [0053] "충진율"은 재료, 요소 및/또는 장치 구성요소에 의해 채워지고 또는 상기 요소들을 지지하는 제1 및 2차 전기적 접속점, 장치 아일랜드 또는 접속패드와 같은 두 요소 사이의 공간의 퍼센트를 나타낸다. 실시형태에 있어서, 예를 들어, 충진율은 하나 이상의 인장성 금속 또는 반도체 소자 구성요소를 지지하는 (그리고 선택적으로 물리적인 접촉이 있는) 탄성 기관의 표면 또는 이에 의해 제공된 층과 같은 표면의 부분의 퍼센트를 나타낸다. 실시형태에 있어서, 예를 들어, 충진율은 하나 이상의 인장성 금속 또는 반도체 소자 구성요소를 지지하는 (그리고 선택적으로 물리적인 접촉이 있는) 장치의 활성 영역의 부분의 퍼센트를 나타낸다. 실시형태에 있어서, 예를 들어, 충진율은 하나 이상의 인장성 금속 또는 반도체 소자 구성요소를 지지하는 (그리고 선택적으로 물리적인 접촉이 있는) 반도체 소자 구성요소 또는 장치와 같은 두 장치 아일랜드 사이에서 확장된 표면의 퍼센트를 나타낸다. 실시형태에 있어서, 예를 들어, 충진율은 하나 이상의 인장성 금속 또는 반도체 소자 구성요소를 지지하는 제1차 및 제2차 전기적 접속점 또는 접속 패드와 같은 두 요소들 사이에 확장된 표면의 부분 구역의 퍼센트를 나타낸다.
- [0054] "기능층"은 장치에 일부 기능성을 주는 층을 나타낸다. 예를 들어, 기능층은 반도체 구성요소를 포함할 수 있다. 선택적으로, 기능층은 지지층에 의해 분리되는 다수의 반도체 층과 같은 다층을 포함할 수 있다. 기능층은 하기 전극 또는 아일랜드 또는 그 사이에 수행되는 배선과 같은 복수의 패턴화된 요소들을 포함할 수 있다. 기능층은 동질일 수 있거나 동질이 아닌 하나 이상의 특성 또는 재료를 포함할 수 있다. "동질이 아닌 특성"은

다층의 장치 내에 중립의 기계적 평면의 지점에 영향을 줌으로써, 공간적으로 다를 수 있는 물리적 파라미터를 나타낸다.

[0055] "구조층"은 예를 들어 장치 구성요소를 지지 및/또는 밀봉 및/또는 구분하는 것에 의해 구조적 기능성을 주는 층을 나타낸다.

[0056] "반도체"는 매우 낮은 온도에서 절연체인 재료이지만, 약 300K의 온도에서 감지할 수 있는 전기적 전도성을 가진 재료를 나타낸다. 본 발명에서, 반도체 용어의 사용은 마이크로전자 및 전자 장치의 분야에서의 용어 사용과 일치한다. 유용한 반도체는 실리콘, 게르마늄 및 다이아몬드와 같은 기본적인 반도체, 및 탄화규소(SiC) 및 실리콘 게르마늄(SiGe)과 같은 4족 화합물 반도체, AlSb, AlAs, AlN, AlP, BN, BP, BAs, GaSb, GaAs, GaN, GaP, InSb, InAs, InN와 같은 3-5족 반도체, $Al_xGa_{1-x}As$ 와 같은 3-5족 3차 반도체, CsSe, CdS, CdTe, ZnO, ZnSe, ZnS, 및 ZnTe와 같은 2-6족 반도체, CuCl과 같은 1-7족 반도체, PbS, PbTe, 및 SnS와 같은 4-6족 반도체, PbI₂, MoS₂, 및 GaSe과 같은 층 반도체, 및 CuO 및 Cu₂O와 같은 옥사이드 반도체를 포함할 수 있다. 용어 반도체는 주어진 적용 또는 장치에 유용한 이로운 전기적 특성을 제공하기 위하여, p-타입의 도핑 재료 및 n-타입의 도핑 재료를 가지는 반도체를 포함하는 하나 이상의 선택된 재료로 도핑된 고유의 반도체 및 비고유의 반도체를 포함한다. 용어 반도체는 반도체 및/또는 도판트(dopants)의 혼합물을 포함하는 구성요소 재료를 포함한다. 일부 실시형태에 유용한 특정 반도체 재료는 Si, Ge, Se, diamond, fullerenes, SiC, SiGe, SiO, SiO₂, SiN, AlSb, AlAs, AlIn, AlN, AlP, AlS, BN, BP, BAs, As₂S₃, GaSb, GaAs, GaN, GaP, GaSe, InSb, InAs, InN, InP, CsSe, CdS, CdSe, CdTe, Cd₃P₂, Cd₃As₂, Cd₃Sb₂, ZnO, ZnSe, ZnS, ZnTe, Zn₃P₂, Zn₃As₂, Zn₃Sb₂, ZnSiP₂, CuCl, PbS, PbSe, PbTe, FeO, FeS₂, NiO, EuO, EuS, PtSi, TlBr, CrBr₃, SnS, SnTe, PbI₂, MoS₂, GaSe, CuO, Cu₂O, HgS, HgSe, HgTe, HgI₂, MgS, MgSe, MgTe, CaS, CaSe, SrS, SrTe, BaS, BaSe, BaTe, SnO₂, TiO, TiO₂, Bi₂S₃, Bi₂O₃, Bi₂Te₃, BiI₃, UO₂, UO₃, AgGaS₂, PbMnTe, BaTiO₃, SrTiO₃, LiNbO₃, La₂CuO₄, La_{0.7}Ca_{0.3}MnO₃, CdZnTe, CdMnTe, CuInSe₂, copper indium gallium selenide (CIGS), HgCdTe, HgZnTe, HgZnSe, PbSnTe, Tl₂SnTe₅, Tl₂GeTe₅, AlGaAs, AlGaN, AlGaP, AlInAs, AlInSb, AlInP, AlInAsP, AlGaAsN, GaAsP, GaAsN, GaMnAs, GaAsSbN, GaInAs, GaInP, AlGaAsSb, AlGaAsP, AlGaInP, GaInAsP, InGaAs, InGaP, InGaN, InAsSb, InGaSb, InMnAs, InGaAsP, InGaAsN, InAlAsN, GaInNAsSb, GaInAsSbP, 및 이들의 조합을 포함하나, 이에 제한되는 것은 아니다. 다공성의 실리콘 반도체 재료는 본 발명에서 설명된 측면에서 유용하다. 반도체 재료의 불순물은 반도체 재료에 제공되는 반도체 재료 자체 또는 도판트(dopants) 외에 원자, 요소, 이온 및/또는 분자이다. 불순물은 반도체 재료의 전기적 특성에 부정적인 영향을 미칠 수 있는 반도체 재료에 존재하는 불필요한 물질이며, 산소, 탄소, 및 중금속을 포함하는 금속을 포함할 수 있으나 이에 제한되는 것은 아니다. 중금속 불순물은 구리 및 주기율표 줄에 있는 칼슘, 나트륨, 및 모든 이온, 화합물 및/또는 이들의 합성물 사이의 요소들을 포함할 수 있으나, 이에 제한되는 것은 아니다.

[0057] "반도체 구성요소"는 넓게 반도체 재료, 구성요소 또는 구조를 나타내고, 특히 고온공정을 통해 제조된 고품질의 단결정 및 다결정의 반도체, 반도체 재료, 도핑된 반도체 재료, 무기 반도체, 및 합성 반도체 재료를 포함한다. 일부 실시형태에 있어서, 예를 들어, 반도체 구성요소는 반도체 장치 또는 그 구성요소이다.

[0058] "구성요소"는 넓게 장치의 개별적인 부분을 나타내는 것으로 사용된다. "배선"은 구성요소의 하나의 예시이고, 다른 구성요소 또는 구성요소 사이의 전기적 연결을 수행할 수 있는 전기 전도성 구조를 나타낸다. 특히, 배선은 분리되어 있는 구성요소 사이에 전기적 접촉이 이루어지게 할 수 있다. 요구되는 장치 설명, 작동, 및 적용에 따라, 배선은 적합한 재료로부터 제조된다. 적합한 전도성 재료는 반도체를 포함한다. 일부 실시형태에 있어서, 예를 들어, 구성요소는 반도체 소자의 구성요소이다.

[0059] 다른 구성요소는 박막 트랜지스터(TFTs), 트랜지스터, 전극, 집적 회로, 회로 요소, 조절 요소, 마이크로프로세서(microprocessors), 변환기(transducers), 아일랜드(islands), 브릿지(bridges) 및 이들의 조합을 포함하나, 이에 제한되는 것은 아니다. 구성요소는 당해 분야에서 알려진 하나 이상의 접촉 패드와 연결될 수 있으며, 이는 금속 증착, 와이어 결합(wire bonding), 및 고형 또는 전도성 페이스트(pastes)의 적용을 예로 들 수 있다.

[0060] "중립의 기계적 평면"(NMP)은 측면, b, 및 세로길이, l, 장치의 방향에서 존재하는 가상의 평면을 나타낸다. NMP는 수직의, h, 장치의 축을 따라 더 극단의 지점에 놓여있거나 그리고 장치의 더 구부러지는 층에 존재하는 장치의 다른 평면보다 굽힘 응력(bending stress)에 영향을 덜 받는다. 따라서, NMP의 위치는 장치의 두께 및

장치의 층(들)을 형성하는 재료 모두에 의해 결정된다.

- [0061] "동위치"는 둘 이상의 물체, 평면 또는 표면의 상대적인 지점을 나타낸다. 기능층, 기관층, 또는 다른 층과 같은 층에 인접하거나 그 내부에 위치한 중립의 기계적 평면과 같은 표면을 예로 들 수 있다. 실시형태에 있어서, 중립의 기계적 평면은 층 내에 대부분의 변형-감지 층 또는 재료에 대응하여 위치한다.
- [0062] "근접한"은 둘 이상의 물체, 평면 또는 표면의 상대적인 위치를 나타내며, 변형-감지 재료의 물리적 특성에 부정적인 영향없이 요구되는 동일성을 제공하면서, 기능층, 기관층, 또는 다른 층과 같은 층의 위치에 가까이 따르는 중립의 기계적 평면을 예로 들 수 있다. "변형-감지"는 상대적으로 낮은 정도의 변형에 대하여 손상되거나 균열이 있는 재료를 나타낸다. 일반적으로, 높은 변형 감지를 가지고, 결과적으로 균열된 제1층이 되기 쉬운 층은 상대적으로 부서지기 쉬운 반도체 또는 다른 변형-감지 장치 요소를 포함하는 기능성 층과 같은 기능층에 위치한다. 층에 근접한 중립의 기계적 평면은 그 층 내에 제한될 필요는 없지만, 변형-감지 장치 요소의 변형을 감소시키는 기능적 지점을 제공하기 위하여 근접하거나 충분히 가깝게 위치할 수 있다.
- [0063] "단일"은 단일의 부분이나 분리되지 않은 전체로써 형성되는 물체를 나타낸다.
- [0064] 용어 "직접 및 간접"은 다른 구성요소에 관한 하나의 구성요소, 또는 다른 장치에 관한 하나의 장치에 대한 작용 또는 물리적 위치를 나타낸다. 예를 들어, 다른 구성요소에 "직접적으로" 작용하거나 접촉하는 구성요소는 매개물로부터의 개입이 없다. 반대로, 다른 구성요소에 "간접적으로" 작용하거나 접촉하는 구성요소는 매개물을 통할 수 있다.(예를 들어, 제3구성요소)
- [0065] "전자 장치"는 일반적으로 복수의 구성요소를 포함하는 장치를 나타내며, 대면적 전자장치, 인쇄 배선 기관, 집적 회로, 부품 정렬, 전기생리학적 및/또는 생물학적 및/또는 화학적 센서, 및 물리적 센서(예를 들어, 온도, 가속, 등)를 포함한다.
- [0066] "센싱"은 물리적 및/또는 화학적 특성의 존재, 부재, 양, 규모 또는 세기를 감지하는 것을 나타낸다. 센싱에 대해 유용한 전자장치 구성요소는 전극 요소, 화학적 또는 생물학적 센서 요소, pH 센서, 가속도계, 온도 센서 및 전기 용량 센서를 포함하나, 이에 제한되는 것은 아니다.
- [0067] "아일랜드"는 복수의 반도체 구성요소를 포함하는 전자장치에 대해 상대적으로 리지드한 구성요소를 나타낸다. "브릿지"는 둘 이상의 아일랜드 또는 하나의 아일랜드가 다른 구성요소에 상호접속하는 구조를 나타낸다. 본 발명은 반도체 소자 구성요소들과 전기적으로 접촉하고, 그 사이에서 제공되는 인장성의 전기적 배선과 같은 전기적 배선을 포함하는 브릿지 구조를 가지는 전자장치를 포함한다.
- [0068] "밀봉(encapsulate)"은 적어도 부분적으로, 그리고 일부 경우에는 하나 이상의 다른 구조에 의해 완전히 둘러싸인 것과 같은 하나의 구조의 배치를 나타낸다. "부분적으로 밀봉"은 하나 이상의 다른 구조에 의해 부분적으로 둘러싸인 것과 같은 하나의 구조의 배치를 나타내며, 구조의 외부 표면의 30%, 또는 선택적으로 50%, 또는 선택적으로 90%가 하나 이상의 구조에 의해 둘러싸인 것을 예로 들 수 있다. "완전히 밀봉"은 하나 이상의 다른 구조에 의해 완전히 둘러싸인 것과 같은 하나의 구조의 배치를 나타낸다.
- [0069] "연속성"은 중단없이 연속적으로 연결되거나 접촉된 재료 또는 층을 나타낸다. 하나의 실시형태에 있어서, 장치의 연속적 층은 원래 제공된 재료 또는 층의 상당한 부분(예를 들어, 10%이상)을 제거하기 위하여 처리되지 않는다.
- [0070] "능동 회로" 및 "능동 회로도"는 특정 기능을 수행하기 위하여 구성된 하나 이상의 구성요소를 나타낸다. 유용한 능동 회로는 증폭기 회로, 멀티플렉싱(multiplexing) 회로, 전류 제한 회로, 집적 회로, 임피던스 정합 회로(impedance matching circuits), 무선 전력 획득 회로, 무선 데이터 전송 회로 및 트랜지스터 배열을 포함하나, 이에 제한되는 것은 아니다.
- [0071] "기관"은 표면을 받치거나 지지할 수 있는 것과 같은 표면을 가지는 재료, 층 또는 다른 구조를 나타내며, 하나 이상의 구성요소 또는 전자장치를 지지할 수 있다. 기관과 "결합"되어 있는 구성요소는 기관과 물리적 접촉이 있고, 결합된 기관 표면에 대하여 대체로 이동할 수 없는 구성요소를 나타낸다. 반대로, 결합되지 않은 구성요소 또는 구성요소의 부분은 기관에 대하여 상당한 이동을 할 수 있다. 실시형태에 있어서, 본 발명은 기관에 의해 지지되는 하나 이상의 프리스탠딩(free standing) 반도체 소자 구성요소를 가지는 전자장치를 포함하며, 선택적으로 기관과 물리적인 접촉이 있거나 기관에 의해 지지되는 하나 이상의 중간 구조와 물리적 접촉이 있는 전자장치를 포함할 수 있다. 실시형태에 있어서, 본 발명은 독립적으로 기관에 반도체 소자 구성요소를 연결하는 페디스탈(pedestal) 또는 페디스탈의 배열과 같은 하나 이상의 구조에 의해 지지되거나 선택적으로 결합되는

하나 이상의 고정된 반도체 소자 구성요소를 가지는 전자장치를 포함한다.

[0072] "프리스탠딩(free standing)"은 기관 또는 장치나 장치 구성요소와 기관 사이에 제공되는 중간구조에 결합되지 않지만, 지지되는 장치 또는 장치 구성요소가 있는 구성을 나타낸다. 실시형태에 있어서, 예를 들어, 기관은 프리스탠딩 장치 또는 기관에 의해 지지되는 구성요소에 대하여 이동할 수 있다. 실시형태에 있어서, 예를 들어, 프리스탠딩 장치 또는 구성요소는 프리스탠딩 장치 또는 구성요소를 지지하는 기관에 대하여 이동할 수 있다. 일부 실시형태에 있어서, 예를 들어, 장치 또는 장치 구성요소의 프리스탠딩 구성은 장치 또는 장치 구성요소로부터 기관의 이동 및/또는 변형을 분리시킨다. 일부 실시형태에 있어서, 예를 들어, 장치 또는 장치 구성요소의 프리스탠딩 구성은 기관의 연신, 압축 또는 변형에 의해 발생하는 힘을 장치 또는 장치 구성요소로부터 분리시킨다. 일부 실시형태에 있어서, 프리스탠딩 장치 또는 구성요소는 제공된 기관 표면 또는 중간구조와 반데르발스(Van der Waals) 상호작용, 쌍극자-쌍극자(dipole-dipole) 상호작용 또는 다른 비공유 결합 상호작용과 같은 결합 상호작용을 수행함에 의해 특징지어진다. 하나의 실시형태에 있어서, 프리스탠딩 장치 또는 구성요소는 지지하는 기관의 표면과 공유결합으로 결합되지 않는다.

[0073] "고정된"은 장치 또는 구성요소가 페디스탈(pedestal) 또는 페디스탈의 배열과 같은 하나 이상의 고정 구조를 통해 기관과 연결되는 구성을 나타낸다. 실시형태에 있어서, 예를 들어, 기관은 기관에 의해 지지되는 고정된 장치 또는 구성요소에 대해 이동할 수 있다. 실시형태에 있어서, 예를 들어, 고정된 장치 또는 구성요소는 고정된 장치 또는 구성요소를 지지하는 기관에 대하여 이동할 수 있다. 일부 실시형태에 있어서, 예를 들어, 장치 또는 장치 구성요소의 고정된 구성은 기관의 이동 및/또는 변형을 장치 또는 장치 구성요소로부터 분리시킨다. 일부 실시형태에 있어서, 예를 들어, 장치 또는 장치 구성요소의 고정된 구성은 기관의 연신, 압축 또는 변형에 의해 발생하는 힘을 장치 또는 장치 구성요소로부터 분리시킨다. 일부 실시형태에 있어서, 장치 또는 구성요소의 하단 표면 면적의 20% 미만, 선택적으로 5% 미만, 및 선택적으로 1% 미만이 기관과 연결된 고정 구조와 공유결합으로 결합된다.

[0074] "나노구조의 표면" 및 "마이크로구조의 표면"은 나노미터 사이즈 및 마이크로미터 사이즈의 릴리프(relief)특성을 각각 가지는 장치 표면을 나타낸다. 릴리프 특성은 장치 표면의 상당히 연속적인 평면으로부터 길이 x 를 연장한다. 구조상 평면의 양에 관한 디스크립터(quantitative descriptors)는 R_{max} , R_a , 및 평균 거칠기(R_a/R_{max})와 같은 표면 거칠기 파라미터를 포함하며, 이는 원자력 현미경(atomic force microscopy, AFM)에 의해 측정될 수 있다. R_{max} 는 가장 큰 피크(peak)와 가장 낮은 밸리(valley) 사이의 최대 높이이다. R_a 는 거칠기 곡선의 중심선으로부터 거칠기 곡선까지의 편차 절대값의 평균인 중심선 거칠기이다. 기관의 표면 또는 층은 만약 표면이 100nm이하의 R_a 값을 가진다면, 이러한 사실의 목적으로 "상당히 매끄럽다". 만약 표면이 100nm초과의 R_a 값을 가진다면, 표면은 이러한 사실의 목적으로 "구조상의 표면"으로 간주된다.

[0075] "유전체"는 비전도성 또는 절연 재료이다. 하나의 실시형태에 있어서, 무기 유전체는 탄소가 상당히 없는 유전체를 포함한다. 무기 유전체 재료의 특정 예시는 실리콘 니트라이드(silicon nitride), 실리콘 다이옥사이드(silicon dioxide) 및 비공유계이트(non-conjugated) 고분자를 포함하나, 이에 제한되는 것은 아니다.

[0076] "고분자"는 공유 화학 결합에 의해 연결된 반복되는 구조적 단위로 구성된 거대분자 또는 하나 이상의 단량체의 중합 산물을 나타내며, 높은 분자량을 특징으로 한다. 용어 고분자는 단일중합체, 또는 기본적으로 단일의 반복되는 단량체 서브단위로 구성된 중합체를 포함한다. 또한, 용어 고분자는 공중합체, 또는 기본적으로 둘 이상의 단량체 서브단위로 구성된 중합체를 포함하며, 랜덤(random), 블록(block), 교대(alternating), 분절(segmented), 그래프트(grafted), 테이퍼된(tapered) 및 다른 공중합체가 있다. 유용한 고분자는 비정질(amorphous), 준 비정질(semi-amorphous), 결정성 또는 부분적 결정적 상태일 수 있는 유기 고분자 또는 무기 고분자를 포함한다. 단량체 사슬이 연결된 가교 고분자는 특히 일부 적용에 있어 유용하다. 방법, 장치 및 구성요소에 사용할 수 있는 고분자는 플라스틱, 탄성재, 열가소성 탄성재, 탄성가소성 물질, 열가소성 물질 및 아크릴레이트(acrylates)를 포함하나, 이에 제한되는 것은 아니다. 실시형태의 고분자는 아세탈 고분자, 생분해성 고분자, 셀룰로오스 고분자, 플루오로 고분자, 나일론, 폴리아크릴로니트릴 고분자, 폴리아미드-이미드 고분자, 폴리이미드, 폴리아릴레이트, 폴리벤즈이미다졸, 폴리부틸렌, 폴리카보네이트, 폴리에스터, 폴리에테리미드, 폴리에틸렌, 폴리에틸렌 공중합체 및 변형된 폴리에틸렌, 폴리케톤, 폴리(메틸 메타크릴레이트), 폴리메틸렌, 폴리페닐렌 옥사이드 및 폴리페닐렌 설파이드, 폴리프탈아미드, 폴리프로필렌, 폴리우레탄, 스티렌계 수지, 섀폴 기반 수지, 비닐 기반의 수지, 고무(rubber) (천연 고무, 스티렌-부타디엔, 폴리부타디엔, 네오프렌, 에틸렌-프로필렌, 부틸, 니트릴, 실리콘을 포함하는), 아크릴, 나일론, 폴리카보네이트, 폴리에스터, 폴리에틸렌, 폴리프로필렌, 폴리스티렌, 폴리비닐 클로라이드, 폴리올레핀 또는 이들의 조합을 포함하나, 이에 제한되는 것은

아니다.

[0077] "탄성재 스탬프(elastomeric stamp)" 및 "탄성재 이동소자(elastomeric transfer device)"는 상호교환적으로 사용되며, 재료를 받고 이동할 수 있는 표면을 가지는 탄성 재료를 나타낸다. 실시형태의 탄성재 이동소자는 스탬프(stamps), 몰드(molds) 및 마스크(masks)를 포함한다. 이동소자는 주는 재료로부터 받는 재료로의 이동이 가능하게 하고/하거나 영향을 준다.

[0078] "탄성재"는 인장 또는 변형되고 상당히 영구적인 변형없이 원래의 형상으로 되돌아갈 수 있는 중합체의 재료를 나타낸다. 탄성재는 보통 대체로 탄성 변형을 수행한다. 유용한 탄성재는 중합체, 공중합체, 합성 재료 또는 중합체 및 공중합체의 혼합물을 포함한다. 탄성층은 적어도 하나의 탄성재를 포함하는 층을 나타낸다. 또한 탄성층은 도판트(dopants) 및 다른 비탄성 재료를 포함할 수 있다. 유용한 탄성재는 열가소성 탄성재, 스티렌계 물질, 올레핀계 물질, 폴리올레핀, 폴리우레탄 열가소성 탄성재, 폴리아미드, 합성고무, 폴리디메틸실록산(PDMS, polydimethylsiloxane), 폴리부타디엔, 폴리이소부틸렌, 폴리(스티렌-부타디엔-스티렌), 폴리우레탄, 폴리클로로프로펜 및 실리콘을 포함하나, 이에 제한되는 것은 아니다. 일부 실시형태에 있어서, 탄성재 스탬프는 탄성재를 포함한다. 실시형태의 탄성재는 폴리(디메틸실록산)(예를 들어, PDMS 및 h-PDMS), 폴리(메틸 실록산), 부분적으로 알킬화된 폴리(메틸 실록산), 폴리(알킬 메틸 실록산) 및 폴리(페닐 메틸 실록산)를 포함하는 폴리실록산, 실리콘 변형된 탄성재, 열가소성 탄성재, 스티렌계 물질, 올레핀계 물질, 폴리올레핀, 폴리우레탄 열가소성 탄성재, 폴리아미드, 합성고무, 폴리이소부틸렌, 폴리(스티렌-부타디엔-스티렌), 폴리우레탄, 폴리클로로프로펜 및 실리콘과 같은 중합체를 포함하는 실리콘을 포함하나, 이에 제한되는 것은 아니다. 실시형태에 있어서, 고분자는 탄성중합체이다.

[0079] "적합한(conformable)"은 장치, 재료 또는 기관을 요구되는 대략의 개요에 적용하기 위하여 충분히 낮은 결합 강도를 가진 장치, 재료 또는 기관을 나타낸다. 예를 들어, 릴리프(relief) 특성의 패턴을 가진 표면에 적합한 접촉이 가능하게 하는 대략의 개요를 예로 들 수 있다.

[0080] "적합한 접촉(Conformal contact)"은 장치 및 수용표면 사이에 수행된 접촉을 나타낸다. 하나의 관점에서, 적합한 접촉은 표면의 전체적인 형상에 대한 장치의 하나 이상의 표면(예를 들어, 접촉 표면)의 거시적인 적합을 포함한다. 다른 관점에서, 적합한 접촉은 상당히 빈 공간이 없는 밀접한 접촉을 가져오는 표면에 대한 장치의 하나 이상의 표면(예를 들어, 접촉 표면)의 미시적인 적합을 포함한다. 하나의 실시형태에 있어서, 적합한 접촉은 밀접한 접촉이 이루어지는 것과 같이 받는 표면에 장치의 접촉 표면의 적합을 포함하며, 예를 들어, 장치의 접촉 표면의 표면 영역의 20% 미만은 물리적으로 받는 표면과 접촉하지 않고, 또는 선택적으로 장치의 접촉 표면의 10% 미만이 물리적으로 받는 표면과 접촉하지 않으며, 또는 선택적으로 장치의 접촉 표면의 5% 미만이 물리적으로 받는 표면과 접촉하지 않는다.

[0081] "탄성 계수"는 주어진 기관의 변형에 대한 응력비를 나타내는 재료, 장치 또는 층의 기계적 특성이다. 탄성 계수는 하기 식(I)에 의해 나타낼 수 있다.

$$E = \frac{(\text{stress})}{(\text{strain})} = \left(\frac{L_0}{\Delta L} \right) \left(\frac{F}{A} \right) \quad \text{식 (I)}$$

[0082]

[0083] 이때 E는 탄성 계수, L₀는 평형길이(equilibrium length), ΔL는 적용된 응력하에서 길이 변화, F는 적용된 힘, 그리고 A는 힘이 적용된 면적이다. 또한 탄성 계수는 하기 식(II)을 통해 라메 상수(Lame constants)면에서 나타낼 수 있다.

$$E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu} \quad \text{식 (II)}$$

[0084]

[0085] 상기 λ 및 μ는 라메 상수이다. 높은 탄성 계수(또는 "높은 계수") 및 낮은 탄성 계수(또는 "낮은 계수")는 주어진 재료, 층 또는 장치에 있어서 탄성 계수의 규모의 상대적인 디스크립터이다. 일부 실시형태에 있어서, 높은 탄성 계수는 낮은 탄성 계수보다 더 크며, 바람직하게는 일부 적용에서 약 10배 크고, 더 바람직하게는 약 100배 크고, 더 바람직하게는 약 1000배 크다. 하나의 실시형태에 있어서, 낮은 계수층은 100MPa 미만의 탄성계수를 가지며, 선택적으로 10MPa미만, 및 선택적으로는 0.1MPa 내지 50MPa의 범위에서 선택되는 탄성계수를 가진다. 하나의 실시형태에 있어서, 높은 계수층은 100MPa 초과와 탄성계수를 가지며, 선택적으로 10GPa초과, 및 선택적으로 100GPa초과와 탄성계수를 가진다.

택적으로는 1GPa 내지 100GPa의 범위에서 선택되는 탄성계수를 가진다.

[0086] "동일하지 않은 탄성계수"는 공간적으로 다양한(예를 들어, 표면 위치에서의 변화) 탄성계수를 가지는 재료를 나타낸다. 동일하지 않은 탄성계수를 가지는 재료는 전체 재료에 있어서 "벌크(bulk)" 또는 "평균"의 탄성계수에 관하여 선택적으로 나타낼 수 있다.

[0087] "낮은 계수"는 1MPa이하, 0.5MPa이하, 또는 200KPa이하의 탄성계수를 가지는 재료를 나타낸다. 낮은 계수의 재료는 1MPa 내지 1KPa, 또는 0.5MPa 내지 1KPa, 또는 200KPa 내지 1KPa, 또는 100KPa 내지 1KPa, 또는 50KPa 내지 1KPa의 범위에서 선택된 탄성계수를 가질 수 있다.

[0088] "굽힘 강성(Bending stiffness)"은 적용된 굽힘 모멘트에서 재료, 장치 또는 층의 저항을 나타내는 재료, 장치 또는 층의 기계적 특성이다. 일반적으로, 굽힘 강성은 탄성계수의 산물 및 재료, 장치 또는 층의 면적 관성 모멘트로 정의된다. 동일하지 않은 굽힘 강성을 가진 재료는 재료의 전체 층에 있어서, "벌크(bulk)" 또는 "평균"의 굽힘 강성에 관하여 선택적으로 나타낼 수 있다.

[0089] "공간적 오프셋(Spatially offset)"은 완전히 오버랩(overlap)하지 않은 구성에서 단위 셀 형상의 배열을 나타낸다. 예를 들어, 하나의 실시형태에 있어서, 공간적 오프셋 단위 셀인 단위 셀의 형상들은 서로에 대하여 회전된다. 예를 들어, 실시형태에 있어서, 공간적 오프셋 단위 셀인 단위 셀의 형상들은 서로에 대하여 이동된다. 예를 들어, 하나의 실시형태에 있어서, 공간적 오프셋 단위 셀인 단위 셀의 형상들은 서로에 대하여 회전되고 이동된다. 실시형태에 있어서, 공간적 오프셋인 단위 셀의 형상들은 서로 다른 높이 또는 평면에 위치한다. 실시형태에 있어서, 공간적 오프셋인 단위 셀의 형상들은 인접한 다른 단위 셀과의 다른 셀 간 공간 길이를 가진다. 실시형태에 있어서, 단위 셀의 공간적 오프셋 형상들은 모든 단위 셀의 전체적인 배열이 직선이 아닌 것으로 배열된다.

[0090] 도 1a, 1b, 및 1c는 본 발명의 회로, 장치 및 장치 구성요소에 유용한 2차원 공간적 구조의 예시를 제공한다. 도 1a는 전기적 배선 또는 전극(완전히 결합된, 선택적으로 결합된, 또는 프리스탠딩) 101이 아크(arc)-형상의 서펜타인 부분을 포함하는 102 스프링 내부의 스프링 구조를 가지는 전기적 배선 또는 전극으로 대체되는 세가지 실시형태를 나타낸다. 이러한 실시형태는 다수의 제1차 단위 셀이 제2차 구조를 형성하기 위하여 특정 구성으로 배열되는 구조를 제공함으로써, 본 발명의 유용한 측면을 나타낸다. 실시형태에 있어서, 스프링 내부의 스프링 구조 102를 가지는 배선은 공간 채움(space-filling) 또는 가상의 공간 채움(pseudo space filling) 구성을 사용한다.

[0091] 도 1b는 1차원 구부러진 말굽(serpentine horseshoe)의 선 및 2차원 구부러진 말굽(serpentine horseshoe)의 메시(mesh)의 통합된 자기 유사형 구조의 개요를 나타낸다. 곡선 111은 복수의 아크(arc)형상 및 제2차 곡선 구성을 형성하기 위해 배열된 직렬의 구성에서의 공간적 오프셋 부분을 포함하는 제1차 곡선 구성으로, 스프링 내부의 스프링 구조를 형성하는 자기 유사형 구조를 포함한다. 곡선 112는 제1차 구조의 아크각(arc angle)이 증가함에 따라, 곡선에 의한 공간 채움의 증가 및 전체적인 경로 길이의 증가 및 인장 장치의 향상을 가져오면서, 제2차 곡선의 구조 및 스프링 내부의 스프링 구조를 유지하는 실시형태를 나타낸다. 곡선 113 및 114는 인장성의 2D 메시 구조를 형성하기 위하여 다수의 스프링 내부의 스프링 구조의 중복되는 배열을 나타낸다. 곡선 114의 제1차 굴곡(curvature)의 아크각은 곡선 113에 비하여 증가함에 따라, 공간 채움이 전체적으로 증가하고 곡선 114에 의해 향상된 인장성을 나타낸다. 도 1b에 나타난 이러한 1D 선들과 2D 메시(mesh)들은 인장성의 1D 및 2D 구조의 특정 예시이며, 본 발명의 구조가 일반적으로 1D 및 2D 구조의 범위인 것은 당해 분야의 기술 중 하나이다.

[0092] 도 1c는 페아노 유형의 곡선에 대하여 세가지 다른 크기에서 자기 유사성을 보이는 반복적인 구조의 개략도를 나타낸다. 상단 패널에서, 곡선은 제1차 단위 셀 121의 측면에 대응하는 크기 치수 L_1 을 특징으로 한다. 제1차 단위 셀은 단위 셀의 왼쪽 하단 및 오른쪽 상단 사이에 전체적인 연결을 제공하기 위하여 공간적 오프셋 구성에서 배열된 아크-형상의 부분과 함께 접힌(folded) 구조를 포함하고, 단위 셀의 왼쪽 하단 및 오른쪽 상단 사이의 직선 길이보다 긴 경로 길이를 포함한다. 중간 패널에서, 단위 셀의 크기는 제2차 구조의 왼쪽 하단 및 오른쪽 상단 사이에 전체적인 연결 및 제1차 단위 셀의 경로길이에 비해 증가한 경로길이 및 왼쪽 하단에서 오른쪽 상단으로의 지점에서 지점에서의 직선길이를 제공하는, 개별적 단위 셀 121의 구조에 유사한 구성을 가지는 제2차 구조 122를 제공하기 위한 직렬 구성에서 배열된 9가지 단위 셀과 함께 특정 크기 치수 L_2 를 제공하기 위하여 약 1/3으로 줄어든다. 하단 패널에서, 단위 셀의 크기는 왼쪽 하단 및 오른쪽 상단 사이에 전체적인 연결 및 제1차 단위 셀의 경로길이에 비해 증가한 경로길이 및 왼쪽 하단에서 오른쪽 상단으로의 지점에서 지점에서의

직선길이를 제공하는, 제2차 구조 122 및 제1차 구조 121과 유사한 구성을 가지는 제3차 구조 123을 제공하기 위한 직렬 구성에서 배열된 9가지 제2차 단위 셀(또는 81가지 제1차 단위 셀과 함께, 특정 크기 치수 L_3 을 제공하기 위하여 약 1/3으로 줄어든다. 본 발명에서, 더 높은 차수의 구조는 낮은 차수의 구조에 비하여 곡선에 의해 공간 채움이 증가한다. 이러한 단위 셀 및 곡선 구성에 있어서, 구조의 추가적인 반복이 고려된다. 예를 들어, 이러한 특정 프랙탈을 반복함으로써, 많은 페아노 변화를 가져오는, x- 또는 y-축 방향에서 개별적 제N-1차 서브단위 셀을 위치시키는 선택을 할 수 있다. 실시형태에 있어서, 예를 들어, 연속적인 반복으로 약 1/3로 감소한 단위 셀의 특정 크기 치수 및 9배 증가한 각각의 연속적인 차수 구조를 형성하는 제1차 단위 셀의 수는 경로길이에서 거의 9x 증가를 동반한다.

[0093] 본 발명은 하기의 제한 없는 예시에 의해 추가적으로 설명될 수 있다.

[0094] <실시예 1> 인장성의 전자장치에 대한 프랙탈 설계 개념

[0095] 인장성의 전자장치는 연질의 재료 및 곡선의 표면을 합치는 고유의 용량 때문에 기존의 웨이퍼 및 회로판 기술의 범위를 넘는 적용의 근거를 제공한다. 가능성의 궁극적인 범위는 진보된 전기적 기능 및 부응하는 구조를 제공하는 동시에, 장치 구조의 발전으로 예상된다. 이러한 예시는 결정성 프랙탈 모티프(motifs)로 패턴화되고 탄성재와 결합한, 견고한(hard) 전자장치 재료의 박막은 인장성 장치 설계에서 중요한 결과와 함께 혼하지 않은 구조를 가능하게 한다. 특히, 이러한 예시는 전기생리학적 센서, 정밀한 모니터 및 액추에이터(actuators), 및 RF 안테나(radio frequency antennas)에 대하여, 단결정 실리콘을 포함하는 금속, 고분자, 및 반도체의 공간채움 구조를 얻기 위하여, 페아노(Peano), 정십자형(Greek cross), Vicsek, 및 다른 프랙탈 구조의 이용을 나타낸다. 이러한 장치는 피부에 적합하게 붙이는 것을 지지하고 자기 공명 영상 하에 비가시성(invisibility)과 같은 생체의학에 관련된 특성을 가진다. 결과는 프랙탈 기반의 레이아웃이 경화-연성(hard-soft) 재료 집적에 대한 설계 계획으로 넓게 발전될 수 있음을 제시한다.

[0096] 인장성의 전자장치 분야에 대한 관심이 증가하고 있으며, 재료 과학에서의 기본적인 고려 및 생체의학과 같은 분야에서 응용 영역 모두에 의해 동기화되고 있다. 주요한 도전은 낮은 탄성계수, 큰 응력 변형에 대한 탄성 반응을 제공하는 시스템과 고성능 전기적 기능성을 이룰 수 있다. 이러한 문제에 대한 가장 성공적인 접근의 두 가지는 일반화된 관점에서 진보한 합성물을 이용하는 것이다. 첫번째는 탄성 매트릭스에 전도성 또는 반도체 나노물질(예를 들어, 나노와이어, 나노튜브 또는 그래핀)을 분산시키는 것을 포함한다. 본 발명에서, 3차원(3D)구조는 자발적으로 접촉, 형상의 분포된 네트워크를 포함하지만, 이는 전체적인 로딩 부분 외에 주요 변수에 대한 제한된 직접적인 제어도 포함한다. 두번째는 2차원(2D) 필라멘트의 메시(mesh) 레이아웃에서 리소그래피적으로(lithographically) 정의된 전자 재료의 박막을 사용함에 의해 결정적으로 형성된, 합성물의 선택적인 종류를 이용한다. 이러한 접근의 이점은 다수의 고성능 재료 플랫폼을 높은 공간 해상도 및 공학 제어와 공통합하는 능력, 시스템에 내부 및 외부 모두의 적합한 전기적 접촉을 허용하는 방법을 포함한다. 인장성 전자장치의 3D 랜덤 및 2D 결정성 합성물의 본질적인 목적은 능동 소자에 사용하기 위하여 견고한 구성요소의 높은 로딩을 인장성의 반응에 대한 연성 매트릭스에 의해 좌우되는 전체적인 기술에 조합하는 것이다. 이 목표는 종래의 합성 공학과 연관되며, 선택적인 접근이 요구된다.

[0097] 이러한 예시는 기존의 3D 네트워크에서의 거동을 결정하는 것으로 알려지고 인체를 포함하는 생물학 시스템에 산재하는 프랙탈 구조의 개념은 진보된 인장성 전자장치의 중요한 기능적 연속성으로 2D 결정적 시스템에서 성공적으로 이용될 수 있다. 프랙탈 기반의 구조는 자기 유사성에 의해 설명될 수 있다: 작은 구역에서의 일부는 전체와 유사한 구조의 부분이 수득된다. 사전에 분석된 주기적인 서펜타인 형상의 네트워크와 비교하여, 프랙탈 설계는 선택된 차원을 따라 향상된 탄성 변형을 조절하고, 이축, 반경방향(radial), alc 다른 변형방법을 지지하기 위해 제작될 수 있다. 나아가, 토폴로지(topology)의 선택은 선(line)에서 루프(loop)까지의 넓은 범위를 포괄하며, 이는 다수 구조의 통합 및 상호맞물림화(interdigitation)를 통해 특정 전자 적용을 맞출 수 있다. 도 2는 6가지 대표적인 예시를 나타내며, 이는 선(line)(코호, 페아노, 힐버트)으로부터 루프(loop)(무어, Vicsek)까지, 그리고 분기된(branched) 메시(정십자형)를 나타낸다. 그 결과는 한정요소분석(FEM) 및 실험적 설명 모두를 통해 가능성의 다양성을 나타낸다. 이러한 한정-반복 곡선에서 근사 프랙탈 차원은 1.5 내지 2의 범위이다. 이러한 구조로 이루어진 탄성 인장 변형은 사전에 설명된 레이아웃에 대한 중요한 이점과 함께, 표면의 전기적 플랫폼을 포함하는 다양한 인장성 장치에서 사용하기에 적합함을 나타낸다.

[0098] 페아노 곡선은 프랙탈 기반의 모티프의 상세한 역학을 시험하기 위한 모델 시스템을 제공한다. 이러한 또는 다른 설계를 사용하는 레이아웃은 반복적인 접근에 따른다: 제N차 페아노 곡선을 형성하기 위해서, 제(N-1)차 곡선의 9개의 복사가 단일 선으로 함께 연결된다. 페아노 곡선의 제1차 세번의 반복 형상은 도 3의 패널(a)에 나

타난다. 근본적인 구성을 점유하는 물리적 해석은 1차원 스프링의 부분으로써 제1차 반복되는 곡선 구조를 고려함에 따른다. 자기 유사성 때문에, 높은 차수의 페아노 곡선은 다중의 길이 규모에서 스프링과 같은 모티프(motifs)를 포함한다. 나아가, 이러한 모티프들 각각은 수직적으로(y-축) 또는 수평적으로(x-축) 배열될 수 있다. 이와 같이, 페아노 구조는 컴팩트(compact)하고 인장성인 레이아웃에 조직적으로 직선을 "접는" 설계 거리를 제공한다. 이러한 와이어들의 역학을 추가적으로 향상시키기 위해서, 아크(arc) 구역은 수학적으로 정의된 페아노 곡선(도 3의 패널(b))에서 샤프 코너(sharp corners)를 대체한다. 일반적으로, 말굽(horseshoe) 서펜타인 구조의 탄성 구성은 아크(arc)부분 각도가 증가하는 것을 향상시킨다. 도 3의 패널(a)에 나타난 페아노 곡선이 정사각형 구역을 채워도, 다른 반복적인 차수의 페아노 곡선들은 임의의 형상의 공간을 채우기 위해 함께 연결될 수 있다. 설명한 것과 같이, 도 3의 패널(c) 내지 (f)는 공간 채움 와이어로 형성된 단어 "ILLINOIS"를 나타낸다. 이때 각 글자는 제1차 및 제2차 페아노 곡선의 조합으로 구성된다. 도면은 "N"의 부분의 상세한 관찰을 포함한다. 전극은 예를 들어, 신체의 특정한 특성과 맞기 위해서 이러한 방법으로 구성된다.

[0099]

도 3의 패널(a)는 변화의 한 세트만을 나타낸다; 제N차 곡선의 제(N-1)차 단위 셀은 수직적으로 또는 수평적으로 배열될 수 있기 때문에, 다수의 다른 변화가 있다(도 8). 제2차 곡선은 각각 구별되는 기계적 특성을 가진 272개의 독자적 레이아웃을 가진다. 탄성재와 결합된 금 와이어로 구성된 5가지의 다른 제2차 레이아웃의 수치적인 시뮬레이션(simulations)은 구조와 레이아웃 사이의 관계에 대해 조사한다. 레이아웃은 모든 수직에서 모든 수평까지의 범위에 이르는 방향을 가지는 단위 셀들을 포함한다(도 18). 최대 주변형 기준은 구성하는 재료의 설정된 파라미터와 일치하는 플라스틱 수율의 개시으로써 최대의 탄성 인장성을 정의한다. 도 18은 x- 및 y-축에 따른 이축성 변형으로 측정된 이러한 수치를 요약한다. 그 결과는 단위 셀 방향을 따라서 이축형 인장성을 최대화하는 같은 방법으로 단위 셀들 모두가 배향된 페아노 레이아웃을 나타낸다. 교차하는 배열에 따른 단위 셀들을 포함하는 "절반씩"의 페아노 레이아웃은 각각 16% 및 13%에서 x- 및 y-축을 따라 지지되는 최대 변형과 균형을 이룬다. 이러한 특성들은 양 축을 따라 인장하는 장치에 잘 맞는다. 전체 단위 셀 크기에 대한 조정은 이러한 구조(도 20)의 역학을 향상시킬 수 있다. 제3차 절반씩의 레이아웃은 각각 32% 및 28%의 x- 및 y-축을 따라 인장성을 얻을 수 있다(도 9). 반복 차수의 이러한 향상은 아크(arc)부분의 구조적 규모, 와이어의 길이 증가, 및 높은 차수의 스프링과 같은 모티프(motifs)의 결합된 효과 때문이다. 본 발명의 인장성은 피부의 탄성 구조에 대하여 일반적인 상한선인 20%보다 훨씬 높다.

[0100]

폴리이미드가 덮여지고 탄성 박막과 완전히 결합된 금속 와이어의 제2차 및 제3차 절반씩의 페아노 레이아웃을 포함하는 실험적 구조는 수치적인 분석과 잘 비교된다(설명에 대한 방법을 살펴본다). 폴리이미드 클래딩(cladding)은 기계적 시험에서 샘플 수율과 일치성을 향상시킴으로써, 금속에서 변형 로컬화(localization)를 지체하게 한다. 세가지 샘플은 인장의 각 프랙탈 차수와 축에 대하여 시험된다. 기계적 특성화는 단축형의 인장 신축 동안에 수행된 네 지점의 조사 기술과 함께 0.01을 이하의 정밀도로 저항 변화의 측정을 포함한다. 탄성 시스템에서, 변형이 없는 상태 및 최대 변형 정도로 증가한 상태 사이의 순환 전 및 후의 와이어 저항성("미분저항"으로 정의되는 차이)은 변화하지 않는다. 가소성(plastic) 변형의 개시에서, 와이어는 작지만 측정이 가능한 미분저항이 나오는 저항-의존성의 구조적 변화를 수행한다. 장력계에 반응하는 스트레스-변형의 측정에 기반한 가소성을 특징으로 하는 기존의 접근법은 이러한 시스템의 탄성 기관의 구성이 설계에 의한 대응에 큰 영향을 주기 때문에 적합하지 않다.

[0101]

도 4a 내지 4f 및 도 9는 이러한 연구결과를 요약한다. 개개의 대표적인 장치로부터 측정된 미분저항은 각 표에 함께 나타나있다. 제2차 및 제3차 페아노 구조에서의 에러바(error bars)는 각각 $3.7e-5$ 및 $3.3e-5$ 의 규모를 가진다; 하기의 추가적인 부분은 이러한 에러의 원인에 대해 논의한다. 일부 온도의 동시 측정은 배경 온도 변동 때문에 저항의 변화를 설명하고 조정할 수 있다(하기의 추가부분을 보면 알 수 있다). 측정은 x- 및 y-축을 따라 인장된 제2차 페아노 구조를 나타내고, 탄성으로부터 가소성(plastic)의 변형 전이는 각각 16 내지 20% 및 12 내지 16%의 범위에서 발생한다. 제3차 페아노 구조는 두 x- 및 y-축에 따른 인장에 대해 27 내지 32%의 범위에서 탄성-가소성(plastic)의 전이를 수행한다. 이러한 단일축 인장성의 값은 수치적인 분석과 일치한다. FEM 변형 맵(maps)(도 4c 및 도 4d)은 샘플에서의 기계적 "핫 스팟(hot spot)"의 위치를 구분할 수 있으며, 이때 핫 스팟에서의 변형은 특히 크고, 실패가 발생한다. 장치 구성에 있어서 추가적인 향상은 이러한 핫 스팟의 상세한 구조를 최적화함으로써 가능하다.

[0102]

사전변형된 탄성재와 결합된 프랙탈 기반의 구조는 탄성변형의 더 높은 정도를 가능하게 한다. 40% 사전변형된 탄성 기관에 완전히 결합된 제2차 일체의 수직 페아노 구조는 그 개념을 설명한다. 최대로 적용된 변형의 다른 정도에 따른 미분저항은 도 10에 나타나있다. 본 발명에서, 탄성으로부터 가소성(plastic) 변형의 전이는 기관이 60 내지 70%의 범위에서 변형될 때 수행된다. 이때 사전 변형없이 준비된 샘플에서는 더 높을 수 있다. 사전

변형을 이용하는 설계는 이축성, 반경방향성(radial), 또는 다른 유형의 변형으로 확장될 수 있다.

[0103]

사전변형의 이용을 통해 향상된 구성의 개념은 반도체를 포함하는 재료의 넓은 범위에 일반적이다. 두 가지 다른 제2차 페아노 레이아웃과 함께, 40% 사전변형된 탄성 기관에 결합된 단결정 실리콘 나노박막(Si NM)의 박막은 개념의 증명을 제공한다. 사전변형된 상태에서, 박막에서 측정된 압축 응력은 실리콘에 대한 탄성 변형의 설계에 존재한다. 도 4g 및 도 4h는 대응하는 FEM 결과에 따라, 샘플의 마이크로규모의 X선 간섭형 단층촬영(microscale X-ray coherent tomography, microXCT) 영상을 나타낸다. 그 결과는 실리콘에서 1%의 최대 주변형이 주어질 때, 일체의 수직 및 절반씩의 구조는 각각 105% 및 63% 수치에 의해 탄성적으로 변형될 수 있다. 절반씩의 구조(도 11)로부터 전기적으로 측정된 균열 지점은 FEM 결과와 일치한다. microXCT 및 FEM 모두의 이미지는 마이크로(micro)규모의 버클링(buckling)을 나타낸다; 이러한 유형의 변형 방법은 응력을 제거하기 위한 실리콘 나노박막(Si NMs)의 성능을 향상시킨다. 이러한 거동은 나노박막(NM) 두께의 제한된 범위에서만 지속된다. FEM 시뮬레이션은 박막 두께의 증가와 함께, 주름(wrinkling)의 설계로부터 마이크로규모의 버클링 및 최종적으로 전체적인 버클링의 나노박막(NMs) 전이를 나타낸다; 나아가, 마이크로규모의 버클링 설계는 최대의 탄성 구성(도 12a 및 도 12b)을 얻을 수 있다. 이와 같이, 경화-연성(hard-soft) 시스템의 탄성 특성의 최적화는 마이크로 공학에 주의가 요구된다.

[0104]

이러한 및 다른 프랙탈 레이아웃은 다양한 응용에 이용된다. 그 중 하나는 뇌(뇌파(EEGs)), 심장(심전도(ECGs)), 및 근육(근전도(EMGs))에 있어서 전기생리학적 과정을 측정하는 피부에 부착된 전극이다. 전극과 피부 사이의 임피던스(impedance)를 최소화하고 측정된 신호 대 잡음(signal-to-noise)을 최적화하기 위해서, 전극은 적합한 피부 접촉 및 높은 면적밀도(areal coverage), 모두를 요구한다. 뉴런과 직접적으로 접촉하는 전극은 면적 내에서 큰 둘레(perimeters)를 가지는 이점이 추가적으로 있다. 이러한 요구는 2차원의 공간을 채우는 십자형의 구조의 체계를 포함하는(도 14) 정십자형(Greek cross) 프랙탈의 변형을 효과적으로 사용하여 처리될 수 있다. 이러한 설계는 어느 두 지점 사이의 저항을 최소화하는 높은 정도의 연결성을 넣을 수 있다. 또한, 선 파단(line breaks)과 같은 구조의 결함은 장치 성능에 상당한 영향을 주기 위해 감소된 확률을 가지며, 이는 실제로는 튼튼하고, 장기적인 건강 모니터링이 요구된다. 이러한 구조는 전극 와이어 레이아웃의 에지(edge)가 단일의 연속적인 선을 형성하는 것과 같은 폐루프(closed loops)를 제거하기 위하여 추가적으로 설계될 수 있다. 집적 전극(레코딩(recording), 접지(ground) 및 기준(reference) 구성요소)과 같이 저항성의 온도 감지/가열 요소를 포함하는 다기능성 장치는 이러한 형상을 이용한다(도 5a). 온도 센서는 정십자형(Greek cross) 전극의 에지(edges)를 따라 작동하는 금속의 절연선을 포함한다. 도 5b 내지 5f는 대표적인 장치 및 다른 모드(가열, 온도 감지, 심전도 측정)에서의 작동을 나타낸다. 이러한 건식 전극(dry electrodes)으로 측정된 임피던스 및 신호 대 잡음은 고품질, 피부-부착, 전기생리학적인 측정에 적합함으로써, 기존의 젤-기반의 전극과 비해서 낮다. 온도 측정의 정밀도(~20mK)는 적외선 카메라와 잘 비교할 수 있다.

[0105]

인장성의 RF(radio frequency) 안테나는 프랙탈 설계의 개념으로부터 이점이 있는 장치의 다른 등급(class)이다. 프랙탈 안테나는 공명 파장(resonant wavelength)에 비해 작은 공간 규모에서 다대역(multiband) 작동을 지지할 수 있기 때문에 관심의 주제가 될 수 있다. 프랙탈의 적합한 선택은 인장성의 기관에 장착될 때 이러한 특성뿐만 아니라 흥미로운 탄성 구성을 제공한다. 아크(arc)부분이 샤프 벤드(sharp bends)를 대신하는 Vicsek 곡선 루프(loop) 안테나는 모델 시스템을 제공한다. 안테나는 폴리이미드로 적층된 구리 트레이스(copper trace, 3 μ m 두께)를 포함하고, 1mm 두께의 탄성 기관에 결합되어 있다. 구리 두께는 기가헤르츠(gigahertz) 주파수에서 구리의 표피 깊이(~2 μ m)에 비교할만하다. 비변형된 안테나에 대한 반사손실 스펙트럼(return loss spectrum)은 공명에서 42 옴의 임피던스로, 거의 1.7 GHz(도 6a)의 기본적인 모드를 나타낸다. 공명에서의 안테나의 총 길이는 거의 $\lambda_0/6$ 이고, 이때 λ_0 는 이러한 특정 프랙탈 레이아웃의 컴팩트(compact)한 특성을 반영한 자유공간 파장(free space wavelength)이다. 장치가 변형됨에 따라, 기본 주파수 및 입력 임피던스가 약간 이동한다. 무반향 챔버(anechoic chamber)에서 파필드(far-field) 측정은 추가적인 정보를 제공한다; 0% 및 30%의 변형(도 6c)에서 기본적인 모드에 대한 데이터는 명백한 쌍극자와 같은 패턴을 나타낸다. 비인장성 및 인장성 장치 모두에 대한 실효 이득(realized gain)은 -2 내지 0dB의 범위이며, 이때 박형(thin) 구리 와이어에서의 저항손실(ohmic loss)때문에 이상적인 쌍극자보다는 약간 낮아진다. 반사손실(return losses) 및 파필드(far field) 개요의 시뮬레이션은 실험과 일치한다(도 17b).

[0106]

바람직한 RF 특성 및 프랙탈 패턴의 구성으로부터 이점을 얻을 수 있는 다른 적용은 자기 공명 영상(MRI)과 비교할만한 전극 구조이다. 원통형의 팬텀(cylindrical phantom)에 장착되고 3 Tesla Trio 헤드 스캐너(Siemens Instruments)에서 스캔된 구리 포일(foil)샘플은 시연을 제공한다. 비교의 목적으로, 샘플은 세가지 유형의 프랙탈을 포함하며, 이는 비패턴화된 시트, 서펜타인 메시의 두가지 변형, 및 중첩된 수직 및 수평의 선에

따른다. 메시 및 프랙탈 패턴의 충전 부분(fill fraction)은 거의 같다(~25%). 본 발명에서 사용된 자기장 강도에 있어서, 공명 RF 펄스 주파수는 123MHz 이하이다. 도면 6d는 스핀 에코(spin echo)를 이용하여 얻어진 축의 횡단면 스캔을 나타낸다(파라미터는 하기 추가적인 부분에 있다). 물 기반의 팬텀(phantom)은 높은 수소 농도 때문에 흰색으로 나타난다. MRI 이미지는 비패턴화된 막(film) 및 메시 샘플의 부근에 분명한 섀도우(clear shadows)가 나타난다. 반대로, 프랙탈 샘플은 뚜렷한 변형 또는 섀도우가 나타나지 않는다. RF 방사(radiation)와 순화전류 및 연관된 열의 방출 및 신호손실(signal loss)을 가져오는 샘플 사이의 정자기 결합은 이러한 차이를 설명한다. 메시는 RF 방사와 결합하며, 이는 이들이 금속에서 매우 상호접속된 폐루프(closed loops)를 포함하기 때문이다; 반면에, 프랙탈은 폐루프를 포함하지 않고, RF 방사와 결합하지 않으며, MRI에서 보이지 않는다. 이러한 분석은 프랙탈 기반의 설계가 MRI-적합성의 표피-장착형 또는 주입형의 전자장치로의 방법을 제공한다.

[0107] 요컨대, 프랙탈 기반의 레이아웃은 생체의학의 시스템에 적합한 장치의 넓은 범위를 포함하는 인장성의 전자장치에 있어서 새로운 설계 기회를 형성한다. 본 발명에서 그 도전 중 하나가 이러한 합성물 재료 및 엄밀히 동일한 이들의 탄성 및 가소성(plastic) 역학의 기계적 특성을 평가하는 것이다. 높은 정밀도의 전자-기계적 측정 및 3차원 FEM 시뮬레이션의 조합으로, 기본적인 기계적 반응 및 구조에 대한 의존도는 특정 변형 모드에 이용되고 설명될 수 있다. 이러한 연구는 프랙탈 레이아웃 및 인장성의 재료 공학에 넓게 적용될 수 있는 구조 사이의 일반적인 관계를 제시한다.

[0108] 방법

[0109] 표피 장치 제작방법. 온도 센서 및 히터를 포함하는 금속 기반의 장치의 제조방법은 제1차 스핀-코팅(spin-coating) 및 액체 폴리이미드(PI)를 UV-처리된 PDMS가 코팅된 실리콘 웨이퍼(Si wafer)에 큐어링(curing)하는 것을 포함한다. 전자 빔 증착은 크롬(4nm) 및 금(300nm) 층을 얻을 수 있다. 금속 패턴에 이어서, 식각(etching) 및 폴리이미드의 제2층의 적용, 포토레지스트 마스크(photoresist mask) 및 산소 플라즈마 식각(etching)이 폴리이미드-캡슐화된 장치를 정의한다. 모든 와이어는 70 μ m-폭이고 폴리이미드 층들은 각각 1.2 μ m-두께이다. 수용성 테이프(3M)는 증착된 크롬-실리카 결합층을 이용하여 탄성재(0.5mm-두께, 에코플렉스(ecoflex) 또는 솔라리스(solaris), Smooth-on Inc.)에 공유결합으로 붙어있는 금-폴리이미드 구조를 회복할 수 있다. 탄성재의 자외선(UV)방사 사전처리는 실리카와 탄성재 사이의 공유결합을 증진시킨다. 장치의 결합패드에 부착된 ACF 케이블(Elform, USA)은 접근가능한 전기적 어드레싱(addressing)이 가능하게 한다. 추가적인 폴리이미드 식각(etching) 단계로, 같은 공정은 전기생리학적 감지를 위해 개방된 금속 기반의 프랙탈 전극에 적용할 수 있다.

[0110] 1 μ m-두께의 실리콘 디옥사이드층에 260nm-두께의 p-도핑된 실리콘을 포함하는 SOI 웨이퍼는 실리콘 나노박막(Si NM) 샘플에 대한 시작점이다. 핸들 웨이퍼(handle wafer)로부터 실리콘 나노박막을 분리하기 위해서, HF 습식 식각(wet etch)은 박막에서 정의된 3 μ m-폭 홀(holes)의 배열을 통해 밑에 놓인 실리콘 디옥사이드를 녹인다. 폴리이미드 막(film)으로 박막의 PDMS 스탬프(stamp) 전이 및 포토레지스트 마스크(photoresist mask) 및 건식 식각(dry etching)공정은 다양한 페아노 레이아웃에서 박막을 정의한다. 금 와이어는 전기적으로 장치를 어드레스하며, 상기에서 설명된 같은 전이 단계가 장치를 완성한다.

[0111] 안테나 제작방법. 시작 재료는 구리 캐리어(35 μ m; Olin Brass)에 있는 구리 포일(foil)(3 μ m)이다. 포일(foil)에 스핀-캐스트(spun-cast) 및 경화된(cured) 폴리이미드는 포일-폴리이미드 적층체로 수득되며, 이는 PDMS가 코팅된 기판에 장착되고 구리 캐리어 제거가 가능하다. 포토레지스트 마스크, 습식 구리 식각(etch) 및 산소 플라즈마 건식 식각(etch)은 안테나에 패턴을 형성시킨다.

[0112] 프랙탈 기반의 금속 와이어 시뮬레이션(도 2, 4 및 18에 나타나있다).

[0113] FEM은 이론적인 변형, 탄성에서 가소성(plastic)으로의 전이, 및 구조의 균열을 가져온다. 탄성 기판은 FEM 프로그램에서 8-노드, 육면체의 브릭(brick) 입체 요소 C3D8R을 이용하고, PI/Au/PI-층 구조의 박형 와이어는 합성물 레이업(layout)의 부분에서 사각의 셸(shell)요소 S4R를 이용한다. 모든 와이어는 70 μ m의 폭이고, 각 사이에 있는 1.2 μ m 두께의 폴리이미드 층에 의해 끼워진 300nm 두께의 금 층을 포함한다. 모든 패턴 구역은 7 \times 7mm이고 50kPa의 탄성계수로 0.5mm 두께의 탄성재에 완전히 결합되어 있다. 입체 요소들은 물리적으로 함께 결합하고, 그 부착된 셸 요소와 함께 노드를 공유한다. 78GPa의 탄성계수, 0.44의 포아송비(Poisson's ratio), 0.3%의 항복 변형(yield strain) 및 5%의 파괴 변형에 대한 이상적인 탄성-가소성(plastic) 구조적 관계는 금(Au)의 역학적 거동을 나타낸다. 탄소성(elastic-plastic) 전이는 하나의 구역의 폭 절반의 최대 변형이 0.3%의 항복 변형을 넘을 때 정해진다.

- [0114] 전극 및 온도 센서 테스트.
- [0115] 정십자형(Greek cross)의 전극은 토르소(torso)로부터의 ECG 신호를 기록한다. 스카치 테이프 및 알코올 면봉은 수화 및 표면 임피던스의 영향을 감소시키기 위해서 각질층을 박리하고 먼지나 입자를 제거한다. 본 발명에서, 측정 및 기준(reference)전극 사이에 위치한 접지(ground)전극(중심에서 7mm이하 떨어진 거리)은 보통 영전위(zero potential)를 정의한다. 측정된 신호는 무선으로 수신기에 전송되고, 60Hz 노치필터(notch filter) 및 저역 버터워스 필터(low-pass Butterworth filters)(BioRadio 150, Cleveland Medical Devices, USA)를 사용하는 판매용 소프트웨어가 분석을 완성한다. 프랙탈 온도 센서는 기계적 테스트 부분에서 설명된 동일한 네 지점 조사기술을 사용하여 작동한다. 적외선 카메라 및 핫 플레이트(hot plate)는 장치를 측정하기 위해 사용된 dV/dT 가 나온다. 장치는 스프레이 밴디지(spray bandage)기술로 탄성지지층 없이 표피에 직접적으로 장착된다.
- [0116] 도면 18. 다섯 가지의 다른 페아노 기반의 와이어 구조
- [0117] 와이어의 어느 부분에서 0.3%의 최대 주변형 기준이 주어진, 5가지의 다른 제2차 페아노 레이아웃에 있어서 금속 와이어의 측정된 인장성은 탄성재에 장착되었다. 레이아웃은 "일체의 수평"(서브단위는 모두 x-축을 따라 배열되었다)에서 "일체의 수직"(서브단위는 모두 y-축을 따라 배열되었다)까지의 범위를 가진다. 변형 기준은 와이어에서 탄성으로부터 가소성으로의 변형 전이를 정의한다.
- [0118] 도면 19. 아크 입체각(arc solid angle)의 함수로써 서펜타인 와이어에 대한 가상의 단일축의 탄성 인장성
- [0119] 중간 세로단의 삽입은 아크 입체각을 정의한다. 가로 구역의(cross-sectional) 구조 및 재료는 도 3과 맞으며, 모든 구조는 $R=620\mu m$ 및 $w=70\mu m$ (도 S2에 정의된다)를 가진다. 이러한 시뮬레이션은 탄성 인장성이 초기의 서펜타인 구조에서 아크각(arc angle)의 함수로써 증가하는 것을 명확히 나타낸다. 이와 같이, 와이어 유형의 구조에서 아크 구역 구조를 결정적으로 정의하는 것은 역학을 최적화할 수 있다.
- [0120] 도면 20. 절반씩의 페아노 구조에 대한 단위 셀 크기의 함수로써 가상의 이축의 인장성
- [0121] 가로 구역의(cross-sectional) 구조 및 재료는 도 4a내지 4h에서와 맞으며, 모든 구조는 $w=70\mu m$ (도 8에서 정의된)를 가진다. 1.5mm 및 4.5mm 사이의 단위 셀 크기의 구조들은 20% 초과와 이축의 인장성을 나타내며, 표피의 탄성의 특성과 일치한다.
- [0122] 추가적인 정보. MicroXCT로 프랙탈 구조의 분석.
- [0123] 마이크로 X-선 단층촬영(MicroXCT 400, Xradia)은 다양한 프랙탈 구조의 공간적 토폴로지(topology)의 이미지가 가능하게 한다. 도 2 및 4의 실험적 이미지는 MicroXCT 시스템으로부터 프랙탈 패턴의 구조적 상세설명을 나타낸다. 두 가지 배열, 0.5 X 및 4 X는 전체 시야 및 각각 구조의 확대된 시야를 제공한다. 추가적인 이미지 파라미터는 180° 에 대하여 단계적으로 기록된 600 이미지 프레임과 함께, 40 KeV X-선원 및 $200\mu A$ 전류를 포함한다. TXM 재구성(Reconstructor) 소프트웨어(Xradia)는 이미지를 재구성하고, 시각화(visualization) 소프트웨어 패키지(Amira 5.4.2, Visage Imaging)는 도 2 및 4의 "그레이-스케일(gray-scale)"이미지를 가져온다.
- [0124] 기계적 테스트. 탄성재에 결합된 금속 와이어의 저항성은 온도 및 기계적 변형 모두에 대한 함수이다. 온도의 기여는 기계적 변형 때문에 금속 저항성에 있어서 단순히 변화를 모니터(monitor)하기 위해 배제된다. 첫번째 단계는 핫 플레이트(hot plate)와 적외선 카메라(FLIR SC7650)를 이용하여, dR/dT 를 얻기 위해서 온도의 함수로써 비변형된 프랙탈 샘플의 저항성을 측정하는 것이다. $30^\circ C$ 및 $45^\circ C$ 의 범위에서 6개의 저항지점으로 최소제곱법을 이용한 선형 적합성은 이러한 측정을 가져온다. 기계적 측정을 하는 동안에, 온도-조절의 저항(R)은 연속적으로 측정된 온도(T)로 하기 식과 같다:
- $$R = R_{device} - \frac{dR}{dT}(T - T_0)$$
- [0125]
- [0126] R_{device} 는 네 지점의 측정으로부터 장치의 측정된 저항이고 T_0 는 실험 시작 전에 정해진 일정한 기준 온도이다. 도 9는 실험 장비 설치를 상세하게 나타낸다. 도 10은 사전변형된 일체의 수직 페아노 구조에 있어서 FEM 이미지와 탄성-가소성 전이지점을 나타낸다.
- [0127] 온도 센서 및 마이크로히터 테스트. 페아노 기반 레이아웃의 와이어는 높은 정밀도의 온도 센서 및 히터에서 주요한 구성요소로써 유용성을 가진다. 이러한 센서는 기계적 테스트에 대해 상기에서 수행된 것과 같이, 적외선

(IR) 카메라(A655SC, FLIR, USA)에 대해 측정될 수 있다. 제3차 절반씩의 페아노 센서의 반응은 도 13에 나타나 있다. 아날로그-디지털(analogue-digital, A/D) 컨버터(converter)의 잡음($V_{A/D}$) 및 전기적 잡음(V_{noise})은 하기 식을 이용하여 프랙탈 온도 센서의 정밀도를 결정한다:

$$T_{A/D} = \left(\frac{dV}{dT}\right)^{-1} V_{A/D}$$

$$T_{noise} = \left(\frac{dV}{dT}\right)^{-1} V_{noise}$$

[0128]

[0129]

상기 dV/dT 는 온도 측정에서 도출된다. 프랙탈 온도 센서의 정밀도는 0.022°C 이다. 센서와 적외선 카메라로 동시에 팔에 장치의 장착 및 온도의 기록은 표피에서의 측정에 대한 적용가능성을 나타낸다.

[0130]

동일한 장치는 줄 히팅(Joule heating)에 대한 정밀 요소로써 사용될 수 있다. 0% 및 20%의 단축의 변형하에 장치의 적외선 이미지는 가열이 장치의 구역에 따라 일정함을 나타내며, 이는 프랙탈 구조의 공간채움 특성을 나타낸다(도 13c). 하나의 적용은 상처 회복을 포함하며, 이때 상처 부근에 조절된 양의 열을 공급함으로써 증가한 국소 혈류량 및 혈관확장 및 궁극적으로 촉진된 회복을 가져온다. 온도 센서 및 히터 모두에 대한 함수로 이러한 장치의 성능은 열전도율과 같은 다른 양의 측정을 가능하게 한다.

[0131]

프랙탈 안테나 설계 및 시뮬레이션. 박스 프랙탈 안테나 레이아웃은 도면 13에 나타난 2차원 박스 프랙탈을 이용한다. 본 발명에서, 제(N-1)차 구조의 5가지 버전은 제N차 반복적 구조를 형성하기 위해서 규모를 축소하고 함께 연결된다. 박스 프랙탈의 둘레 주위의 와이어 트레이싱(tracing)은 안테나 레이아웃을 형성한다; 샤프 코너(sharp corners)는 역학을 향상시키기 위해 둥글게 되어 있다. HFSS 시뮬레이션으로 변형된 안테나 분석은 세 가지 단계를 요구한다: 비변형된 안테나 구조를 아바커스(Abacus)에 도입하고, 이들은 사전결정된 변형으로 숫자상으로 인장되고, 이러한 결과물인 구조는 시뮬레이션을 위해 HFSS에 도입된다(도면 14). 계산된 S11 파라미터의 주파수 및 규모 및 2극성의 파필드(dipolar far field)개요는 실험적으로 측정된 것과 일치한다.

[0132]

MRI 영상. 스핀 에코 이미지(spin echo images)는 하기 파라미터를 이용한다.

[0133]

TR 2000; TE 25; Averages 5; Slices 25; FOV 140 x 140 mm; 두께: 3 mm; 플립 각도(Flip angle): 60 deg; 레졸(Resol): 256; 부분 푸리에(Partial fourier): 5/8; 대역폭(Bandwidth): 130 Hz/Px.

[0134]

<실시예 2> 자기 유사형의 서펜타인 배선 및 집적 무선 재충전 시스템의 인장성의 전지

[0135]

전자공학에 있어서 중요한 경향(trend)은 재료의 발전, 기계적 설계 및 고분자 필름, 금속 포일(foils), 종이 시트 또는 고무판(rubber slabs)과 같은 기존과 다른 기관의 사용을 가능하게 하는 제조 계획을 포함한다. 마지막 가능성은 특히 도전적이며, 이는 시스템이 굽힘(bending)뿐만 아니라 인장성(stretching), 가끔 높은 정도의 변형(>100%)을 조절해야 하기 때문이다. 전자장치에 있어서 몇몇의 접근법이 가능함에도 불구하고, 끊임없는 어려움은 전자장치에 대한 공통함을 허용하기 위해 유사한 기계적 특성을 가지는 전력 공급 및 에너지 저장소자에 있다. 이러한 예시는 활성 물질 및 흔치 않은 '자기 유사형'의 배선 구조의 부분적 설계에 있어서, 박막형, 낮은 탄성계수, 기관으로써 실리콘 탄성재를 이용하는 재충전이 가능한 리튬이온 전지 기술에 대한, 일련의 설계 개념 및 재료를 제공한다. 결과는 1.1 mAh/cm^2 까지의 용량 밀도를 유지할 때 300% 까지 인장성의 정도가 가역적으로 가능하게 한다. 인장성의 무선 전력 수송 시스템은 직접적인 물리적 접촉없이, 전지의 이러한 유형을 충전할 수 있는 수단을 제공한다.

[0136]

큰 응력(>>1%)변형에 대한 탄성반응을 제공하는 전자 및 광전자 기술의 단계의 발달은 최근에 가속화되었다. 재료, 장치 레이아웃, 기계적 설계 및 제조적 접근의 조합은 웨어러블 광전지(wearable photovoltaics)에서 '표피(epidermal)'의 건강관리 모니터, 감지성의 로봇 표피, 연질의 수술도구 및 전자적 '안구'영상 장치에 이르는 범위의 영역에서 현실적으로 응용이 되기 시작하고 있다. 많은 경우에 있어서, 인장성은 주요하고 실시 가능한 특성이다. 상기 다수 및 다른 이용에 있어서, 중요한 요구는 전자장치에서 직접적이고 자연적인 통합을 허용하기 위해, 유사한 물리적 특성으로 에너지 저장소자에 놓여있다. 다수의 중요한 저장소자는 슈퍼커패시터(supercapacitor) 및 전지를 포함하여 신축성으로 발전되어 왔다. 본 발명에서, 충분한 박막형의 구조 형성은 신축성을 나타내고, 이는 주어진 굽힘반경(bend radius)으로, 선형적으로 두께가 감소하는 변형(일반적으로 1% 이하의 수치)이 유발된 굽힘의 특성에 의해 나타난다. 반면에, 인장성은 역학에 있어 더 도전하는 유형을 나타내고, 이때 시스템은 굽힘(bending), 비틀림(twisting), 인장(stretching), 압축(compressing) 및 다른 특성을 포함하는, 일반적으로 임의의 형태인 큰 응력 변형(>>1%) 조절해야 한다. 그리고 두께는 일반적으로 중요한 요

소는 아니다. CNTs 또는 CNT가 침지된 섬유질의 직물의 버클된(buckled) 박막을 사용하는 인장성의 슈퍼커패시터(supercapacitor), 및 전도성 직물에 기반한 인장성의 재충전이 불가능한 탄소아연 전지가 두 예시를 대표한다. 이러한 기술들이 각각 꽤 많은 특성을 가짐에도 불구하고, 고 저장 용량에 대한 재충전, 큰 변형의 정도(>100%)에 대한 인장, 또는 외부 전력 공급에 대한 무선 전기적 인터페이스(electrical interfaces)의 형성에 있어서, 다수의 성능을 제공하지 않는다. 이러한 예시에서 제공된 재료 및 집적화 구조는 '자기 유사형' 구조에 전문화된 부분적인 레이아웃 및 변형가능한 전기적 배선을 이용하는 리튬 이온 전지의 유형에서 이러한 특성들을 이룰 수 있다. 결과적인 장치는 1.1 mAh/cm^2 까지의 용량 밀도로, 300%까지의 변형에 대한 이층의 인장성을 제공하고, 재충전 20번까지의 순환동안 용량에서 손실은 거의 없다. 또한, 설계는 물리적인 연결에 대한 요구없이 외부 공급을 통해 충전할 수 있는 인장성, 전도성의 코일의 집적을 허용한다. 이러한 특성들의 세트는 인장성 전자장치에서 고려되는 다수 적용에 대한 요구사항을 만족한다.

[0137]

결과. 전지 설계, 이러한 예시의 장치는 작은 규모의 저장 구성요소들의 배열이 우수한 인장 특성으로 구조(frameworks)를 전도함에 의해 연결되는 파우치(pouch)셀을 이용한다. 시스템의 개략도, 단위 셀의 다층 형성의 분해도, 및 '자기 유사형' 배선 구조의 표현은 하기 도 21a, 21b, 21c 및 도 25에 나타난다. 집전장치(current collectors)는 포토리소그래피적으로(photolithographically) 패턴화된 알루미늄(600nm) 및 구리(600nm)의 원형 디스크(disks)를 포함한다. 폴리이미드 층(PI; $1.2 \mu\text{m}$)은 중립의 기계적 평면에 근접한 금속에 위치한 상기 디스크들 사이에 배선 트레이스(traces)를 내포한다(도 21D 및 도 21E, 왼쪽 패널). 실리콘 탄성재의 박형(0.25mm), 낮은 탄성계수(60KPa)를 가진 시트(sheets)는 상기 구조들(도 21D 및 도 21E, 중간 패널) 및 전지의 다른 구성요소들을 지지하는 상단 및 하단의 기판을 형성한다. 전체적인 구조는 병렬의 전기적으로 연결된 100개 전극 디스크의 사각 배열을 포함한다. LiCoO_2 및 $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ 에 기반한 슬러리의 몰드된 패드는 음극 및 양극 각각에 활성 물질의 역할을 한다(도 21E, 오른쪽 패널, 및 도 26). 두 시트는 이들 사이의 전기적 부족(electrical shortage)을 피하고 분리기로의 요구를 제거하기 위한 활성 물질들 사이의 공간적 오프셋(offsets)을 포함하는 방법으로 함께 적층된다. 동일한 실리콘 탄성재로 제조되고, 시스템의 주변 부근에 적용된 스페이서(spacer)는 상단 및 하단 시트의 직접적인 접촉을 방지한다. 갭(gap)에 주입되는 겔 전해질(gel electrolyte)은 이온 수송에 대한 매체를 제공한다. 외부 표면과 결합된 아크릴옥시퍼플루로폴리에테르(acryloxyperfluoropolyether) 탄성재의 내재된 박막층은 수분이 전지 내부에 분산되고, 겔(gel)의 용매가 누출되는 것을 방지하도록 해준다. 장기간의 작동은 예를 들어, 전지의 외부 표면에 결합된 알루미늄/폴리이미드의 버클된(buckled) 이중층 시트를 포함하는 보다 정교한 패키지를 요구한다(도 27). 재료 및 제조의 상세사항은 방법 부분에 나타난다.

[0138]

장치는 두 개의 경쟁 설계 목표를 조절해야 한다: (1) 활성영역의 넓은 범위를 요구하는 고면적 용량의 달성, 및 (2) 이러한 면적들 사이의 넓은 거리를 요구하는 높은 기계적 인장성의 제공이 상기 목표이다. 탄성 기판에서 릴리프(relief)의 중요한 특성은 광전지 모듈에서 최근에 증명된 것과 같이, 이러한 도전에 대한 부분적인 해결을 제공한다. 30%까지를 넘어서는 인장성의 정도는 커버리지(coverage) 희생없이 달성하기 어려울 수 있다는 단점이 있다. 본 발명에서, 다르지만 상호보완적인 접근법은 진보된 설계로 변형가능한 배선에 집중되어 있다. 특히, 레이아웃은 높은 시스템-단계의 인장성 및 낮은 배선 저항을 동시에 제공하기 위하여 서펜타인 구조에 있어서 와이어의 '자기 유사형' 구조를 사용하는 것으로 나타난다. 기존의 서펜타인은 직선에 의해 연결된 원형 아크(arcs)를 포함한다. '자기 유사형' 설계는 도 21C의 붉은색 박스에 도식적으로 나타난 것과 같은 단위 셀로 시작하여, 이러한 기본 구조를 반복적으로 적용하는 것을 따른다. 본 발명에서, 셀의 규모를 감소시키고, 그 후 원래의 셀 구조의 레이아웃을 재생산하는 방식으로, 다수의 복사된 것을 연결하는 것은 하나의 반복과 일치한다. 도 21C의 노란색 선은 이러한 방법으로 형성된 제2차 서펜타인 구조를 나타낸다. 높은 차수는 쉽게 설계되고 수행될 수 있음에도, 제2차 구조는 하기의 상세한 실험적이고 이론적인 연구에서 설명된 것과 같이, 본 발명에서 고려된 적용들에 대한 요구를 만족한다.

[0139]

'자기 유사형' 배선의 기계적 특성. 3차원(3D) 한정 요소 분석(FEA)(하기에 상세한 내용) 및 실험적 측정은 필수적인 역할을 나타낸다. 이러한 목적으로 제조된 시험 샘플은 밑에 놓인 탄성 기판에 몰드된 포스트(posts)에 결합한 원형의 패드 사이에, 전지에서 사용되는 것과 맞는 재료 및 다층 스택(stacks) 설계(폴리이미드($1.2 \mu\text{m}$)/구리($0.6 \mu\text{m}$)/폴리이미드($1.2 \mu\text{m}$))와 함께 프리스탠딩(free-standing), 다층 트레이스(traces)를 포함한다. 자기 유사형 구조는 극대의 인장하에서도 재료의 초-저변형을 보장하는 단계적 버클링(buckling) 물리적 특성을 나타낸다. 인장 변형의 전체적인 범위 0% 내지 300%까지에서 시험됨에 있어서, FEA에 의해 예측되는 구조는 도 22에서 나타난 것과 같이, 실험중에 모인 광학 이미지와 상당히 일치한다. 대칭 및 비대칭의 버클링(buckling) 모드는 나타난다(두가지 모드의 상세한 도식은 도 28A 및 28B에 나타난다). 트레이스(trace)는 두

수평의 직선에 의해 연결되는 서펜타인 와이어의 세 컬럼(columns)을 포함한다. 제1단계로써, 각 컬럼(column) 내에 '짧은'과장의 서펜타인과 일치하며; 제2단계는 '긴'과장으로 큰 규모의 서펜타인 형상과 일치하는 구조를 나타낸다. 대칭성의 버클링(buckling) 모드(도 28A)에 있어서, 왼쪽 및 오른쪽의 컬럼은 수직 방향을 따라서 전체적인 굽힘(bending) 변형을 주로 수행하며, 이는 서펜타인 와이어의 전체적인 중간 컬럼(column)의 축적된 증가하는 움직임(motion)을 가져온다. 이러한 의미에서, 면의 위치는 도 28A의 "정면도"의 중심선($x=0$)에 대하여 대칭적이다. 비대칭 버클링(buckling) 모드(도 28B)에 있어서, 왼쪽 및 오른쪽 컬럼의 서펜타인은 주로 수직 방향을 따라 전체적인 비틀림(twisting) 변형을 수행한다. 본 발명에서, 중간 서펜타인의 양 끝은 반대 방향으로 움직인다(즉 하나가 위로 움직이면, 다른 하나는 아래로 움직인다). 이러한 경우에 있어서, 면의 위치는 도 28B의 "정면도"의 중심선($x=0$)에 대하여 비대칭적이다. 대칭(0.078%) 및 비대칭(0.087%)모드에서 FEA에 의해 얻어진 임계의(critical) 버클링 변형은 다른 모든 버클링 모드(>0.172%)에서 보다 훨씬 낮다. 이러한 결과는 상기 두 모드에서만 실험적 관측과 일치한다. 두가지 경우에 있어서, 인장성과 연관된 물리학은 본 발명에서 조사된 예시로 0.08%까지의 명확한 임계의 버클링 변형에서, 제2단계에서 시작하는 "순차적 풀어짐(ordered unraveling)"의 메커니즘을 포함한다. 다음으로, 제2단계는 제1단계에서 기본적으로 추가적인 변형이 없는 동안, 적용된 변형이 0.08%에서 150%까지 증가함으로써 굽힘(bending) 및 비틀림(twisting)을 통해 점차적으로 "풀어진다(unravel)". 제1단계에서의 움직임은 제2단계가 150%까지의 적용된 변형에 상응하여, 거의 완전히 연장될 때 시작된다. 제1단계 서펜타인의 "풀어짐"이 종료에 근접함으로써, 재료의 변형은 급속도로 증가하기 시작한다. 그렇게 함으로써, 인장성의 실제 한계를 정의한다.

[0140]

이러한 제한 하에 적용된 변형에 있어서, 순차적 풀어짐(ordered unraveling)과정의 변형 메커니즘은 재료의 낮은 정도의 변형을 보장한다. 구리에 대한 1%의 대표적인 실패 변형에 있어서, FEA는 321%의 인장성을 예측하며, 이는 실험적 관측($300\% < \epsilon_{stretchability} < 350\%$)과 잘 일치한다. (시뮬레이션은 구리가 폴리이미드 전에 실패점에 도달한 것을 제시한다.) 가역적 거동(즉, 배선은 릴리스(release)후에 그들의 초기 구조로 되돌아간다), 최대의 재료 변형은 항복 변형보다 작아야 한다. 구리에 대한 0.3%의 대표적인 항복 변형에 있어서, FEA는 168%까지의 적용된 변형에 대한 가역성을 제시한다. 이러한 값은 실험적 관측보다 낮으며, 상기 가역성은 200% 및 250% 사이의 변형에서조차도 발생한다(도 22). 이러한 차이에 대한 설명은 수율이 배선의 작은 부분(예를 들어, FEA의 하나의 요소)에서만 처음으로 발생하는 것이다. 이러한 경우에, 가역성에 대한 효과는 실험에서 쉽게 관찰되지 않을 수 있다.

[0141]

인장성(>300%) 및 가역성(>200%)의 이러한 정도는 인장성의 전지 및/또는 전지 전극에 대해 사전의 보고들을 상당히 능가할 수 있다; 또한 기존 금속의 패턴으로 정의되어 리소그래피적으로(lithographically) 사용한 인장성의 배선에 대한 다른 보고서들보다 우수하다. 자기 유사형 설계의 중요성은 기존의 서펜타인 구조이지만, 유사한 다른 구조와의 인장성 비교를 통해 평가될 수 있다: FEA에 의해 결정된 인장범위로, 기존 구조는 134%인 반면에, 자기 유사형 구조는 321%를 나타낸다(도 30). 나아가, 동일한 총길이(l_{total}), 스패(span, L), 진폭(h), 및 단면(폭 w 및 두께 t)에서도, 자기 유사형 설계는 인장성(809% 대 682%) 및 가역성(528% 대 284%)(도 31) 둘 다에서, 다시 기존의 서펜타인을 능가한다. 단축 인장성의 모든 경우에 있어서, 포아송 효과(Poisson effect)는 직교의 방향에서 압축을 가져온다. 이러한 구역의 버클링 프로파일(profiles)은 FEA와 일치하는 거동을 가진다(도 32).

[0142]

전지의 전기화학적 및 기계적 거동. 우수한 시스템 레벨의 인장성을 제공하는 일련의 치수를 선택한 후에, 우수한 면적 용량 밀도 및 적당한 배선 저항성으로, 최선의 전기적 성능은 음극 및 양극에 대한 디스크의 직경은 각각 2.20mm 및 1.58mm이고, 오프셋 거리는 0.51mm인 레이아웃으로 관찰된다. 이러한 구조는 음극에 대해서는 33%, 양극에 대해서는 17%, 및 전체 전지에 대해서는 50%(비변형된 구조에 있어서)의 면적 범위에 부합한다(도 33A 및 33B). 배선은 600nm의 두께 및 50 μ m의 폭을 가진다. 이러한 파라미터에 대하여, 근접한 디스크들 사이의 저항은 24 Ω 이고, 연결 리드(lead) 및 가장 근접한 디스크 사이의 저항은 45 Ω 이다. 외부 연결에 대한 리드는 인터페이스에서 변형을 피하기 위해 얇고 좁으며, 외부 특성화 장치와 연결하는 신축성의(하지만 인장성은 아닌) 케이블(cables)과의 연결을 가능하게 한다. 겔 전극은 점성액의 유동성을 고형의 응집성에 조합하며, 그렇게 함으로써, 이온성 전도 경로를 유지하는 동안 큰 변형을 조절하게 할 수 있다.

[0143]

300%의 단축 변형이 있고 없는 전지 전극의 전기화학적 특성이 도 23a에 나타나있다. 결과는 약 2.35 V에서 두 명확한 플래토(plateaus)가 $\text{Co}^{3+}/^{4+}$ 및 $\text{Ti}^{4+}/^{3+}$ 산화환원 쌍(redox couples)의 포텐셜과 부합함을 나타낸다. 각 단위에서의 LiCoO_2 (특정 용량 145mAh/g)의 두께는 120 μ m까지 이고, 이는 95mg까지의 질량, 및 C/2의 충전/방전

속도에서의 1.1 mAh/cm^2 의 면적 용량 밀도와 부합한다. $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ (특정 용량 160mAh/g)의 질량은 90mg 까지이며, 이는 음극보다 5% 내지 10% 더 양극 용량에 부합한다. 본 발명에서 설명된 것보다 큰 두께를 가진 슬러리 디스크(Slurry disks)는 증가된 면적 용량 밀도를 나타내지만, 디스크의 농도차 편극 때문에 감소된 속도 능력을 나타낸다. 전지의 출력 저항은 70Ω 까지이고(도 34), 누설 전류(leakage current)는 1 내지 $10\mu\text{A}$ 이다. 누설 전류는 세가지 주요원인으로부터 발생한다: (i) 역방향 바이어스 쇼트키 다이오드(reverse biased Schottky diode), (ii) 음극 및 양극에서의 슬러리 디스크들 사이의 내부 저항의 자기-방전 및 (iii) 슬러리 재료, 잔류 산소 및/또는 수분의 불순물과 연관된 셔틀 반응(shuttle reactions)을 포함하는 유도전류의 영향이 상기 원인이다. 하기 및 도 35에 나타난 실험적 결과는 분리기의 사용 및 향상된 패키징(packaging)설계는 44시간내에 $161\mu\text{A}\cdot\text{h}$ 에서 $23\mu\text{A}\cdot\text{h}$ 까지의 전력 손실을 감소시킬 수 있다. 도 23b는 캡슐화된 전지(encapsulated battery)의 쿨롱 효율(coulombic efficiency, 붉은색) 및 순환 성능(cycling performance, 검은색)을 나타낸다. 쿨롱 효율은 첫번째 순환에 대한 최대 60%에서 세번의 순환 후에는 90%를 넘는 증가를 보인다. 고형-전해질-인터페이스(solid-electrolyte-interphase)형태, 및 리튬이 전해질의 불순물과의 부반응으로 소모되는 동안, 초기의 손실은 순환 형성의 결과가 될 수 있다. 서서히 감소하는 용량 보유는 순환 저하(cycle fade, 도 36)에서보다는, 패키징 재료의 잔류수의 반응, 수분 침투 및 디스크(가열-압력되지 않은)로부터 분리한 슬러리 입자의 전기적 불연속의 조합 때문에, 캘린더 저하(calendar fade)로부터 더 나타나며, 가끔 전해질 겔에서 관찰될 수 있다. 100%에서 75%까지의 방전도 변화는 감소(degradation) 특성에 중요한 영향을 가지지 않는다(도 27). 바인더(binder)비율의 증가와 같은 슬러리의 구성요소의 최적화 및 가열온도의 추가적인 증가는 후자의 거동을 감소시킬 수 있다. 장치 어셈블리(device assembly)의 향상된 조건은 전지의 영향을 감소시킬 수 있다. 도 23c는 이층의 인장 및 릴리징(releasing)동안, 레지스터(2020Ω)에 연결되었을 때 전지의 출력 전력을 나타낸다. 변형과 함께 출력 전력의 약간의 감소는 이러한 큰 정도에서 변형으로 슬러리 디스크들 사이에 상당히 증가된 분리로부터 발생하는 증가된 내부 저항에서 나타난다. 전지는 도 23d에 나타난 것과 같이, 1.7V 의 전압에서 커지는(도 38) 상업적 발광다이오드(LEDs)를 작동하기 위하여 충분한 전력을 공급한다. 전지는 300%까지 인장될 수 있으며(도 23e), 접혀지고(도 23f), 비틀리고(도 23g), LED의 분명한 디밍(dimming)없이 인체 피부에 장착될 때 적용될 수 있다. 나아가, FEA는 전지의 전체적인 구성요소 구조의 효율적인 탄성계수(66.8KPa)가 기판 재료(Ecoflex)의 탄성계수(60.0KPa)보다 약간만 높음을 나타낸다. 그 결과, 전지는 인장성이며, 특히 부드럽고 유연하다. 사실상, 탄성계수는 인체 표피의 탄성계수보다 낮으며(140 내지 600KPa), 그렇게 함으로써 중요한 기계적 로딩/loading)없이, 표피 및 생물학적 조직에 집적할 수 있는 포텐셜을 제공한다.

[0144]

전지에 대한 인장성의 무선 충전시스템. 임베디드 장치와 같은 다수의 실질적인 경우에 있어서, 외부 공급과 물리적으로 연결되어 형성됨이 없이 전지를 충전할 수 있는 능력은 가치가 있다. 표피-장착의 장치와 같이, 충전 단자가 접근가능한 시스템에서도, 물리적 접촉을 형성하는 과정이 얇고, 인장성의 장치(또는 밑에 놓인 부드러운 조직)로 기계적으로 파괴될 수 있기 때문에 무선 충전이 가치가 있다. 또한 물리적 접촉을 포함하는 접근은 재료(예를 들어 표피 자체) 주위에 전기적 쇼크(shock)의 위험을 가지고 있다. 재료 및 설계의 다기능(versatility)은 전지 자체에 대하여 일체적으로(monolithically) 무선 전력 수송 시스템의 집적이 가능하게 한다. 설계 및 실제 장치는 도 24a, 24b에 각각 나타나있다. 제2코일은 제1코일로부터의 전자기 플럭스(flux)와 결합하고, 쇼트키 다이오드는 정류(rectification)를 제공한다. 쇼트키 다이오드($\sim 4.0\text{GPa}$ 의 탄성계수로, 예폭시로 패키징된)는 기판(Ecoflex 제조, $\sim 60\text{KPa}$ 탄성계수)보다 10^4 배 초과 탄성계수를 가지지만, 그 크기(길이 0.62mm , 폭 0.32mm , 및 높이 0.31mm)는 무선 시스템의 전체 크기($\sim 30\text{mm} \times \sim 20\text{mm}$)의 적은 퍼센트($\sim 2\%$)일뿐이다. 그 결과, 전체적인 인장성에의 영향은 여전히 무시해도 될 정도이며, 이는 도 39, 40a 및 40b에 나타난 한정 요소 시뮬레이션(finite element simulations)에 의해 입증된 것과 같다. 커패시터는 출력 전압에서 진동(oscillations)을 매끄럽게 하며; 그 작은 크기와 두께는 전체 시스템에 자연스러운 집적이 가능하게 한다. 더 큰 커패시터는 더 큰 규모에서도 진동을 매끄럽게 할 수 있다(도 41). 코일 및 정류기는 $2.3\text{K}\Omega$ 의 직렬 저항을 추가하며(도 42), 이는 전지로부터 전류를 이동시키는, 제2코일과 함께 병렬 저항으로써 기능한다. 서펜타인 제2코일의 저항은 $1.92\text{k}\Omega/\text{m}$ 이고; 전체적으로 유사한 구조이지만, 서펜타인 형상이 없는 코일은 $1.22\text{k}\Omega/\text{m}$ 으로 측정된다. 충전 시스템의 효율 증가는 와이어의 폭 및 두께의 증가에 의해 달성될 수 있으나, 이는 감소된 인장성 및 증가된 탄성계수의 소요에서 이루어진다. 특정 적용의 요구는 오른쪽 트레이드오프(tradeoffs)를 정의할 것이다. 이러한 경우에, 제1코일로부터의 출력전압은 187mV 였다. 제1 및 제2코일 사이의 1mm 의 작동 거리로, 제2코일에 수신된 전력은 9.2mW 이며, 이는 4.9%의 효율과 부합한다. 무선 충전시스템의 효율과 부합하는 전력은 서펜타인 수신 코일의 저항에 강하게 의존한다. $7\mu\text{m}$ 로의 두께 증가와 구리의 사용은 효율을 4.9%에서 17.2%로 향상시킨다. 이러한 두께에서, 코일은 25%의 변형에 대한 인장성을 유지한다. 데이터와 이미지는 하기에 나타나있

다. 커패시터는 접착을 향상시키기 위해 아래의 금(Au) 전극에 티올(thiol) 분자층과 함께, 유전체로써 폴리이미드 층 1.2 μ m를 사용하는 구조에서 1.7nF의 정전용량(capacitance)을 가진다. 도 24c는 이러한 무선 전력 수송 소자의 입력 및 출력을 나타낸다. 44.5MHz의 주파수에서의 입력 전압은 제2코일의 자기 공명 주파수(self-resonant frequency)와 맞으며, 이는 코일 면적, 턴(turns)의 수, 각 턴 사이의 거리, 및 와이어 저항에 따른다. 9.1V의 피크 대 피크(peak-to-peak) 입력 전압(도 24c 검은색 곡선)에 대하여, DC 출력 전압은 3.0V이다(도 24c 붉은색 곡선). 무선 코일을 사용하는 작은 규모의 전지의 충전 곡선은 도 24d에 나타난다. 전지 전압(도 24d 주황색 곡선)은 약 6분에 2.5V로 증가한다. 회로의 충전 전류(도 24d 파란색 곡선)는 0.5mA에서 0.2mA 아래로 감소한다. 본 발명에서는 충전회로를 설계하기 위해서 편미분 방정식을 사용하였고, 충전 전류 곡선을 계산하기 위해서 수치 프로그램을 사용하였다. 이러한 과정의 시뮬레이션은 실험적 데이터와 일치한다(하기 및 도 40에 나타나있다.).

[0145] 토의. 상기 예시에 나타난 재료 및 설계는 전력 인장성의 전자장치 및 광전자 소자에 매력적인 특성 및 형태를 가진 에너지 저장 소자 및 무선 충전 시스템에 대한 방법을 제시한다. 슬러리 재료 자체는 흔히 많은 재료(낮은 탄성계수의 실리콘 고무 시트, 표면 릴리프로 양각된(embossed))와 당연한 집적이 가능하게 하는 방식(공정을 제시하는 유연한 리소그래픽(lithographic) 방식으로)으로 효율적으로 사용된다. 인장성의 배선은 특이한 '스프링 내부의 스프링'역학을 제공하는 '자기 유사형'설계를 이용한다. 결과는 사전 보고보다 4배(4x) 더 큰 인장성의 정도가 나타남과 동시에, 활성 물질의 범위를 50%와 같이 높은 범위가 가능하게 한다. 근본적인 역학의 종합적이고 실험적으로 입증된 모델과 함께, 이러한 두가지 측면의 조합은 기술로 나타나며, 즉, 이전에 가능했던 것과는 다른 특성들을 제공하는 인장성, 재충전이 가능한 전지와 같은 기술이다. 추가적인 진보로써, 본 발명에서는 전지와 유사한 물리적 특성을 제공하는 집적된 인장성, 무선 충전 시스템을 제시한다.

[0146] 슬러리 화합물질, 분리기 재료, 및 인장성, 공기-불투과성의 패키징 재료는 우수한 장치 성능을 제공하기 위해 선택될 수 있다. 자기 유사형 서펜타인 배선 구조는 공간 채움 곡선, 및 순차적 풀어짐(ordered unraveling)의 버클링 물리학의 구조를 포함한다. 배선 구조의 이러한 유형은 즉각적이고 일반적인 유용성을 가지며, 경화 및 연성의 재료를 조합하는 인장성 기술의 어느 단계와 맞는다. 토폴로지(topology) 단계의 배선 구조는 큰 기계적 인장성 및 낮은 전기적 저항성을 동시에 제공한다. 무선 전력이송 효율성은 코일 입력 저항의 감소, 제1 및 제2 코일 사이의 상호 인덕턴스(mutual inductance)의 최대화 및 코일의 자기공명 주파수의 증가에 의해 향상될 수 있다. 안정화 회로(Regulation circuits)는 전지의 과충전을 피하기 위해 포함될 수 있다.

[0147] 방법. 자기 유사형 배선의 기계적 테스트 및 전극의 제조: 순차적인 스핀 캐스팅(spin casting)은 실리콘 웨이퍼(wafer)에서 폴리(메틸 메타크릴레이트)(PMMA 495 A2, 30초동안 3000rpm에서, 2분동안 180℃의 핫플레이트에서 가열)의 이중층 및 폴리이미드(PI, 폴리(피로멜리틱 다이안하이드라이드-코-4,4'-옥시디아닐린)아미드산 용액(poly(pyromellitic dianhydride-co-4,4'-oxydianiline) amic acid solution); 30초동안 4000rpm, 4분동안 150℃의 핫플레이트에서 가열한 후, 1시간동안 10mT 및 250℃에서 진공 오븐내에)의 층으로 정의된다. 음극 및 양극은 각각 알루미늄(Al) 또는 구리(Cu)의 600nm 두께의 층을 포함하며, PI에 전자빔 증착에 의해 적층된다. 포토리소그래피(Photolithography, AZ5214E) 및 식각(etching, 2분동안 50℃의 핫플레이트에서 타입 A 알루미늄 부식액; 10초동안 실온에서 타입 CE-100 구리 부식액; Transene Company)은 이러한 금속의 패턴으로 정의된다. 잔류 포토레지스트(photoresist)를 제거한 후, 스핀 코팅은 전체 구조에 대하여 PI의 추가적인 층을 형성한다. 다음으로, 포토리소그래피(AZ 4620, 30초동안 2000rpm으로, 4분동안 110℃에서 가열된다) 및 산소 플라즈마 식각(etching, 10분동안 300mT, 20sccm 산소, 200W)은 금속 트레이스에 맞는 구조에 PI의 층을 패턴화한다.

[0148] 가열된 아세톤에의 침지(Immersion)는 밑에 놓인 PMMA 층을 부분적으로 제거하며, 그렇게 함으로써 수용성 테이프(3M, Inc.)의 부분 표면에 있는 실리콘 웨이퍼로부터 회수된 전체적인 구조가 가능하게 한다. 섀도우 마스크를 통한 Ti(5nm)/SiO₂(50nm)의 전자빔 증착은 금속 디스크³³에 정렬된 이면 코팅을 형성한다. 얇은(250 μ m) 실리콘 기판(Ecoflex, Smooth-On)은 1:1 중량비로 두 구성요소의 혼합, 페트리 접시(petri dish)에 결과 재료의 스핀-캐스팅(30초동안 300rpm) 및 이를 부분적으로 경화(curing, 실온에서 30분동안)에 의해 준비된다. 그 후에, 아릴 아마이드 작용기의 퍼플루오르화 에테르(DuPont)를 스핀-캐스팅(30초동안 3000rpm)한 후 30분동안 자외선 하에 경화하는 과정은 상단의 밀봉층에 형성된다. 에코플렉스 기판의 다른 면은 5분동안 자외선하에 표면 활성화된다. 이러한 표면에 전극 구조를 적층하는 것은 접착에 따른 강한 결합이 가능하게 한다. 수용성 테이프는 하룻밤동안 기판을 수돗물에 침지함에 의해 제거된다. 마지막 단계로써, 전극은 금속 표면에서 옥사이드를 제거하기 위해 1mM 염산에 침지된다.

[0149] 자기 유사형 배선의 기계적 테스트는 상용화된 단축의 인장기로 수행된다. 배선이 기판으로부터 분리된 것을 확

인하기 위해서, 각 디스크는 실리콘 기판에 몰드된 포스트(높이가 250mm)의 상단에 장착된다. 변형된 배선의 이미지 및 비디오는 디지털 일안 리플렉스 카메라(digital single-lens reflex camera)로 수집된다.

[0150]

슬러리의 패턴화된 몰딩 및 전류 집진 전극과의 집적: 포토리소그래피(AZ 4620, 7 내지 8 μm 의 두께) 및 유도에 의해 결합된 플라스마 반응성 이온 식각(etching)(ICP RIE)는 실리콘 웨이퍼의 표면에 실린더형의 용기(cylindrical wells)의 배열을 정의한다. 조건은 나중에 설명된 것과 같이, 슬러리의 효율적인 수송을 위해 중요한 경사진 측벽(sloped sidewalls)을 얻기 위해 선택된다. 아세톤으로의 세척은 포토레지스트를 제거한다. 폴리테트라플루오로에틸렌($\sim 200\text{nm}$) 층은 접착을 예방하기 위한 코팅으로써 ICP RIE 도구를 사용하여 일치하게 적층된다. 슬러리 재료는 양극 및 음극 각각에 대하여 N-메틸-2-피롤리돈(NMP)의 용매에 8:1:1의 중량비로 혼합된 리튬 코발트 옥사이드 또는 리튬 티타늄 옥사이드, 아세틸렌 블랙, 및 폴리비닐리덴 플루오라이드를 포함한다. 혼합물은 하룻밤동안 교반되며, 실리콘 웨이퍼의 식각된 표면에 걸쳐서 기계적으로 스크랩된다. 이러한 방식으로 슬러리로 채워진 실린더형의 용기(cylindrical wells)는 하룻밤동안 90°C의 핫플레이트에서 가열된 후, 수용성 테이프의 한 부분의 표면에 회수된다. 가열 조건은 고수율로 슬러리의 회수를 가능하게 하기 위해 주의하여 선택된다. 금속 전극에 테이프를 기록하는 것은 몰드된 슬러리가 금속 디스크에 배열됨을 보장한다. 하룻밤동안의 수돗물로의 침지(immersion)는 테이프를 용해하였다. 진공 오븐에서 하룻밤동안 170°C에서 기판을 가열하는 것은 수분을 제거하고 슬러리와 금속 사이의 결합 강도를 향상시켰다.

[0151]

전지의 어셈블리(assembly) 및 전기화학적 테스트: 금속 전극에 고온 가압된 이방성 도전 필름은 외부의 전기적 접촉에 대한 지점으로 사용된다. 기판의 주변부에 Sylgard Prime Coat (Dow Corning, Inc.)의 적용은 결합을 위해 준비되었다. 주변부의 얇은 실리콘 공간층(500 μm 두께)은 두 시트가 함께 적층됨으로써 직접적인 접촉하는 것을 예방한다. 측면의 공간적 오프셋은 활성 영역들 사이의 전기적 단락(electrical shorting)을 예방한다. 엣지(edges)는 핫플레이트(2시간동안 90°C)에서 가열함에 의해 뒤따르는 에코플렉스(Ecoflex)의 추가적인 적용으로 밀봉된다. 100g 리튬 과염소산염(lithium perchlorate), 500ml 에틸렌 카보네이트, 500ml 디메틸카보네이트, 및 10g 폴리에틸렌 옥사이드($4 \times 106\text{g/mol}$)의 혼합물이 포함된 겔 전극은 균일한 겔로써 아르곤으로 채워진 글러브박스(glove box)에 준비되었다. 이러한 재료는 엣지를 통해 주사기를 사용하여 전지에 주입된다.

[0152]

실온에서 2.5-1.6V의 컷오프 전압으로 BioLogic VMP3 전기화학적 스테이션(electrochemical station)은 제조되고 인장된 전지 전극을 충전 및 방전하기 위해 사용되며, 전체적으로 집적된 전지의 순환 거동을 평가하기 위해 사용된다. 면적 용량 밀도는 활성 영역에 기반하여 측정된다. 출력 전력은 전류계를 사용하는 2020 Ω 저항기와 연결된 전지로 모니터링된다. 전류값은 전지에 적용된 변형의 함수로써 기록된다.

[0153]

무선 코일의 제작 및 테스트: 사전에 설명된 단계를 이용하여 PMMA 및 PI 층으로 코팅된 실리콘 웨이퍼는 전자빔 증착에 의해 Cr(5nm)/Au(500nm)의 적층을 위한 기판으로의 역할을 한다. 포토리소그래피(AZ 5214E) 및 식각(etching, Transene Company)은 커패시터 및 연관된 접촉 라인들의 하단 전극의 구조에 패턴을 정의한다. 아세톤으로 포토레지스트의 제거 및 기판을 15분동안 이소프로판올의 1nM 폴리(에틸렌 글리콜) 메틸 에테르 티올 용액에 침지하는 것은 PI 스핀-캐스트(30초동안 4000rpm)의 제2층의 범위 및 접착을 향상시키기 위해 사용되며, 전극에 경화된다(4분동안 150°C의 핫플레이트에서, 그리고 1시간동안 250°C의 진공 오븐에서). 이러한 PI 층은 커패시터에 대한 유전체로의 역할을 한다. 포토리소그래피(AZ 4620, 30초동안 2000rpm, 4분동안 110°C에서 가열)는 커패시터의 하단 전극 및 코일 사이의 접촉 지점으로써, PI층을 통한 식각(etching)으로 마스크를 설명한다. 포토레지스트를 제거하기 위하여 아세톤에 침지한 후, 스퍼터(sputter) 적층은 측벽을 포함하는 전체 표면에 대하여 구리(60nm)의 등각(conformal)층을 형성한다. 포토리소그래피(AZ 5214E) 및 식각(etching)은 코일 및 커패시터의 다른 상단 전극을 설명한다. 레지스트를 제거한 후, PI의 제3스핀-캐스트 층이 구리 전극에 코팅을 형성하였다. 패턴화된 구조의 세 PI 층을 통한 산소 플라스마 식각(etching)은 마지막 장치 레이아웃을 설명하였다. 가열된 아세톤에의 침지(immersion)에 의한 릴리스(release)는 수용성 테이프 위의 전체 구조의 릴리스를 가능하게 하기 위하여, 밑에 놓인 PMMA를 부분적으로 제거하였다. Ti (5 nm) / SiO₂ (50 nm)의 증착 및 에코플렉스 기판의 UV 활성화된 표면에서의 적층은 강한 결합이 가능하게 한다. 수용성 테이프가 제거된 후, 쇼트키 다이오드 칩(Digikey BAT 62-02LS E6327)은 코일 및 실버 에폭시(silver epoxy)를 사용하는 커패시터 사이에 결합된다. 앞에 입력 저항은 $\sim 500\Omega$ 이고, 정류 비는 $\pm 1\text{V}$ 의 바이어스(bias) 전압에서 $\sim 1 \times 10^4$ 이다.

[0154]

고 주파수 교류의 전류 신호는 KEITHLEY 3390 50 MHz 임의 파형 발생기에 의해 발생된다. 무선 코일의 입력 및 출력 특성은 Agilent infinium DS08104A 오실로스코프(oscilloscope)(1 GHz, 4 channels)를 사용하여 수행된다. 전지에 대한 무선 충전 전압 및 전류는 BioLogic VMP3 전기화학적 스테이션(electrochemical station)을 사용하여 모니터링되었다.

- [0155] 추가적인 정보. 실리콘 기판에 Al/PI의 버클된 시트를 포함하는 인장성의 밀봉층의 제조. 제1단계는 Al 전지 전극에 사용되는 것과 유사한 과정을 이용하여, 실리콘 기판에 PMMA/PI/Al의 삼중층의 제조를 포함한다. A25214E와의 포토리소그래피 및 Al 습식 식각은 PI/Al시트의 측면 규모를 설명한다. 다음으로, 산소 플라즈마 식각(etching)(5분동안 300 mT, 20 sccm O₂, 200 W)은 노출된 구역의 PI 층을 제거하였다. 가열된 아세톤으로의 침지는 밑에 놓인 PMMA층을 부분적으로 제거하였고, 그렇게 함으로써 수용성 테이프(3M, Inc.)의 한 부분의 표면에 실리콘 웨이퍼로부터 회수되기 위한 전체 구조가 가능하게 한다. Ti (5 nm) /SiO₂(50 nm)의 전자빔 증착은 이면 코팅을 형성하였다. 분리 기판에, 500 μm 두께의 실리콘 시트(Ecoflex, Smooth-On)가 준비된 후, 제거되었고, ~30%의 정도로 이축으로 사전변형되었으며, 유리 슬라이드에 적층됨에 의해 고정되었다. 실리콘 표면은 5분 동안 UV-유도된 오존에의 노출에 의해 활성화되었다. 이러한 표면의 PI/Al 이중층의 적층은 접착에 따른 강한 결합을 나타낸다. 수용성 테이프는 하룻밤동안 수돗물에 기판을 침지함에 의해 제거된다. 유리 슬라이드로부터 전체 어셈블리의 필링(Peeling)은 사전변형을 릴리스하고, 버클링의 예상되는 패턴을 나타낸다. 이러한 구조에서, 전체적인 시스템은 사전변형과 같이 큰 변형으로 인장될 수 있다.
- [0156] "아일랜드-브릿지(island-bridge)" 자기 유사형 전극 구조의 기계적 분석: FEA. 전체 3차원(3D) FEA는 인장 및 압축하에 "아일랜드-브릿지" 자기 유사형 전극 구조의 포스트 버클링(post buckling) 거동을 분석하기 위해 적용되었다. 전극의 구조적 주기성 때문에, 대표적인 단위 셀이 연구되었고, 상세한 구조는 도 25에 나타나있다. 전극의 원형의 아일랜드는 실리콘 기판(ecoflex; 두께 500 μm)의 표면에 몰드된 포스트(높이 250 μm)에 장착되었다. 금속 배선(두께 0.6 μm)은 폴리이미드(PI, 각 층에 대한 두께 1.2 μm)의 박층에 의해 상단 및 하단으로 둘러싸여 있다. 탄성 계수(E) 및 포아송 비(ν)는 에코플렉스(ecoflex)에 대하여 $E_{ecoflex}=0.06$ MPa 및 $\nu_{ecoflex}=0.49$ 이고; 구리에 대하여 $E_{Cu}=119$ GPa 및 $\nu_{Cu}=0.34$ 이며; 알루미늄에 대하여 $E_{Al}=70$ GPa 및 $\nu_{Al}=0.35$ 이고; PI에 대하여 $E_{PI}=2.5$ GPa 및 $\nu_{PI}=0.34$ 이다. 8-노드 3D 입체 요소 및 4-노드 쉘 요소들은 에코플렉스 및 자기 유사형 전극에 각각 사용되었고, 개선된 메시(refined mesh)는 정확도를 보장하기 위해 적용되었다. 적용된 변형으로 변형된 구조의 발전은 도 22 및 도 32에서 각각 나타난 것과 같이, 인장성 및 압축 모두에 대한 FEA로부터 얻어진다. FEA 및 실험적 결과 사이의 우수한 일치성을 볼 수 있다. 본 발명에서, 버클링 프로파일(buckling profiles)의 증거로써 구리의 경우를 들 수 있다. 알루미늄 층에 대한 결과도 유사하다. 자기 유사형 및 서펜타인 배선(도 31) 사이의 인장성 및 가역성의 비교에 대하여, 주요한 구조적 파라미터는 총 길이($L_{total}=16.77$ mm), 스판($L=1.6$ mm), 진폭($h=0.4$ mm), 폭($w=30$ μm), 및 두께($t=3.0$ μm)를 포함하는 같은 값으로 유지된다. 알루미늄 배선(두께 0.6 μm)은 폴리이미드(각 층에 대한 두께 1.2 μm)의 두 박층에 의해 둘러싸여있다. 도 31은 0%부터 800%까지의 인장 전체 범위를 넘는 것을 나타내며, 자기 유사형 배선의 변형 정도는 항상 서펜타인보다 낮다. 자기 유사형 설계의 인장성(809%) 및 가역성(528%)은 단순 서펜타인 설계의 수치($\epsilon_{stretchability}=682\%$, $\epsilon_{reversibility}=284\%$)보다 높다.
- [0157] 전지 누설 전류 분석. 누설 전류는 세가지 원인으로부터 발생한다. 첫번째 원인은 역방향 바이어스(reverse biased) 쇼트키 다이오드를 통한 전류이다. 이러한 전류는 ~0.2 μA이고, 전지의 수명을 통한 상대적인 상수이다. 보다 작은 역방향 전류를 가진 쇼트키 다이오드는 가능하며; 그러한 장치는 누설에 대한 원인제공을 감소시킬 수 있다.
- [0158] 두번째 원인은 양극 및 음극에서 슬러리 디스크들 사이의 내부 저항성 자기-방전 전류이다. 이러한 원인제공은 음극 및 양극에서 슬러리 디스크들 사이의 의존하는 물리적 접촉 및 전해질의 제한된 전기적 전도성으로부터 발생한다. 이러한 손실은 향상된 순도 및 수행 분리로 전극 재료에 의해 극적으로 감소될 수 있다. 새로운 실험은 양적으로 후자의 효과를 나타낸다. 도 35는 상용화된 분리기(Celgard)없고 있고의 유사한 전지에 대하여 전압 감쇠 및 누설 전류 곡선을 나타낸다. 이러한 구성요소는 커패시터 손실을 44시간에 161 μA·h에서 88 μA·h로 감소시킨다.
- [0159] 세번째 원인은 슬러리 재료, 잔류 산소 및/또는 수분의 불순물과 연관된 서플 반응을 포함하는 유도전류의 영향에 의해 생성된 전류로부터 발생한다. 패키징 재료의 공기-불투과성의 향상은 상기 반응으로부터 발생하는 전류를 감소시킬 수 있다. 새로운 실험은 Al 파우치(인장을 허용하기 위한 주름진(wrinkled) 구조로 구성될 수 있다)의 전지의 밀봉은 용량(capacity)손실을 161 μA·h에서 62 μA·h로 감소시킴을 나타낸다. 분리기 및 Al 파우치 패키징의 결합은 용량 손실을 23 μA·h로 제한할 수 있다. 도 35는 이러한 사실 모두를 요약한다.
- [0160] 개별 쇼트키 다이오드 인장 거동 분석. 실용적인 관점에서, 본 발명은 비교적 작은 크기의 다이오드 때문에, 집

적된 시스템의 전체적인 기계적 특성에 상당한 제한을 두지 않는 것을 관찰할 수 있다. 특히, ~4.0 GPa의 계수를 가지는 에폭시에 밀봉된 쇼트키 다이오드임에도, 기관(Ecoflex제조, ~60KPa의 계수)보다 10^4 배 초과로 더 효율적이고, 그 규모(길이 0.62mm, 폭 0.32mm, 및 높이 0.31mm)는 무선 시스템의 전체 크기(~30mm×~20mm)의 약간의 퍼센트(~2%)만을 나타낸다. 실험적으로, 본 발명은 시스템은 ~30% 및 넘어서까지의 인장성으로 견고함을 나타낸다.

[0161] 이러한 효과를 양적으로 연구하기 위해, 본 발명은 도 39(상단 패널)에서와 같이, 집적 시스템의 코일의 인장성에 대한 다이오드의 영향을 시험하는 전체적인, 3차원 한정 요소 시뮬레이션을 수행하였다. 도 39의 하단 패널의 결과는 다음을 나타낸다: (1)인장성의 감소는 다이오드가 포함될 때 32.6%에서 32.3%로 적당하고 (2)다이오드(즉, 에폭시)의 변형은 전체 시스템이 32.3%로 인장되었을 때에도 매우 작다(<0.15%, 균열을 유도하기 위해 필요한 변형보다 매우 작다).

[0162] 일반적인 인터페이스(interface) 변형 또한 중요하다. 도 24a는 30%의 인장성에 대하여, 중심에 장착된 다이오드로 큰 에코플렉스 기관에의 최대 주변형의 분포를 나타낸다. 도 40b는 다이오드/기관 인터페이스에서 기관 일반적인 변형의 분포를 나타낸다. 이러한 경우의 일반적인 인터페이스 변형은 인터페이스에서의 압축 변형에 일치하여, 음성(negative)이다. 인터페이스 크랙(crack)에서의 에너지 릴리스 속도에 기반한 이론적 예측과 부합하는 이러한 결과는 박리에 대한 성향을 최소화한다.

[0163] 무선 전력 수송 효율에 있어 코일 저항의 효과. 코일 저항/적격 요소는 효율성을 나타내는 중요한 파라미터이다. 효과를 나타내기 위한 추가적인 실험으로, 본 발명은 증가된 두께의 구리로 제조된 유사한 것으로 600nm 두께의 금 서펜타인 코일을 대체하였다. 결과는 7μm 두께의 구리 필름(Dupont)을 사용하여 형성된 코일은 185Ω의 총 저항을 가지고, 179mW의 입력 전력(사전에 보고된 결과와 유사한, 1mm의 거리에서)으로 30.8mW의 수신 전력을 발생한다. 부합하는 효율성은 17.2%이고, 이는 원래의 금 코일(4.9%)에 대하여 3가지 향상 요소를 더 나타낸다. 18μm 두께의 구리 포일(MTI Corp.)을 사용함에 의해 38Ω으로 코일 저항을 추가적으로 감소시킴은 수신 전력을 36.2mW로 향상시키고, 효율은 20.2%로 향상시킨다. 도 43a에 나타나있다.

[0164] 두께 및 전력 수송 효율에 있어서 이러한 증가는 인장성과 연관된 근본적인 역학의 변화를 가져온다. 특히, 두께가 증가함으로써, 인장성은 감소한다. 7μm의 두께를 가진 코일은 효율과 기계적 변형 사이의 우수한 조화를 제공하며, ~25%의 변형을 조절하기 위한 성능도 제공한다. 다양한 정도의 변형에서의 이미지는 도 43b에 나타나 있고, 이는 최대의 단축 변형 및 코일 서펜타인의 구조의 조건으로 나온 한정요소 분석과 잘 맞는다.

[0165] 무선 전력 수송 회로에서 전류 충전의 모델링.

[0166] 충전 회로는 하기 모델을 사용하여 설명될 수 있다:

$$U_0 = U(t) + L \frac{dI(t)}{dt} + I(t)R$$

[0167]

[0168] 상기에서 U_0 는 3볼트 전압의 충전원이다. L 및 R은 연관된 인덕턴스(inductance) 및 회로의 저항이다. $U(t)$ 는 전압계의 기록에 대한 시간이고 $I(t)$ 은 전류계의 기록에 대한 시간이다.

[0169] 프로그램은 편미분 방정식에 기반한 I-V 곡선을 시뮬레이션하기 위해 전개되었다. $U(t)$ 에 기반한 $I_s(t)$ 전류에 대한 시뮬레이션된 시간은 측정된 $I(t)$ 와 비교되고, 그 결과는 도 44a 및 44b에 나타나있다.

[0170] 전류를 시뮬레이션하기 위해 사용된 프로그램:

[0171] #include<iostream.h>

[0172] #include<stdio.h>

[0173] #include<stdlib.h>

[0174] #include<math.h>

[0175] #include<time.h>

[0176] #define tim 3500

```

[0177]         #define start 265
[0178]         float curre[tim];
[0179]         float nihe[tim];
[0180]         float test[tim];
[0181]         float voll[tim];
[0182]         FILE *fp;
[0183]         int main()
[0184]         {
[0185]             int i,j,k;

[0187]             fp=fopen("Cur.txt","r");
[0188]             for(i=0;i<tim;i++)
[0189]             {
[0190]                 fscanf(fp,"%f",&curre[i]);
[0191]                 curre[i]=--curre[i];
[0192]                 cout<<curre[i]<<endl;
[0193]             }
[0194]             fclose(fp);
[0195]             fp=fopen("Vol.txt","r");
[0196]             for(i=0;i<tim;i++)
[0197]             {
[0198]                 fscanf(fp,"%f",&voll[i]);
[0199]                 cout<<voll[i]<<endl;
[0200]             }
[0201]             fclose(fp);
[0202]             double coef1;
[0203]             double coef2;
[0204]             coef2=curre[1]/(voll[1]-voll[0]);
[0205]             cout<<coef2<<endl;
[0206]             test[0]=curre[0];
[0207]             test[start]=curre[start];
[0208]             double coef1th;
[0209]             double maxh=1000000000;
[0210]             double coef2th;
[0211]             for(coef2=0;coef2<0.04; coef2=coef2+0.0001)
[0212]             {

```

```

[0213]         cout<<coef2<<endl;
[0214]         for(coef1=0.94; coef1<=0.96; coef1=coef1+0.0001)
[0215]         {
[0216]             // cout<<coef1<<endl;
[0217]             for(i=start+1;i<tim;i++)
[0218]             {
[0219]                 test[i]=coef1*test[i-1]+(3-(voll[i]+voll[i-1])*0.5)*coef2;
[0220]             }
[0221]             double poi=0;
[0222]             for(i=start;i<tim;i++)
[0223]             {
[0224]                 poi+=(test[i]-curre[i])*(test[i]-curre[i]);
[0225]             }
[0226]             if(poi<maxh)
[0227]             {
[0228]                 coef1th=coef1;
[0229]                 coef2th=coef2;
[0230]                 maxh=poi;
[0231]                 for(int j=0;j<tim;j++)
[0232]                 {
[0233]                     nihe[j]=test[j];
[0234]                 }
[0235]             }
[0236]         }
[0237]     }
[0238]     cout<<coef1th<<endl;
[0239]     cout<<coef2th<<endl;
[0240]     cout<<maxh<<endl;
[0241]     fp=fopen("nihe.txt","w");
[0242]     for(i=0;i<tim;i++)
[0243]     {
[0244]         fprintf(fp, "%f", -nihe[i]);
[0245]         fprintf(fp, " ");
[0246]     }
[0247]     fclose(fp);
[0248]     fp=fopen("canshu.txt","w");

```

```
[0249]    fprintf(fp, "%f", coef1th);
[0250]    fprintf(fp, "%f");
[0251]    fprintf(fp, "%f", coef2th);
[0252]    fprintf(fp, "%f");
[0253]    fclose(fp);
[0254]    return(1);
[0255] }
```

[0256] 참조문헌

- [0257] [1] Rogers, J. A., Someya, T. & Huang, Y. G. Materials and Mechanics for Stretchable Electronics. *Science***327**, 1603-1607, doi:10.1126/science.1182383 (2010).
- [0258] [2] Wagner, S. & Bauer, S. Materials for stretchable electronics. *MRS Bull.***37**, 207-217, doi:10.1557/mrs.2012.37 (2012).
- [0259] [3] Kim, D. H., Ghaffari, R., Lu, N. S. & Rogers, J. A. in *Annual Review of Biomedical Engineering, Vol 14* Vol. 14 *Annual Review of Biomedical Engineering* (ed M. L. Yarmush) 113-128 (Annual Reviews, 2012).
- [0260] [4] Tian, B. Z. *et al.* Macroporous nanowire nanoelectronic scaffolds for synthetic tissues. *Nat. Mater.***11**, 986-994, doi:10.1038/nmat3404 (2012).
- [0261] [5] Takei, K. *et al.* Nanowire active-matrix circuitry for low-voltage macroscale artificial skin. *Nat. Mater.***9**, 821-826, doi:10.1038/nmat2835 (2010).
- [0262] [6] Ramuz, M., Tee, B. C. K., Tok, J. B. H. & Bao, Z. Transparent, Optical, Pressure-Sensitive Artificial Skin for Large-Area Stretchable Electronics. *Advanced Materials***24**, 3223-3227, doi:10.1002/adma.201200523 (2012).
- [0263] [7] Sekitani, T. *et al.* A rubberlike stretchable active matrix using elastic conductors. *Science***321**, 1468-1472, doi:10.1126/science.1160309 (2008).
- [0264] [8] Ahn, B. Y. *et al.* Omnidirectional Printing of Flexible, Stretchable, and Spanning Silver Microelectrodes. *Science***323**, 1590-1593, doi:10.1126/science.1168375 (2009).
- [0265] [9] Wu, H. *et al.* A transparent electrode based on a metal nanotrough network. *Nat. Nanotechnol.***8**, 421-425, doi:10.1038/nnano.2013.84 (2013).
- [0266] [10] Sekitani, T. *et al.* Stretchable active-matrix organic light-emitting diode display using printable elastic conductors. *Nat. Mater.***8**, 494-499, doi:10.1038/nmat2459 (2009).
- [0267] [11] Robinson, A. P., Mineev, I., Graz, I. M. & Lacour, S. P. Microstructured Silicone Substrate for Printable and Stretchable Metallic Films. *Langmuir***27**, 4279-4284, doi:10.1021/la103213n (2011).
- [0268] [12] Gray, D. S., Tien, J. & Chen, C. S. High-Conductivity Elastomeric Electronics. *Advanced Materials***16**, 393-397, doi:10.1002/adma.200306107 (2004).
- [0269] [13] Brosteaux, D., Axisa, F., Gonzalez, M. & Vanfleteren, J. Design and fabrication of elastic interconnections for stretchable electronic circuits. *IEEE Electron Device Lett.***28**, 552-554, doi:10.1109/led.2007.897887 (2007).
- [0270] [14] Vanfleteren, J. *et al.* Printed circuit board technology inspired stretchable circuits. *MRS Bull.***37**, 254-260, doi:10.1557/mrs.2012.48 (2012).
- [0271] [15] Kim, D. H., Xiao, J. L., Song, J. Z., Huang, Y. G. & Rogers, J. A. Stretchable, Curvilinear Electronics Based on Inorganic Materials. *Advanced Materials***22**, 2108-2124, doi:10.1002/adma.200902927

(2010).

- [0272] [16] Chen, Z. & Mecholsky, J. J. CONTROL OF STRENGTH AND TOUGHNESS OF CERAMIC-METAL LAMINATES USING INTERFACE DESIGN. *Journal of Materials Research***8**, 2362-2369, doi:10.1557/jmr.1993.2362 (1993).
- [0273] [17] Connor, M. T., Roy, S., Ezquerro, T. A. & Calleja, F. J. B. Broadband ac conductivity of conductor-polymer composites. *Physical Review* **B57**, 2286-2294, doi:10.1103/PhysRevB.57.2286 (1998).
- [0274] [18] Hajji, P., David, L., Gerard, J. F., Pascault, J. P. & Vigier, G. Synthesis, structure, and morphology of polymer-silica hybrid nanocomposites based on hydroxyethyl methacrylate. *Journal of Polymer Science Part B-Polymer Physics***37**, 3172-3187, doi:10.1002/(sici)1099-0488(19991115)37:22<3172::aid-polb2>3.0.co;2-r (1999).
- [0275] [19] Kim, Y. *et al.* Stretchable nanoparticle conductors with self-organized conductive pathways. *Nature***500**, 59-U77, doi:10.1038/nature12401 (2013).
- [0276] [20] Zhang, M. Q., Lu, Z. P. & Friedrich, K. On the wear debris of polyetheretherketone: Fractal dimensions in relation to wear mechanisms. *Tribology International***30**, 87-102, doi:10.1016/0301-679x(96)00027-8 (1997).
- [0277] [21] Goldberger, A. L. & West, B. J. FRACTALS IN PHYSIOLOGY AND MEDICINE. *Yale Journal of Biology and Medicine***60**, 421-& (1987).
- [0278] [22] Masters, B. R. Fractal analysis of the vascular tree in the human retina. *Annual Review of Biomedical Engineering***6**, 427-452, doi:10.1146/annurev.bioeng.6.040803.140100 (2004).
- [0279] [23] Kim, D. H. *et al.* Epidermal Electronics. *Science***333**, 838-843, doi:10.1126/science.1206157 (2011).
- [0280] [24] Sagan, H. *Space-filling curves*. (Springer-Verlag, 1994).
- [0281] [25] Chasiotis, I. *et al.* Strain rate effects on the mechanical behavior of nanocrystalline Au films. *Thin Solid Films***515**, 3183-3189, doi:10.1016/j.tsf.2006.01.033 (2007).
- [0282] [26] Lu, N. S., Wang, X., Suo, Z. G. & Vlassak, J. Metal films on polymer substrates stretched beyond 50%. *Applied Physics Letters***91**, 3, doi:10.1063/1.2817234 (2007).
- [0283] [27] Espinosa, H. D., Prorok, B. C. & Peng, B. Plasticity size effects in free-standing submicron polycrystalline FCC films subjected to pure tension. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids***52**, 667-689, doi:10.1016/j.jmps.2003.07.001 (2004).
- [0284] [28] Chasiotis, I. & Knauss, W. G. A new microtensile tester for the study of MEMS materials with the aid of atomic force microscopy. *Experimental Mechanics***42**, 51-57, doi:10.1177/0018512002042001789 (2002).
- [0285] [29] Jiang, H. *et al.* Finite deformation mechanics in buckled thin films on compliant supports. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America***104**, 15607-15612, doi:10.1073/pnas.0702927104 (2007).
- [0286] [30] Song, J. *et al.* Buckling of a stiff thin film on a compliant substrate in large deformation. *International Journal of Solids and Structures***45**, 3107-3121, doi:10.1016/j.ijsolstr.2008.01.023 (2008).
- [0287] [31] Sato, K., Yoshioka, T., Ando, T., Shikida, M. & Kawabata, T. Tensile testing of silicon film having different crystallographic orientations carried out on a silicon chip. *Sensors and Actuators a-Physical***70**, 148-152, doi:10.1016/s0924-4247(98)00125-3 (1998).
- [0288] [32] Jeong, J.-W. *et al.* Materials and Optimized Designs for Human-Machine Interfaces Via Epidermal Electronics. *Advanced Materials*, doi:10.1002/adma.201301921 (2013).
- [0289] [33] Yeo, W. H. *et al.* Multifunctional Epidermal Electronics Printed Directly Onto the Skin. *Advanced Materials***25**, 2773-2778, doi:10.1002/adma.201204426 (2013).

- [0290] [34] Fairbanks, M. S., McCarthy, D. N., Scott, S. A., Brown, S. A. & Taylor, R. P. Fractal electronic devices: simulation and implementation. *Nanotechnology***22**, doi:10.1088/0957-4484/22/36/365304 (2011).
- [0291] [35] Golestanirad, L. *et al.* Analysis of fractal electrodes for efficient neural stimulation. *Frontiers in neuroengineering***6**, 3, doi:10.3389/fneng.2013.00003 (2013).
- [0292] [36] Taylor, R. Vision of beauty. *Physics World***24**, 22-27 (2011).
- [0293] [37] Webb, R. C. *et al.* Ultrathin conformal devices for precise and continuous thermal characterization of human skin. *Nat Mater***12**, 938-944, doi:10.1038/nmat3755
- [0294] [38]<http://www.nature.com/nmat/journal/v12/n10/abs/nmat3755.html#supplementary-information> (2013).
- [0295] [39] Cohen, N. Fractal Antennas: Part 1. *Communications Quarterly*, 7-22 (1995).
- [0296] [40] Gianvittorio, J. P. & Rahmat-Samii, Y. Fractal antennas: A novel antenna miniaturization technique, and applications. *Ieee Antennas and Propagation Magazine***44**, 20-36, doi:10.1109/74.997888 (2002).
- [0297] [41] Puente, C., Romeu, J., Pous, R., Ramis, J. & Hijazo, A. Small but long Koch fractal monopole. *Electronics Letters***34**, 9-10, doi:10.1049/el:19980114 (1998).
- [0298] [42] Pelrine, R., Kornbluh, R., Pei, Q. B. & Joseph, J. High-speed electrically actuated elastomers with strain greater than 100%. *Science* **287**, 836-839 (2000).
- [0299] [43] Wagner, S. *et al.* Electronic skin: architecture and components. *Physica E Low Dimens Syst Nanostruct* **25**, 326-334 (2004).
- [0300] [44] Khang, D. Y., Jiang, H. Q., Huang, Y. & Rogers, J. A. A stretchable form of single-crystal silicon for high-performance electronics on rubber substrates. *Science* **311**, 208-212 (2006).
- [0301] [45] Sekitani, T. *et al.* A rubberlike stretchable active matrix using elastic conductors. *Science* **321**, 1468-1472 (2008).
- [0302] [46] Sekitani, T. & Someya, T. Stretchable organic integrated circuits for large-area electronic skin surfaces. *MRS Bulletin* **37**, 236-245 (2012).
- [0303] [47] Suo, Z. G. Mechanics of stretchable electronics and soft machines. *MRS Bulletin* **37**, 218-225 (2012).
- [0304] [48] Yoon, J. *et al.* Ultrathin silicon solar microcells for semitransparent, mechanically flexible and microconcentrator module designs. *Nature Mater.* **7**, 907-915 (2008).
- [0305] [49] Kim, D. H. *et al.* Epidermal Electronics. *Science* **333**, 838-843 (2011).
- [0306] [50] Mannsfeld, S. C. B. *et al.* Highly sensitive flexible pressure sensors with microstructured rubber dielectric layers. *Nature Mater.* **9**, 859-864 (2010).
- [0307] [51] Takei, K. *et al.* Nanowire active-matrix circuitry for low-voltage macroscale artificial skin. *Nature Mater.* **9**, 821-826 (2010).
- [0308] [52] Someya, T. *et al.* A large-area, flexible pressure sensor matrix with organic field-effect transistors for artificial skin applications. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **101**, 9966-9970 (2004).
- [0309] [53] Kim, D. H. *et al.* Materials for multifunctional balloon catheters with capabilities in cardiac electrophysiological mapping and ablation therapy. *Nature Mater.* **10**, 316-323 (2011).
- [0310] [54] Ko, H. C. *et al.* A hemispherical electronic eye camera based on compressible silicon optoelectronics. *Nature* **454**, 748-753 (2008).
- [0311] [55] Nishide, H. & Oyaizu, K. Toward flexible batteries. *Science* **319**, 737-738 (2008).
- [0312] [56] Pushparaj, V. L. *et al.* Flexible energy storage devices based on nanocomposite paper. *Proc. Natl.*

Acad. Sci. U. S. A. 104, 13574-13577 (2007).

- [0313] [57] Scrosati, B. Nanomaterials - Paper powers battery breakthrough. *Nature Nanotechnol.* 2, 598-599 (2007).
- [0314] [58] Hu, L. B. et al. Highly conductive paper for energy-storage devices. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 106, 21490-21494 (2009).
- [0315] [59] Hu, L., Wu, H., La Mantia, F., Yang, Y. & Cui, Y. Thin, Flexible Secondary Li-Ion Paper Batteries. *ACS Nano* 4, 5843-5848 (2010).
- [0316] [60] Yu, C. J., Masarapu, C., Rong, J. P., Wei, B. Q. & Jiang, H. Q. Stretchable Supercapacitors Based on Buckled Single-Walled Carbon Nanotube Macrofilms. *Adv. Mater.* 21, 4793-4797 (2009).
- [0317] [61] Hu, L. B. et al. Stretchable, Porous, and Conductive Energy Textiles. *Nano Lett.* 10, 708-714 (2010).
- [0318] [62] Kaltenbrunner, M., Kettlgruber, G., Siket, C., Schwodiauer, R. & Bauer, S. Arrays of Ultracompliant Electrochemical Dry Gel Cells for Stretchable Electronics. *Adv. Mater.* 22, 2065-2067 (2010).
- [0319] [63] Gaikwad, A. M. et al. Highly Stretchable Alkaline Batteries Based on an Embedded Conductive Fabric. *Adv. Mater.* 24, 5071-5076 (2012).
- [0320] [64] Tarascon, J. M. & Armand, M. Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. *Nature* 414, 359-367 (2001).
- [0321] [65] Scrosati, B. & Garche, J. Lithium batteries: Status, prospects and future. *J. Power Sources* 195, 2419-2430 (2010).
- [0322] [66] Thanawala, S. K. & Chaudhury, M. K. Surface modification of silicone elastomer using perfluorinated ether. *Langmuir* 16, 1256-1260 (2000).
- [0323] [67] Lee, J. et al. Stretchable GaAs Photovoltaics with Designs That Enable High Areal Coverage. *Adv. Mater.* 23, 986-991 (2011).
- [0324] [68] Lee, J. et al. Stretchable Semiconductor Technologies with High Areal Coverages and Strain-Limiting Behavior: Demonstration in High-Efficiency Dual-Junction GaInP/GaAs Photovoltaics. *Small* 8, 1851-1856 (2012).
- [0325] [69] Krieger, K. Extreme mechanics: Buckling down. *Nature* 488, 146-147 (2012).
- [0326] [70] Yoshima, K., Munakata, H. & Kanamura, K. Fabrication of micro lithium-ion battery with 3D anode and 3D cathode by using polymer wall. *J. Power Sources* 208, 404-408 (2012).
- [0327] [71] Ferg, E., Gummow, R. J., Dekock, A. & Thackeray, M. M. Spinel Anodes for Lithium-Ion Batteries. *J. Electrochem. Soc.* 141, L147-L150 (1994).
- [0328] [72] Owen, J. R. Rechargeable lithium batteries. *Chem. Soc. Rev.* 26, 259-267 (1997).
- [0329] [73] Gowda, S. R. et al. Conformal Coating of Thin Polymer Electrolyte Layer on Nanostructured Electrode Materials for Three-Dimensional Battery Applications. *Nano Lett.* 11, 101-106 (2011).
- [0330] [74] Sun, Y. G., Choi, W. M., Jiang, H. Q., Huang, Y. G. Y. & Rogers, J. A. Controlled buckling of semiconductor nanoribbons for stretchable electronics. *Nature Nanotechnol.* 1, 201-207 (2006).
- [0331] [75] Ouyang, M., Yuan, C., Muisener, R. J., Boulares, A. & Koberstein, J. T. Conversion of some siloxane polymers to silicon oxide by UV/ozone photochemical processes. *Chem. Mater.* 12, 1591-1596 (2000).
- [0332] [76] Datasheet for BAT 62-02LS E6327 on www.digikey.com
- [0333] <실시예 3> 초-인장성의 자기 유사형 서펜타인 배선의 역학

[0334]

초록

[0335]

자기 유사형, 서펜타인 레이아웃을 적용한 전기적 배선은 아일랜드-브릿지(island-bridge)설계에서, 작고, 비인장성의 능동 소자의 모음을 포함하는 시스템에 있어서 인장성의 우수한 정도를 제공한다. 이러한 예시는 상기 구조에 대한 유연성 및 탄성 인장성의 분석적 모델을 개선하고, 자기 유사형의 다른 차수에서 반복되는 형태식을 형성한다. 분석적 해결은 자기 유사형 구조의 차수가 하나 증가할 때 두배 이상의 탄성 인장성에 대해 증명하는, 한정 요소 분석(FEA)과 잘 맞는다. 설계 최적화는 능동 소자의 50% 및 70%의 공간 채움 비율을 각각 가지는 시스템에 대한 90% 및 50%의 탄성 인장성을 얻는다.

[0336]

1. 도입

[0337]

큰 응력 변형(>>1%)에 대한 탄성 반응을 제공하는 전자 및 광전자 시스템의 발전에 대한 관심은 최근에 급속도로 증가하였으며, [1-10] 이는 웨어러블(wearable) 광전지[11], '표피의' 건강 모니터[8], 안구와 같은 디지털 카메라[9,12], 및 감지성의 로봇 표피[13-15]와 같은 확립된 기술로 형성될 수 있는 중요한 적용 가능성의 범위에 대한 부분때문이다. 이러한 인장성 장치의 다수는 능동 구성요소가 작고, 국한된 구역(즉, 아일랜드)에 분포되고, 좁고, 변형가능한 전기적 및/또는 기계적 배선(즉, 브릿지)에 의해 연결되는, 아일랜드-브릿지(island-bridge) 설계[8,12,16-18]를 적용한다. 인장성의 조건하에, 상대적으로 굳은 아일랜드는 균열(예를 들어, <1%)을 일으킬 수 있는 변형으로부터 능동 구성요소(보통 취성(brittle)재료)를 효과적으로 분리할 수 있으며; 브릿지 구조는 거의 모든 변형을 조절할 수 있다[17-19]. 다수의 실제 장치에 대하여, 아일랜드-브릿지 설계는 두가지 경쟁 목표를 동시에 달성해야 하며, 즉, 능동 소자의 높은 표면 채움 비율 및 전체 시스템의 높은 인장성이 목표이다. 증명된 설계 해결은 서펜타인[1,8,17,20-27] 또는 비-동일평면[12,18]의 배선을 포함한다. 하지만, 이러한 기술들은 일반적으로 면적 범위를 중요하게 희생하지 않는 시스템에서, 50% 미만의 총 인장성의 정도를 가져온다. 최근에, Xu et al.[19]는 자기 유사형 서펜타인 구조(도 45a 에 나타난), 공간-채움 곡선의 유형을 이용하는 배선 설계의 대체 형식을 나타내었다. 이러한 개념은 ~300%까지의 이축형 인장성, 및 ~50%와 같이 높은 활성 물질의 면적 범위를 갖춘 리튬-이온 전지가 가능하게 한다. 포괄적인 실험적 및 수치적 조사는 인접한 아일랜드 사이의 주어진 공간에 대하여 기존의 서펜타인 구조와 비교하여 향상된 정도의 인장성을 가진 자기 유사형 서펜타인 배선을 나타낸다. 이들의 순차적 풀어짐에 대한 구조 및 메커니즘에 있어서 공간 채움 구조의 특징은 중요한 역할을 수행할 것으로 나타난다.

[0338]

이러한 예시는 자기 유사형 서펜타인 배선의 유연성 및 탄성 인장성(하기에서 인장성으로 단순하게 나타낸다)을 연구하고, 인장 제한을 최적화하는 설계 가이드라인을 형성하기 위한 분석적 모델을 발전시키는 데에 목표가 있다. 본 발명에서는 배선이 변형이 자유롭게 발생할 수 있고 기관과의 상호작용이 무시될 수 있는 것과 같은 기관의 지지와 결합되지 않는 시나리오에 중점을 둔다. 배선에 자유롭게 서스펜드(suspend)됨은 두 가지 방법 중 어느 하나에 의해 제조될 수 있다: i) 탄성 기관에 표면 릴리프 구조를 몰딩[16,18,28], 및 상승된 릴리프의 상단에 아일랜드를 결합; ii)기관[29,30]에 아일랜드의 선택적 결합이 가능하게 하는 SiO₂ 증착의 마스크를 설계이며, 이는 기관과 최소의 상호작용으로 배선을 이탈할 때에 나타난다. 현재 연구는 주로 무선 유도성 코일[19], 및 광전지 모듈[11]과 같은, 낮은 전기 저항성을 요구하는 적용에 대해 요구되는 것과 같이, 폭에 비교할 만한 두께를 가진 상대적으로 두꺼운 배선에 중점을 둔다. 이러한 경우에, 배선의 변형은 시스템이 인장하에 있을 때, 버클링보다 먼저 굽힘에 의해 결정된다. 본 발명에서, 임계의 버클링 변형은 버클링이 수용가능한 변형의 범위내에서 유발되지 않은 것과 같이, 인장성과 비교하여 크다[31]. 이러한 역학은 사전에 조사되었던[17,31-33] 프리스텐딩, 얇은 서펜타인 배선의 유형과 질적으로 다르다. 프리스텐딩, 두꺼운 자기 유사형 배선에 대하여, 유연성 및 인장성의 분석적 모델은 본 연구에서 설립되었다. 모델은 임의의 자기 유사형 차수로 확장된다. 결과는 실제 적용에 대한 설계 가이드라인을 형성한다.

[0339]

이러한 예시는 하기와 같이 약술된다: 부문 2는 유연성 및 인장성을 분석하기 위한 기계적 모델을 나타내기 위해서, 단순화된 구조적 구성, 자기 유사형의 직사각형(rectangular)의 배선에 중점을 둔다. 분석 모델은 부문 3에서 일반화된 자기 유사형 직사각형(rectangular) 및 서펜타인 배선으로 확장된다. 자기 유사형 배선의 인장성은 부문 4에서 연구된다. 부문 5는 높은 시스템 인장성을 달성하는 이점을 나타내기 위해 인장성의 전자장치에 대한 자기 유사형 서펜타인 배선의 최적의 설계를 나타낸다.

[0340]

2. 자기 유사형 직사각형 배선

[0341]

본 부문은 직사각형 구조(도 45b에 나타난 것과 같이)에 있어서 구조적으로 단순한 자기 유사형 배선에 중점을 둔다. 직사각형의 배선은 기존의 서펜타인 배선(도 45c의 상단 패널)의 변형이고, 그 단순한 구조 때문에 자기

유사형 구조를 형성하기에 용이하다. 자기 유사형 직사각형의 배선의 유연성을 결정하기 위해서, 요점은 근접한 차수, 즉, 회귀 공식(recursion formula)의 유연성 사이의 관계를 형성하기 위함이다. 본 발명은 부문 2.2의 모델을 나타내기 위한 예시로써 제1차 자기 유사형 직사각형의 배선을 처음으로 나타내고, 그 후에 부문 2.3 및 2.4에서 각각 제2차 및 임의의 차수에 대한 이론적 구성을 일반화한다.

2.1. 구조

본 세부항목은 자기 유사형 직사각형의 배선의 구조적 구성을 나타낸다. 제1차(원래의) 직사각형의 배선은 도 45b의 검은색 박스에 나타난 것과 같이, 서로에 대해 직각이고 직렬로 연결된 직선의 와이어 두 세트를 포함한다. 도 45b의 파란색 박스에 나타난 제2차 직사각형의 배선은 90° 로 구조가 회전하는 제1차 배선의 규모를 감소함에 의해 형성되고, 원래 구조의 레이아웃을 재생성하는 방식으로, 다수의 복사체들을 연결한다. 도 45b의 넓은 파란색 선은 제1차 직사각형 구조와 유사한 제2차 구조를 나타낸다. 동일한 알고리즘을 실행함에 의해, 본 발명은 도 45b의 붉은색 및 보라색 박스에 나타난 것과 같이, 제3차 및 제4차 직사각형의 배선을 생성할 수 있으며, 이때 붉은색 및 보라색 선은 제3차 및 제4차 구조를 각각 나타낸다.

자기 유사형 직사각형의 배선에 대하여, m 은 단위 셀의 수를 나타내고 n 은 각 차수에서의 높이/간격 종횡비를 나타낸다. 따라서 제 i^{th} 차($i=1..n$)의 수평 및 수직선의 길이, $l^{(i)}$ 및 $h^{(i)}$ (도 45b)는 하기 식(1)에 의해 연관된다.

$$h^{(i)} = \eta l^{(i)}$$

식 (1)

추가적으로, 제 i^{th} 차 구조의 높이는 제 $(i-1)^{\text{th}}$ 차 구조의 두 개의 끝 사이의 길이와 동일하며, 하기 식(2)으로 나타낸다.

$$h^{(i)} = 2ml^{(i-1)} \quad (i = 2..n).$$

식(2)

식 (1) 및 (2)은 $l^{(n)}$, η 및 m 의 조건의 어느 차수에서 길이 및 높이를 나타내며, 이는 하기 식(3)과 같다.

$$l^{(i)} = (\eta/2m)^{n-i} l^{(n)}, \quad h^{(i)} = \eta(\eta/2m)^{n-i} l^{(n)}, \quad (i = 1..n).$$

식(3)

이는 임의의 자기 유사형 직사각형의 배선의 구조가 하나의 기본 길이($l^{(n)}$) 및 자기 유사형 차수(n), 높이/간격 비율(η) 및 단위 셀의 수(m)로 불리는 3가지 무차원 파라미터에 의해 특징지어짐을 나타낸다. 이때 $n \geq 3$ 에 대하여, 하기 식(4)때문에 높이/간격 비율 η 에 추가적인 제한이 있음이 언급되어야 하며, 이는 도 45b 및 47b(설명된 것)에 나타난 제3차 직사각형의 배선 구조로부터 관찰될 수 있다.

$$l^{(i)} = (2m_h + 1)l^{(i-2)} \quad (i = 3..n),$$

식(4)

이때 m_h 는 제 i^{th} 차 구조($i=3..n$)의 수평적 부분에 의해 나타나는 구조에서 전체적인 단위 셀의 수이다. 식(3) 및 (4)은 $n \geq 3$ 에 대하여 높이/간격 비율 η 에 제한을 둔다.

$$\eta = \frac{2m}{\sqrt{2m_h + 1}} \quad (i = 3..n).$$

식(5)

즉, 높이/간격 비율은 $n \geq 3$ 에 대하여 일부 이산값(discrete values)만을 나타낼 수 있다. 도 45b는 $m=1$ 부터 4 까지, $m=4$ 및 $\eta=8/\sqrt{11}$ 을 가지는 자기 유사형 직사각형의 배선의 하나의 세트를 나타낸다.

2.2. 제1차 직사각형의 배선의 유연성

도 46a는 m 단위 셀 및 높이/간격 비율 n 을 가지는 제1차 자기 유사형 직사각형의 배선의 개략도를 나타낸다. 도 46b에 나타난 것과 같이, 제1차 구조의 대표적인 단위 셀(예를 들어, 제 k^{th} 차 단위 셀)은 5개의 직선형태의 와이어들(즉, 제 0^{th} 차 구조)로 구성된다(Parts I 내지 V). 수직 와이어들, Parts I 및 III는 $h^{(1)}/2$ 의 길이를 가지고, Part II는 $h^{(1)}$ 의 길이를 가진다. 수평 와이어들, Parts IV 및 V는 $l^{(1)}$ 의 길이를 가진다.

도 46a에 나타난 것과 같이, 배선의 면 내에서, 왼쪽 끝에 고정된 제1차 직사각형의 배선을 고려하고, 축력(axial force) N (배선의 양 끝 사이의 거리에 따른다), 전단력 Q (N 에 일반적인), 및 오른쪽 끝에서의 굽힘 모멘트 M 을 조건으로 한다. 서펜타인 배선의 폭(w) 및 두께(t)는 일반적으로 커브형 빔으로써 모델이 될 수 있는 구조와 같은 길이보다 훨씬 작다. u 및 v 는 각각 배선의 축방향(N 및 Q 에 평행한)에 따르고 일반적인 오른쪽 끝의 변위를 나타내고, θ 는 회전각(도 46a)이다. 이들은 하기 식(6)에 의해 배선에서 변형 에너지 $W^{(1)}$ 을 통해(N , Q , M)과 연관된다.

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ \theta \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \partial W^{(1)} / \partial N \\ \partial W^{(1)} / \partial Q \\ \partial W^{(1)} / \partial M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11}^{(1)} & T_{12}^{(1)} & T_{13}^{(1)} \\ T_{12}^{(1)} & T_{22}^{(1)} & T_{23}^{(1)} \\ T_{13}^{(1)} & T_{23}^{(1)} & T_{33}^{(1)} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} N \\ Q \\ M \end{pmatrix} = \mathbf{T}^{(1)} \begin{pmatrix} N \\ Q \\ M \end{pmatrix} \quad \text{식(6)}$$

상기 $W^{(1)} = (N, Q, M) \mathbf{T}^{(1)} (N, Q, M)^T / 2$ 는 배선의 선형 탄성 거동에 대한 N , Q , 및 M 의 이차 함수이고; $\mathbf{T}^{(1)}$ 은 제1차 배선의 대칭 유연성 행렬(symmetric flexibility matrix)이며 정해진다. 또한 변형 에너지는 모든 제 0^{th} 차 배선(Parts I 내지 V)에서 변형 에너지 $W^{(0)}$ 의 합과 동일하다, 즉, 하기 식(7)와 같다.

$$W^{(1)} = W^{(0)} = \sum_{k=1}^m (W_k^I + W_k^{II} + W_k^{III} + W_k^{IV} + W_k^V) \quad \text{식(7)}$$

상기 W_k^I 내지 W_k^V 는 제 k^{th} 차 단위 셀에서 각 구성요소의 변형 에너지를 나타낸다. 제 0^{th} 차 구조에 대하여, 즉 길이 l 및 굽힘 강성 EI 를 가진 직선 와이어에 대하여, 빔 이론은 [34]에서와 같이 유연성 행렬을 나타낸다.

$$\mathbf{T}^{(0)}(l) = \frac{1}{6EI} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2l^3 & 3l^2 \\ 0 & 3l^2 & 6l \end{pmatrix} \quad \text{식(8)}$$

본 발명에서 막 에너지는 무시된다. 제1차 배선(도 46b)의 제 k^{th} 차 단위 셀의 자유물체도(free body diagram)는 각 와이어에 축력, 전단력 및 굽힘 모멘트를 나타내며, 각 제 0^{th} 차 배선의 변형 에너지는 하기 식(9)에서와 같이 얻어질 수 있다.

$$\begin{pmatrix} W_k^I \\ W_k^{II} \\ W_k^{III} \\ W_k^{IV} \\ W_k^V \end{pmatrix} = \frac{1}{2} (N, Q, M) \left\{ \begin{array}{c} \mathbf{D}_I \mathbf{T}^{(0)} \left[h^{(1)}/2 \right] \mathbf{D}_I^T \\ \mathbf{D}_{II} \mathbf{T}^{(0)} \left[h^{(1)} \right] \mathbf{D}_{II}^T \\ \mathbf{D}_{III} \mathbf{T}^{(0)} \left[h^{(1)}/2 \right] \mathbf{D}_{III}^T \\ \mathbf{D}_{IV} \mathbf{T}^{(0)} \left[l^{(1)} \right] \mathbf{D}_{IV}^T \\ \mathbf{D}_V \mathbf{T}^{(0)} \left[l^{(1)} \right] \mathbf{D}_V^T \end{array} \right\} (N, Q, M)^T \quad \text{식(9)}$$

[0365] 이때 상기 식(9)의 D_I 내지 D_V 는 하기 식(10)과 같다.

$$\begin{aligned} D_I &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & -h^{(1)}/2 \\ 1 & 0 & -(2m-2k+2)l^{(1)} \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, & D_{II} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & -h^{(1)}/2 \\ -1 & 0 & (2m-2k+1)l^{(1)} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ D_{III} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -(2m-2k)l^{(1)} \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, & D_{IV} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & h^{(1)}/2 \\ 0 & 1 & (2m-2k+1)l^{(1)} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ D_V &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & h^{(1)}/2 \\ 0 & -1 & -(2m-2k)l^{(1)} \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

[0366]
[0367] 식(10)

[0368] 식(7)로의 식(9)의 대입은 하기 식(11)과 같은 제1 및 0차 배선의 유연성 행렬들 사이의 회귀 공식(recursive formula)을 나타낸다.

$$T^{(1)} = \sum_{k=1}^m \left\{ \begin{aligned} &D_I T^{(0)} \begin{bmatrix} h^{(1)}/2 \end{bmatrix} D_I^T + D_{II} T^{(0)} \begin{bmatrix} h^{(1)} \end{bmatrix} D_{II}^T + D_{III} T^{(0)} \begin{bmatrix} h^{(1)}/2 \end{bmatrix} D_{III}^T \\ &+ D_{IV} T^{(0)} \begin{bmatrix} l^{(1)} \end{bmatrix} D_{IV}^T + D_V T^{(0)} \begin{bmatrix} l^{(1)} \end{bmatrix} D_V^T \end{aligned} \right\} \quad \text{식(11)}$$

[0370] 상기 식(11)에 식(8)의 $T^{(0)}$ 의 대입은 단위 셀의 수 m , 높이/간격 비율 η 및 $l^{(1)}$ 의 조건으로 제1차 배선의 유연성의 단순한 표현을 나타낸다.

$$T^{(1)}[m, \eta, l^{(1)}] = \frac{1}{EI} \begin{bmatrix} m \frac{\eta^3 + 3\eta^2}{6} [l^{(1)}]^3 & m \frac{\eta(\eta+2)}{4} [l^{(1)}]^3 & 0 \\ m \frac{\eta(\eta+2)}{4} [l^{(1)}]^3 & \frac{(8m^3 + m)\eta + 8m^3}{3} [l^{(1)}]^3 & 2m^2(\eta+1) [l^{(1)}]^2 \\ 0 & 2m^2(\eta+1) [l^{(1)}]^2 & 2m(\eta+1) l^{(1)} \end{bmatrix} \quad \text{식(12)}$$

[0371]
[0372]
[0373] 높은 차수 (n) 구조에 대해 일반화하기 위한 편의를 위해, 유연성 행렬의 하기 무차원 형식이 적용된다.

$$\begin{bmatrix} u/l^{(i)} \\ v/l^{(i)} \\ \theta \end{bmatrix} = \frac{l^{(i)}}{EI} \bar{T}^{(i)} \begin{bmatrix} Nl^{(i)} \\ Ql^{(i)} \\ M \end{bmatrix}, \quad i=1..n \quad \text{식(13)}$$

[0374]
[0375] 상기 $T^{(1)}$ 는 무차원이고, $T^{(1)}$ 은 하기 식(14)에 의해 주어진다.

$$\bar{T}^{(1)}(m, \eta) = \begin{bmatrix} m \frac{\eta^3 + 3\eta^2}{6} & m \frac{\eta(\eta+2)}{4} & 0 \\ m \frac{\eta(\eta+2)}{4} & \frac{(8m^3 + m)\eta + 8m^3}{3} & 2m^2(\eta+1) \\ 0 & 2m^2(\eta+1) & 2m(\eta+1) \end{bmatrix} \quad \text{식(14)}$$

제0차 구조에 대하여, 즉, 길이 λ 의 직선 와이어, 무차원 유연성 행렬은 $(u/\lambda, v/\lambda, \theta)^T = (\lambda/EI)T^{(0)}(N\lambda, Q\lambda, M)^T$ 로 정의되며, $T^{(0)}$ 은 하기 식(15)과 같다.

$$\bar{T}^{(0)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{1}{2} & 1 \end{pmatrix} \quad \text{식(15)}$$

2.3. 제2차 직사각형의 배선의 유연성

제2차 배선의 유연성 행렬에 대한 회귀 공식(recursive formula)은 이 부분에서 성립된다. 제2차 구조의 대표적인 단위 셀은 도 47a에 나타난 것과 같이, $l^{(2)}$ 의 길이를 가지며, 3개의 제1차 구조(Parts I 내지 III), 및 두 개의 직선 와이어(즉, 제0차 구조)(Parts IV 및 V)로 구성된다. 제1차 구조, Parts I 또는 III는 $m/2$ (m 은 짝수인 정수이다) 단위 셀을 포함하고, Part II는 m 단위 셀을 포함한다.

제2차 구조의 변형 에너지는 하기 식(16)과 같은 무차원 유연성 행렬의 조건으로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} W^{(2)} &= \frac{l^{(2)}}{2EI} [Nl^{(2)}, Ql^{(2)}, M] \bar{T}^{(2)} [Nl^{(2)}, Ql^{(2)}, M]^T \\ &= \frac{l^{(2)}}{2EI} (N, Q, M) \begin{bmatrix} l^{(2)} & 0 & 0 \\ 0 & l^{(2)} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \bar{T}^{(2)} \begin{bmatrix} l^{(2)} & 0 & 0 \\ 0 & l^{(2)} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (N, Q, M)^T \end{aligned} \quad \text{식(16)}$$

이 때 $T^{(2)}$ 는 결정된다. 또한 변형 에너지는 모든 제1차(Parts I 내지 III, 도 47a) 및 제0차(Parts IV 및 V, 도 47a) 배선에 있어서, 변형 에너지의 합과 동일하다, 즉, 하기 식(17)으로 나타난다.

$$W^{(2)} = \sum_{k=1}^m (W_k^I + W_k^{II} + W_k^{III} + W_k^{IV} + W_k^V) \quad \text{식(17)}$$

상기에서

$$W_k^{II} = \frac{l^{(1)}}{2EI} [Nl^{(1)}, Ql^{(1)}, M] \bar{D}_H \bar{T}^{(1)}(m, \eta) \bar{D}_H^T [Nl^{(1)}, Ql^{(1)}, M]^T \quad \text{식(18)}$$

W_k^{II} 는 Part II(제1차 구조, m 단위 셀)에서의 변형 에너지이며, 이때 식(10)($l^{(1)}$ 및 $h^{(1)}$ 는 $l^{(2)}$ 및 $h^{(2)}$ 로 각각

$$\bar{D}_{II} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -m \\ -1 & 0 & (4m-4k+2)m\eta^{-1} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

대체된다)에서 정규화된 D_{II} 는 다음과 같다. 이다;

$$W_k^{IV} = \frac{l^{(2)}}{2EI} [Nl^{(2)}, Ql^{(2)}, M] \bar{D}_{IV} \bar{T}^{(0)} \bar{D}_{IV}^T [Nl^{(2)}, Ql^{(2)}, M]^T$$

$$W_k^V = \frac{l^{(2)}}{2EI} [Nl^{(2)}, Ql^{(2)}, M] \bar{D}_V \bar{T}^{(0)} \bar{D}_V^T [Nl^{(2)}, Ql^{(2)}, M]^T$$

[0388]

식(19)

[0389]

상기 식(19)는 Parts IV 및 V [제0차 구조, 길이 $\lambda=l^{(2)}$]에서의 변형 에너지이고, 이때 식(10)($l^{(1)}$ 및 $h^{(1)}$ 는

$$\bar{D}_{IV} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \eta/2 \\ 0 & 1 & 2m-2k+1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$l^{(2)}$ 및 $h^{(2)}$ 로 각각 대체된다)에서 정규화된 D_{IV} 및 D_V 는

$$\bar{D}_V = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \eta/2 \\ 0 & -1 & -2m+2k \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

이다;

$$W_k^I = \frac{l^{(1)}}{2EI} [Nl^{(1)}, Ql^{(1)}, M] \bar{D}_I \bar{T}^{(1)} \left(\frac{m}{2}, \eta \right) \bar{D}_I^T [Nl^{(1)}, Ql^{(1)}, M]^T$$

$$W_k^{III} = \frac{l^{(1)}}{2EI} [Nl^{(1)}, Ql^{(1)}, M] \bar{D}_{III} \bar{T}^{(1)} \left(\frac{m}{2}, \eta \right) \bar{D}_{III}^T [Nl^{(1)}, Ql^{(1)}, M]^T$$

[0390]

식(20)

[0391]

상기 식(20)는 Parts I 및 III(제1차 구조, $m/2$ 단위 셀)에서의 변형 에너지이며, 이때 식(10)($l^{(1)}$ 및 $h^{(1)}$ 는 $l^{(2)}$ 및 $h^{(2)}$ 로 각각 대체된다)에서 정규화된 D_I 및 D_{III} 는

$$\bar{D}_I = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -m \\ 1 & 0 & -4(m-k+1)m\eta^{-1} \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad \bar{D}_{III} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -4(m-k)m\eta^{-1} \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

이다.

[0392]

식(17)에 식(18) 내지 (20)의 대입은 제2차 배선의 유연성 행렬에 대한 회귀 공식(recursive formula)을 나타내고, 이는 하기 식(21)과 같다.

$$\bar{T}^{(2)} = \frac{\eta}{2m} \begin{pmatrix} \frac{\eta}{2m} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\eta}{2m} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \sum_{k=1}^m \left\{ \begin{aligned} &\bar{D}_I [\bar{T}^{(1)} K(m\eta) + K^T(m\eta) \bar{T}^{(1)}] \bar{D}_I^T \\ &+ \bar{D}_{II} \bar{T}^{(1)} \bar{D}_{II}^T \\ &+ \bar{D}_{III} [\bar{T}^{(1)} K(m\eta) + K^T(m\eta) \bar{T}^{(1)}] \bar{D}_{III}^T \end{aligned} \right\} \begin{pmatrix} \frac{\eta}{2m} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\eta}{2m} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$+ \sum_{k=1}^m [\bar{D}_{IV} \bar{T}^{(0)} \bar{D}_{IV}^T + \bar{D}_V \bar{T}^{(0)} \bar{D}_V^T]$$

[0393]

[0394]

식(21)

$$\mathbf{K}(m\eta) = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -m\eta & 1 \end{pmatrix}$$

[0395]

이때 식(22)이며,

[0396]

항등식 (23)로부터 결과가 나타난다.

$$\bar{\mathbf{T}}^{(1)}\left(\frac{m}{2}, \eta\right) = \bar{\mathbf{T}}^{(1)}(m, \eta) \mathbf{K}(m\eta) + \mathbf{K}^T(m\eta) \bar{\mathbf{T}}^{(1)}(m, \eta)$$

[0397]

식(23)

[0398]

식(21)에 식(15) 및 식(14)의 $\bar{\mathbf{T}}^{(0)}$ 및 $\bar{\mathbf{T}}^{(1)}$ 의 대입은 $\bar{\mathbf{T}}^{(2)}$ 를 하기 식(24)와 같이 나타낸다.

$$\bar{\mathbf{T}}^{(2)}(m, \eta) = \begin{bmatrix} \eta^2 \frac{\eta^2 + 2m^2(f+2)}{12m} & \frac{m}{4} \eta(f+1) & 0 \\ \frac{m}{4} \eta(f+1) & \frac{\eta^5(\eta+3) + 8m^2(f-1) + 64m^4f}{24m} & 2m^2f \\ 0 & 2m^2f & 2mf \end{bmatrix}$$

[0399]

식(24)

[0400]

이때 $f = \eta^2 + \eta + 1$ 이다.

[0401]

2.4. 높은 차수의 직사각형 배선의 유연성

[0402]

높은 차수($n \geq 3$)의 직사각형의 배선에 대하여, 대표적인 단위 셀은 세가지 제($n-1$)차 구조(Parts I 내지 III), 및 두가지 제($n-2$)차 구조(Parts IV 및 V)로 구성된다. 제($n-1$)차 구조, Parts I 또는 III은 $m/2$ (m 은 짝수인 정수이다)단위 셀을 포함하며, Part II는 m 단위 셀을 포함한다. 회귀 공식(recursive formula)(21)은 하기 식(25)로 된다.

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{T}}^{(n)} &= \frac{\eta}{2m} \begin{pmatrix} \frac{\eta}{2m} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\eta}{2m} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \sum_{k=1}^m \left\{ \begin{aligned} &\bar{\mathbf{D}}_I \left[\bar{\mathbf{T}}^{(n-1)} \mathbf{K}(m\eta) + \mathbf{K}^T(m\eta) \bar{\mathbf{T}}^{(n-1)} \right] \bar{\mathbf{D}}_I^T \\ &+ \bar{\mathbf{D}}_{II} \bar{\mathbf{T}}^{(n-1)} \bar{\mathbf{D}}_{II}^T \\ &+ \bar{\mathbf{D}}_{III} \left[\bar{\mathbf{T}}^{(n-1)} \mathbf{K}(m\eta) + \mathbf{K}^T(m\eta) \bar{\mathbf{T}}^{(n-1)} \right] \bar{\mathbf{D}}_{III}^T \end{aligned} \right\} \begin{pmatrix} \frac{\eta}{2m} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\eta}{2m} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &+ \frac{\eta^2}{4m^2} \sum_{k=1}^m \left[\bar{\mathbf{D}}_{IV}^* \bar{\mathbf{T}}^{(n-2)} \bar{\mathbf{D}}_{IV}^{*T} + \bar{\mathbf{D}}_V^* \bar{\mathbf{T}}^{(n-2)} \bar{\mathbf{D}}_V^{*T} \right] \quad \text{for } n \geq 3 \end{aligned}$$

[0403]

[0404]

식(25)

$$\bar{\mathbf{D}}_{IV}^* = \begin{bmatrix} \eta^2/(4m^2) & 0 & \eta/2 \\ 0 & \eta^2/(4m^2) & 2m-2k+1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

[0405]

이때

및

$$\bar{D}_V^* = \begin{bmatrix} \eta^2/(4m^2) & 0 & \eta/2 \\ 0 & -\eta^2/(4m^2) & -2m+2k \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \text{이다.}$$

[0406] 제(n-2)차 구조(예를 들어, $n=3$ 의 경우에서 도 47b의 Parts IV 및 V)는 제(n-2)차 구조의 $(m_h+1/2)$ 단위 셀을 가진다. 하지만, 전체에 대한 제(n-2)차 구조의 분포 때문에 유연성이 제(n-1)차 구조보다 작으며, Parts IV 및 V의 무차원 유연성은 m 단위 셀을 가지는 자기 유사형 제(n-2)차 구조에 의해 근접하게 될 수 있다. 이는 FEA에 의해 나타난 것과 같이, 우수한 정확도를 나타낸다.

[0407] 3. 일반화된 자기 유사형 배선

[0408] 부문 2에서의 자기 유사형 직사각형의 배선에 대한 분석 모델은 본 부문에서 일반화된 자기 유사형 직사각형 및 서펜타인 배선으로 확장된다.

[0409] 3.1. 일반화된 자기 유사형 직사각형의 배선

[0410] 일반화된 직사각형의 배선은 여전히 직사각형의 형태를 나타내지만(도 48에 나타난다), 단위 셀의 수 또는 다른 차수에 대하여 동일한 높이/간격 비율, 둘 다 요구하지 않는다. 각 차수는 자체의 높이/간격 비율 $n^{(i)}$ 및 단위 셀의 수 $m^{(i)}$ ($i=1..n$)을 가지며, 이때 $m^{(n)}$ 만이 홀수가 될 수 있고, $m^{(1)}$ 내지 $m^{(n)}$ 은 짝수이어야 한다. 도 48은 일반화된 제3차 자기 유사형 직사각형의 배선을 나타낸다. 제n차의 일반화된 자기 유사형 직사각형의 배선에 대하여, 구조 관계 식(1) 내지 (3)은 하기 식(26) 내지 (28)로 된다.

$$h^{(i)} = \eta^{(i)} l^{(i)} \quad \text{식(26)}$$

$$h^{(i)} = 2m^{(i-1)} l^{(i-1)} \quad (i=2..n) \quad \text{식(27)}$$

$$l^{(i)} = \left[\prod_{k=1}^{n-i} \frac{\eta^{(n-k+1)}}{2m^{(n-k)}} \right] l^{(n)}, \quad h^{(i)} = \eta^{(i)} \left[\prod_{k=1}^{n-i} \frac{\eta^{(n-k+1)}}{2m^{(n-k)}} \right] l^{(n)}, \quad (i=1..n-1). \quad \text{식(28)}$$

[0414] 식(15)의 유연성 행렬 $\bar{T}^{(0)}$ 는 동일하게 유지되고, $\bar{T}^{(1)}$ 에 대한 식(14)의 m 및 n 은 각각 $m^{(1)}$ 및 $n^{(1)}$ 에 의해 대체될 필요가 있다. 식(21)의 $\bar{T}^{(2)}$ 및 식(25)의 $\bar{T}^{(n)}$ ($n \geq 3$)에 대한 회귀 공식은 하기 식(29) 및 식(30)으로 된다.

$$\bar{T}^{(2)} = \frac{\eta^{(2)}}{2m^{(1)}} \begin{bmatrix} \frac{\eta^{(2)}}{2m^{(1)}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\eta^{(2)}}{2m^{(1)}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \sum_{k=1}^{m^{(2)}} \left\langle \begin{bmatrix} \bar{D}_I^{(2)} \left\{ \bar{T}^{(1)} K \left[m^{(1)} \eta^{(1)} \right] \right\} + K^T \left[m^{(1)} \eta^{(1)} \right] \bar{T}^{(1)} \\ + \bar{D}_{II}^{(2)} \bar{T}^{(1)} \bar{D}_{II}^{(2)T} \\ + \bar{D}_{III}^{(2)} \left\{ \bar{T}^{(1)} K \left[m^{(1)} \eta^{(1)} \right] \right\} + K^T \left[m^{(1)} \eta^{(1)} \right] \bar{T}^{(1)} \end{bmatrix} \bar{D}_{III}^{(2)T} \right\rangle \begin{bmatrix} \frac{\eta^{(2)}}{2m^{(1)}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\eta^{(2)}}{2m^{(1)}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \sum_{k=1}^{m^{(2)}} \left[\bar{D}_{IV}^{(2)} \bar{T}^{(0)} \bar{D}_{IV}^{(2)T} + \bar{D}_V^{(2)} \bar{T}^{(0)} \bar{D}_V^{(2)T} \right]$$

[0415]

[0416]

식(29)

$$\bar{T}^{(n)} = \frac{\eta^{(n)}}{2m^{(n-1)}} \begin{bmatrix} \frac{\eta^{(n)}}{2m^{(n-1)}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\eta^{(n)}}{2m^{(n-1)}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \sum_{k=1}^{m^{(n)}} \left\langle \begin{aligned} &\bar{D}_I^{(n)} \left\{ \bar{T}^{(n-1)} K \begin{bmatrix} m^{(n-1)} \eta^{(n-1)} \\ + K^T \begin{bmatrix} m^{(n-1)} \eta^{(n-1)} \end{bmatrix} \bar{T}^{(n-1)} \end{bmatrix} \bar{D}_I^{(n)T} \right. \\ &+ \bar{D}_{II}^{(n)} \bar{T}^{(n-1)} \bar{D}_{II}^{(n)T} \\ &+ \bar{D}_{III}^{(n)} \left\{ \bar{T}^{(n-1)} K \begin{bmatrix} m^{(n-1)} \eta^{(n-1)} \\ + K^T \begin{bmatrix} m^{(n-1)} \eta^{(n-1)} \end{bmatrix} \bar{T}^{(n-1)} \end{bmatrix} \bar{D}_{III}^{(n)T} \right\} \end{aligned} \right\rangle \\ \cdot \begin{bmatrix} \frac{\eta^{(n)}}{2m^{(n-1)}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\eta^{(n)}}{2m^{(n-1)}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \frac{\eta^{(n)} \eta^{(n-1)}}{4m^{(n-1)} m^{(n-2)}} \sum_{k=1}^{m^{(n)}} \left[\bar{D}_{IV}^{(n)*} \bar{T}^{(n-2)} \bar{D}_{IV}^{(n)*T} + \bar{D}_V^{(n)*} \bar{T}^{(n-2)} \bar{D}_V^{(n)*T} \right] \\ \text{for } n \geq 3$$

[0417]

[0418]

식(30)

$$\bar{D}_I^{(n)} = \begin{Bmatrix} 0 & 1 & -m^{(n-1)} \\ 1 & 0 & -4[m^{(n)} - k + 1]m^{(n-1)}[\eta^{(n)}]^{-1} \\ 0 & 0 & -1 \end{Bmatrix},$$

$$\bar{D}_{II}^{(n)} = \begin{Bmatrix} 0 & 1 & -m^{(n-1)} \\ -1 & 0 & [4m^{(n)} - 4k + 2]m^{(n-1)}[\eta^{(n)}]^{-1} \\ 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix}$$

[0419]

이 때

및

$$\bar{D}_{III}^{(n)} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -4[m^{(n)} - k]m^{(n-1)}[\eta^{(n)}]^{-1} \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \text{ for } n \geq 2,$$

$$\bar{D}_{IV}^{(2)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \eta^{(2)}/2 \\ 0 & 1 & 2m^{(2)} - 2k + 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\bar{D}_V^{(2)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \eta^{(2)}/2 \\ 0 & -1 & -2m^{(2)} + 2k \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix},$$

[0420]

$$\bar{D}_{IV}^{*(n)} = \begin{bmatrix} \eta^{(n-1)}\eta^{(n)}/[4m^{(n-2)}m^{(n-1)}] & 0 & \eta^{(n)}/2 \\ 0 & \eta^{(n-1)}\eta^{(n)}/[4m^{(n-2)}m^{(n-1)}] & 2m^{(n)}-2k+1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\bar{D}_V^{*(n)} = \begin{bmatrix} \eta^{(n-1)}\eta^{(n)}/[4m^{(n-2)}m^{(n-1)}] & 0 & \eta^{(n)}/2 \\ 0 & -\eta^{(n-1)}\eta^{(n)}/[4m^{(n-2)}m^{(n-1)}] & -2m^{(n)}+2k \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \text{ for } n \geq 3$$

이다.

3.2. 일반화된 자기 유사형 서펜타인 배선

도 45b 및 45c는 일반화된 자기 유사형 서펜타인 배선을 나타내며, 이는 Xu 외의 실험[19]에서와 같이, 반원들에 의한 직사각형의 구성에서 샤프 코너(sharp corners)를 대신할 수 있다. 제1차 서펜타인 배선은 도 45c의 검은색 박스에 나타난 것과 같이, 반원[직경 $l^{(1)}$]에 의해 연결되는 직선 와이어[길이 $h^{(1)}-l^{(1)}$]를 포함한다. 제2차 서펜타인 배선의 대표적인 단위 셀은, 도 45c의 파란색 박스에 나타난 것과 같이, 길이 $l^{(2)}$ 의 두가지 (수평적) 직선 와이어 및 세가지 (수직적) 제1차 서펜타인 배선(길이 $h^{(2)}/2$ 를 가진 두가지 및 $h^{(2)}$ 의 길이를 가진 하나)을 포함한다. 직선 와이어에 대한 유연성 행렬 $\bar{T}^{(0)}$ 는 여전히 식(15)에서 주어지며, 제1차 서펜타인 배선에 대한 유연성 행렬 $\bar{T}^{(1)}$ 은 [31]에서와 같이 얻어진다.

$$\bar{T}^{(1)} = \frac{m^{(1)}}{24} \begin{Bmatrix} 4g^3+6\pi g^2+24g+3\pi & 6(g^2+\pi g+2) & 0 \\ 6(g^2+\pi g+2) & 32[m^{(1)}]^2(2g+\pi)+8g+\pi & 48m^{(1)}(g+\pi) \\ 0 & 48m^{(1)}(g+\pi) & 24(2g+\pi) \end{Bmatrix} \quad \text{식(31)}$$

이때 $g = n^{(1)} - 1$ 이다.

제2차 내지 제4차(및 더 높은)차수의 구조 전부는 직사각형의 구조를 나타내며(도 45c에 나타나있다), 이는 엄밀히 말하면, 자기 유사형은 제2차 배선에서만 시작한다. 직사각형 구조(도 45b)에 대한 자기 유사형의 서펜타인 구조(도 45c)의 비교는 제1차 구조만이 다름을 나타낸다. 따라서, 식(29) 및 (30)의 회귀 공식(recursion formulae)은 여전히 자기 유사형의 서펜타인 구조에 유지된다.

식(31)에 식(15)의 $\bar{T}^{(0)}$ 및 식(14)의 $\bar{T}^{(1)}$ 의 대입은 하기 식(32)에서와 같은 $\bar{T}^{(2)}$ 를 나타낸다.

$$\bar{T}^{(2)}(m, \eta) = \frac{m^{(2)}}{24} \begin{bmatrix} 6[\eta^{(2)}]^2(4-p)+6\left[\frac{\eta^{(2)}}{m^{(1)}}\right]^3\bar{T}_{22}^{(1)} & 3\eta^{(2)}(p+2) & 0 \\ 3\eta^{(2)}(p+2) & 32[m^{(2)}]^2p+4p-8+6\left[\frac{\eta^{(2)}}{m^{(1)}}\right]^3\bar{T}_{11}^{(1)} & 24m^{(2)}p \\ 0 & 24m^{(2)}p & 24p \end{bmatrix} \quad \text{식(32)}$$

이때 $p = n^{(2)}[2n^{(1)}+\pi-2]+2$ 이다.

도 49a 및 49b는 높이/간격 비율 $n=8/\sqrt{11}$ 및 단위 셀의 수 $m=4$ 에 대한 자기 유사형의 직사각형 및 서펜타인

배선에 있어서 차수(n)에 대하여 무차원의 유연성의 구성요소를 나타낸다. 직사각형의 배선은 서펜타인보다 약간 부드럽다. 분석 결과는 FEA에 의해 입증되고, 이는 탄성 계수 $E_{cu}=119$ GPa 및 포아송 비(Poisson's ratio) $\nu_{cu}=0.34$ 로, 구리 배선에 대하여, 도 49a 및 49b에 나타나있다. 구성요소 T_{13} 은 항상 0이고, 따라서 나타나지 않는다. 다른 5가지 유연성 구성요소는 전부 n 과 함께 증가하고, 1만큼 증가하는 각 n 에 대해 두배 초과가 된다. 1 내지 4의 n 에 있어서, 이러한 구성요소들은 17배 초과로 증가하고, 이는 높은 차수의 배선이 낮은 차수보다 더 부드럽게 됨을 나타낸다.

4. 인장성

배선은 일반적으로 두 리지드(rigid) 소자 아일랜드(islands) 사이의 공간에 걸쳐 있으며(예를 들어, 도 45a에 나타나있다), 이는 양 끝에서의 고정된 경계 조건(boundary conditions)과 부합한다. 자기 유사형 배선의 인장 u_0 (n 차수로)에 대하여, 경계 조건은 $u=u_0$, $v=0$ 및 $\theta=0$ 이고, 식(13)은 반응 힘, N 및 Q 및 굽힘 모멘트 M 을 하기 식(33)에서와 같이 나타낸다.

$$\begin{Bmatrix} N \\ Q \\ M \end{Bmatrix} = \frac{EI}{[l^{(n)}]^3} \frac{u_0}{\bar{T}_{11}^{(n)}\bar{T}_{22}^{(n)}\bar{T}_{33}^{(n)} - \bar{T}_{11}^{(n)}[\bar{T}_{23}^{(n)}]^2 - \bar{T}_{33}^{(n)}[\bar{T}_{12}^{(n)}]^2} \begin{Bmatrix} \bar{T}_{22}^{(n)}\bar{T}_{33}^{(n)} - [\bar{T}_{23}^{(n)}]^2 \\ -\bar{T}_{12}^{(n)}\bar{T}_{33}^{(n)} \\ l^{(n)}\bar{T}_{12}^{(n)}\bar{T}_{23}^{(n)} \end{Bmatrix}$$

식(33)

$$\bar{T}_{13}^{(n)} = 0$$

직사각형 및 서펜타인 구조에 대한 최대 변형은 부문 4.1 및 4.2에서 별도로 분석되었다. 상대적으로 두꺼운 자기 유사형 직사각형 또는 서펜타인 배선의 인장성에 대하여 가능한 실험적 결과가 없기 때문에, 본 발명은 분석 결과를 입증을 위한 FEA 결과와만 비교한다. 인장성의 실험적 측정 및 분석 결과와의 비교는 미래의 연구에 고려될 것이다.

4.1. 일반화된 자기 유사형 직사각형의 배선

제1차 직사각형의 배선에 대하여, 도 66a에 나타난 것과 같이, 로딩(loading)지점에서 세번째로 가까운 코너(corners)에서 발생하는 최대 변형을 나타낼 수 있으며, 이는 FEA 결과에 의해 지지된다. 배선에서의 최대 변형은 하기 식(34a)로 정밀하게 얻어질 수 있다.

$$\varepsilon_{\max} = \frac{w[2M + Nh^{(1)} + 2Ql^{(1)}]}{4EI} \quad \text{식(34a)}$$

$n \geq 2$ 를 가지는 높은 차수의 구조에 대하여, 최대 변형은 하기 식(34b)에 의해 근접하게 될 수 있다.

$$\varepsilon_{\max} \approx \frac{w[2M + Nh^{(n)} + 2Ql^{(n)} - Qh^{(n-1)}]}{4EI} \quad (\text{for } n \geq 2) \quad \text{식(34b)}$$

$\varepsilon_{\text{yield}}$ 가 배선 재료(예를 들어, 구리[35]에 대하여)의 항복 변형(yield strain)일 때, 항복 기준(yield criterion) $\varepsilon_{\max} = \varepsilon_{\text{yield}}$ 에 기초하여, 일반화된 자기 유사형 직사각형의 배선의 인장성은 하기 식(35a) 및 식(35b)와 같이 얻어진다.

$$\varepsilon_{stretchability}^{(1)} = \frac{\varepsilon_{yield} l^{(1)}}{w} \frac{\eta^{(1)}}{12} \frac{16[m^{(1)}]^2 [\eta^{(1)}+1][\eta^{(1)}+3] - [\eta^{(1)}+6]^2}{4[m^{(1)}]^2 [\eta^{(1)}+1] + 3m^{(1)}[\eta^{(1)}+2] - \eta^{(1)} - 6} \quad \text{식(35a)}$$

$$\varepsilon_{stretchability}^{(n)} = \frac{\varepsilon_{yield} l^{(n)}}{w} \frac{2}{m^{(n)}} \left| \frac{\bar{T}_{11}^{(n)} [\bar{T}_{23}^{(n)}]^2 + \bar{T}_{33}^{(n)} [\bar{T}_{12}^{(n)}]^2 - \bar{T}_{11}^{(n)} \bar{T}_{22}^{(n)} \bar{T}_{33}^{(n)}}{2\bar{T}_{12}^{(n)} [\bar{T}_{33}^{(n)} - \bar{T}_{23}^{(n)}] + \left\{ [\bar{T}_{23}^{(n)}]^2 - \bar{T}_{22}^{(n)} \bar{T}_{33}^{(n)} \right\} \eta^{(n)} - \frac{\eta^{(n-1)} \eta^{(n)}}{2m^{(n-1)}} \bar{T}_{12}^{(n)} \bar{T}_{33}^{(n)}} \right|$$

(for $n \geq 2$).

식(35b)

적용된 변형이 인장성보다 작을 때, 배선은 선형, 가역성의 변형을 수행하고, 배선이 순환 로딩(loadings) 하에 소성 피로(plastic fatigue)를 거치지 않는 것과 같이, 가소성(plastic) 변형은 축적되지 않는다. 식(35a) 및 (35b)는 인장성이 $\varepsilon_{yield} l(n)/w$ 에 선형으로 비례함을 분명히 나타낸다. 따라서, 인장성을 향상시키기 위해서, 나노 결정립 크기의 구리 또는 금속 나노복합체의 수송[36]과 같은 높은 항복 변형을 주는 상대적으로 낮은 탄성계수 및 높은 항복 강도를 가진 금속성 재료를 적용하는 것이 바람직하다.

4.2. 일반화된 자기 유사형 서펜타인 배선

제1차 서펜타인 배선에 있어서, 도 66b에 나타난 것과 같이, 최대 변형은 항상 양 끝으로부터 가장 가깝거나 두 번째로 가까운 반원에서 발생한다. φ ($0 \leq \varphi \leq \pi$) 는 이러한 반원의 위치를 나타낸다. 원에서의 굽힘 변형은 하기 식(36)에 의해 주어질 수 있다.

$$\varepsilon(\varphi) = \frac{w \left\{ 2M + N[h^{(1)} - l^{(1)}] + 3Ql^{(1)} + l^{(1)}(N \sin \varphi - Q \cos \varphi) \right\}}{4EI} \quad \text{식(36)}$$

$\varphi = \tan^{-1}(-N/Q)$ 에서 최대값을 나타내고, 최대 변형은 하기 식(37)에 의해 주어진다.

$$\varepsilon_{\max} = \frac{w \left\{ 2M + N[h^{(1)} - l^{(1)}] + 3Ql^{(1)} + l^{(1)} \sqrt{N^2 + Q^2} \right\}}{4EI} \quad \text{식(37)}$$

제1차 서펜타인 배선의 인장성은 하기 식(38)과 같이 얻어진다. [식(33)을 통해]

$$\varepsilon_{stretchability} = \frac{2\varepsilon_{yield} l^{(1)}}{m^{(1)} w} \frac{\bar{T}_{11}^{(1)} \bar{T}_{22}^{(1)} \bar{T}_{33}^{(1)} - \bar{T}_{11}^{(1)} [\bar{T}_{23}^{(1)}]^2 - \bar{T}_{33}^{(1)} [\bar{T}_{12}^{(1)}]^2}{2\bar{T}_{12}^{(1)} \bar{T}_{23}^{(1)} - 3\bar{T}_{12}^{(1)} \bar{T}_{33}^{(1)} + \left\{ \bar{T}_{22}^{(1)} \bar{T}_{33}^{(1)} - [\bar{T}_{23}^{(1)}]^2 \right\} (\eta^{(1)} - 1) + \left\{ \bar{T}_{22}^{(1)} \bar{T}_{33}^{(1)} - [\bar{T}_{23}^{(1)}]^2 \right\}^2 + [\bar{T}_{12}^{(1)}]^2 [\bar{T}_{33}^{(1)}]^2}$$

식(38)

정규화된 인장성 $\varepsilon_{stretchability} w / [\varepsilon_{yield} l^{(1)}]$ 은 높이/간격 비율 $\eta^{(1)}$ 및 단위 셀의 수 $m^{(1)}$ 에 대해서만 의존한다. 도 50에 나타난 것과 같이, $\eta^{(1)}$ 및 $m^{(1)}$ 모두 증가하고, 하기 식(39)에 포함된다.

$$\varepsilon_{stretchability} = \frac{\varepsilon_{yield} l^{(1)}}{w} \cdot \frac{4[\eta^{(1)}]^3 + 6(\pi - 2)[\eta^{(1)}]^2 - 12(\pi - 3)\eta^{(1)} + 9\pi - 28}{12\eta^{(1)}} \quad \text{식(39)}$$

[0458] $m(1) \rightarrow \infty$ (도 50에 나타나있다).

[0459] 높은 차수($n \geq 2$)의 서펜타인 배선에 대하여, 서펜타인 배선에 대한 식(30)의 $\bar{T}^{(n)}$ 및 식(32)의 부합하는 유연성 행렬 $\bar{T}^{(2)}$ 와 함께, 식(35b)는 도 51에 나타난 FEA와 비교한 인장성에 우수하게 근접함을 나타낸다.

[0460] 도 52는 자기 유사형 직사각형 및 서펜타인 배선에 대한 차수 n 에 대하여, 정규화된 인장성, $\epsilon_{stretchability} w / [\epsilon_{yield} l^{(n)}]$ 을 나타내며, 이때 다른 차수에서 높이/간격 비율 $n=8/\sqrt{11}$ 및 단위 셀의 수 $m=4$ 의 값을 가진다. 인장성은 1만큼 증가하는 각 n 에 대해 두배 초과가 되며, 이는 배선의 탄성한계가 높은 차수의 자기 유사형 설계를 적용함에 의해 향상될 수 있음을 나타낸다. 또한 도 52는 분석 모델이 FEA 결과와 매우 일치함을 나타낸다.

[0461] 상기 분석 모델 및 FEA 결과는 모두 미소 변형에 대한 것이다. 도 67은 인장성에 대한 한정된 변형의 효과(FEA에 의해 결정되는)가 구조적 파라미터의 다양한 조합에서, 제1차 및 제2차 서펜타인 배선 모두에 대해 무시해도 될 정도임을 나타낸다. 따라서, 상기 분석 모델은 인장성의 우수한 평가를 나타낸다. 실제 제조에 있어서, 마이크로 규모의 자기 유사형 서펜타인 배선은 특히 선의 측벽에 따른 리소그래피 결함 때문에 결함을 가질 수 있고, 이러한 구조적 결함은 자기 유사형 차수가 증가할 때 발생할 수 있는 감소된 패턴 크기(즉, 금속 폭 및 라운딩(rounding) 반경)를 증가시킬 것이다. 이러한 구조적 결함은 현재 연구에서 설명되어 있지 않다.

[0462] 5. 인장성의 전자장치에 대한 자기 유사형 서펜타인 배선의 최적의 설계

[0463] 인장성 전자장치의 두가지 경쟁 목표[19,37]는 1)장치 아일랜드들 사이에 작은 공간을 요구하는 능동 소자의 높은 표면 채움 비율(도 53a); 및 2)장치 아일랜드들 사이에 큰 공간을 요구하는 시스템의 큰 인장성이다. 직선의 버클링 또는 기존의 서펜타인 배선에 기초한 사전의 접근은 ~100% 인장성을 달성한다[17,18,28,30]. 시스템의

인장성($\epsilon_{stretchability}^{system}$)은 배선의 인장성($\epsilon_{stretchability}^{interconnect}$)과 연관되어 있으며, 이는 하기 식(40)에 의한다.

$$\epsilon_{stretchability}^{system} = \epsilon_{stretchability}^{interconnect} (1 - \sqrt{f}) \quad \text{식(40)}$$

[0464]

[0465] 상기 f 는 표면 채움 비율을 나타낸다. 능동소자의 ~50% 표면 채움 비율에 대하여, 배선의 ~100% 인장성은 인장성의 전자장치(피부, 심장, 또는 팔꿈치에 대한)의 일부 생체의료학적 적용에 대해 낮은 시스템의 ~30% 인장성으로 전환된다. 부분 3 및 4의 분석 모델은 상기 두가지 경쟁 목표를 동시에 달성하기 위한 일반화된 자기 유사형 배선의 설계를 설명할 수 있다.

[0466] 제2차 서펜타인 배선은 대표적인 크기 $h=1$ mm 및 50%의 표면 채움 비율(도 53a)를 가진 사각 형상의 장치 아일랜드에서 설계 최적화를 나타내기 위하여 연구된다. 금속 배선의 제조에 대한 포토리소그래피 기술[39,39]은 폭 $w \geq 10 \mu m$, 라운딩(rounding) 반경 $r_{rounding} \geq 10 \mu m$, 및 근접한 아크(arc) 사이의 거리 $d \geq 5 \mu m$ (도 53a)와 같은 일부 제한요소를 나타낸다. 다른 구조적 파라미터는 큰 인장성을 달성하기 위해 최적화된다. 도 53b는 인장성이 단위 셀의 수 $m^{(2)}$ 와 함께 증가함을 나타낸다. 도 53b의 오른쪽 패널은 배선의 ~308% 인장성 및 버클된 배선을 사용하여 기존의 설계를 능가하는 시스템의 ~90% 인장성을 나타내는 최적의 설계를 나타낸다[18,28]. 더 큰 공간 채움 비율 70%에 대해서도, 식(40)은 시스템의 ~50% 인장성을 나타낸다.

[0467] 6. 결론

[0468] 이러한 예시는 자기 유사형 배선에 대한 유연성 및 인장성의 분석 모델을 개선시킨다. 직접적인 (straightforward) 설계 최적화 후에, FEA에 의해 입증된 분석 모델은 높은 차수의 자기 유사형 배선이 70%의 표면 채움 비율에 대한 능동 소자의 표면 채움 비율 50% 또는 >50%의 인장성에 대하여 ~90%와 같은, 시스템의 매우 큰 인장성을 나타냄을 보여준다. 분석 모델은 인장성의 광전지[11] 및 전자적 안구 카메라[12]와 같은, 능동 소자의 큰 면적 범위를 동시에 요구하는 인장성 전자장치의 발전에 유용하다. 자기 유사형 서펜타인 구조의 개념은 인장성 향상의 다른 계획과 추가적으로 결합될 수 있으며, 기관에 결합된 배선에 대해 향상된 정도의 인장성을 나타내기 위한 주름진(wrinkling) 패턴의 제어를 예로 들 수 있다.

[0469] 참조문헌

- [0470] [1] Lacour SP, Jones J, Wagner S, Li T, and Suo ZG. Proc IEEE 2005;**93**:1459.
- [0471] [2] Lacour SP, Wagner S, Huang ZY, and Suo Z. Appl Phys Lett 2003;**82**:2404.
- [0472] [3] Lacour SP, Wagner S, Narayan RJ, Li T, and Suo ZG. J Appl Phys 2006;**100**:014913.
- [0473] [4] Khang DY, Jiang HQ, Huang Y, and Rogers JA. Science 2006;**311**:208.
- [0474] [5] Kim DH, Ahn JH, Choi WM, Kim HS, Kim TH, Song JZ, Huang YGY, Liu ZJ, Lu C, and Rogers JA. Science 2008;**320**:507.
- [0475] [6] Sekitani T, Noguchi Y, Hata K, Fukushima T, Aida T, and Someya T. Science 2008;**321**:1468.
- [0476] [7] Sekitani T, Nakajima H, Maeda H, Fukushima T, Aida T, Hata K, and Someya T. Nat Mater 2009;**8**:494.
- [0477] [8] Kim DH, Lu NS, Ma R, Kim YS, Kim RH, Wang SD, Wu J, Won SM, Tao H, Islam A, Yu KJ, Kim TI, Chowdhury R, Ying M, Xu LZ, Li M, Chung HJ, Keum H, McCormick M, Liu P, Zhang YW, Omenetto FG, Huang YG, Coleman T, and Rogers JA. Science 2011;**333**:838.
- [0478] [9] Song YM, Xie YZ, Malyarchuk V, Xiao JL, Jung I, Choi KJ, Liu ZJ, Park H, Lu CF, Kim RH, Li R, Crozier KB, Huang YG, and Rogers JA. Nature 2013;**497**:95.
- [0479] [10] Duan YQ, Huang YA, and Yin ZP. Thin Solid Films 2013;**544**:152.
- [0480] [11] Yoon J, Baca AJ, Park SI, Elvikis P, Geddes JB, Li LF, Kim RH, Xiao JL, Wang SD, Kim TH, Motala MJ, Ahn BY, Duoss EB, Lewis JA, Nuzzo RG, Ferreira PM, Huang YG, Rockett A, and Rogers JA. Nat Mater 2008;**7**:907.
- [0481] [12] Ko HC, Stoykovich MP, Song JZ, Malyarchuk V, Choi WM, Yu CJ, Geddes JB, Xiao JL, Wang SD, Huang YG, and Rogers JA. Nature 2008;**454**:748.
- [0482] [13] Wagner S, Lacour SP, Jones J, Hsu PHI, Sturm JC, Li T, and Suo ZG. Physica E 2004;**25**:326.
- [0483] [14] Someya T, Sekitani T, Iba S, Kato Y, Kawaguchi H, and Sakurai T. P Natl Acad Sci USA 2004;**101**:9966.
- [0484] [15] Mannsfeld SCB, Tee BCK, Stoltenberg RM, Chen C, Barman S, Muir BVO, Sokolov AN, Reese C, and Bao ZN. Nat Mater 2010;**9**:859.
- [0485] [16] Saeidpourazar R, Li R, Li YH, Sangid MD, Lu CF, Huang YG, Rogers JA, and Ferreira PM. J Microelectromech Syst 2012;**21**:1049.
- [0486] [17] Kim DH, Song JZ, Choi WM, Kim HS, Kim RH, Liu ZJ, Huang YY, Hwang KC, Zhang YW, and Rogers JA. P Natl Acad Sci USA 2008;**105**:18675.
- [0487] [18] Lee J, Wu JA, Shi MX, Yoon J, Park SI, Li M, Liu ZJ, Huang YG, and Rogers JA. Adv Mater 2011;**23**:986.
- [0488] [19] Xu S, Zhang YH, Cho J, Lee J, Huang X, Jia L, Fan JA, Su YW, Su J, Zhang HG, Cheng HY, Lu BW, Yu CJ, Chuang C, Kim TI, Song T, Shigeta K, Kang S, Dagdeviren C, Petrov I, Braun PV, Huang Y, Paik U, and Rogers JA. Nat Commun 2013;**4**:1543.
- [0489] [20] Kim RH, Tao H, Kim TI, Zhang YH, Kim S, Panilaitis B, Yang MM, Kim DH, Jung YH, Kim BH, Li YH, Huang YG, Omenetto FG, and Rogers JA. Small 2012;**8**:2812.
- [0490] [21] Jones J, Lacour SP, Wagner S, and Suo ZG. J Vac Sci Technol A 2004;**22**:1723.
- [0491] [22] Gonzalez M, Axisa F, Bossuyt F, Hsu YY, Vandeveld B, and Vanfleteren J. Circuit World 2009;**35**:22.
- [0492] [23] Gonzalez M, Axisa F, BuIcke MV, Brosteaux D, Vandeveld B, and Vanfleteren J. Microelectron Reliab 2008;**48**:825.
- [0493] [24] van der Sluis O, Hsu YY, Timmermans PHM, Gonzalez M, and Hoefnagels JPM. J Phys D-Appl Phys

2011;**44**:034008.

- [0494] [25] Hsu YY, Gonzalez M, Bossuyt F, Axisa F, Vanfleteren J, and De Wolf I. J Mater Res 2009;**24**:3573.
- [0495] [26] Hsu YY, Gonzalez M, Bossuyt F, Axisa F, Vanfleteren J, and DeWolf I. J Micromech Microeng 2010;**20**:075036.
- [0496] [27] Hsu YY, Gonzalez M, Bossuyt F, Vanfleteren J, and De Wolf I. IEEE T Electron Dev 2011;**58**:2680.
- [0497] [28] Lee J, Wu J, Ryu JH, Liu ZJ, Meitl M, Zhang YW, Huang YG, and Rogers JA. Small 2012;**8**:1851.
- [0498] [29] Sun YG, Choi WM, Jiang HQ, Huang YGY, and Rogers JA. Nat Nanotechnol 2006;**1**:201.
- [0499] [30] Kim DH, Liu ZJ, Kim YS, Wu J, Song JZ, Kim HS, Huang YG, Hwang KC, Zhang YW, and Rogers JA. Small 2009;**5**:2841.
- [0500] [31] Zhang YH, Xu S, Fu HR, Lee J, Su J, Hwang KC, Rogers JA, and Huang Y. Soft Matter 2013;**9**:8062.
- [0501] [32] Kim DH, Wang SD, Keum H, Ghaffari R, Kim YS, Tao H, Panilaitis B, Li M, Kang Z, Omenetto F, Huang YG, and Rogers JA. Small 2012;**8**:3263.
- [0502] [33] Su YW, Wu J, Fan ZC, Hwang KC, Song JZ, Huang YG, and Rogers JA. J Mech Phys Solids 2012;**60**:487.
- [0503] [34] Timoshenko S, and Gere J. Theory of Elastic Stability. New York: McGraw-Hill, 1961.
- [0504] [35] William FR, Leroy DS, and Don HM. Mechanics of Materials. New York: Jon Wiley & Sons, 1999.
- [0505] [36] Hao SJ, Cui LS, Jiang DQ, Han XD, Ren Y, Jiang J, Liu YN, Liu ZY, Mao SC, Wang YD, Li Y, Ren XB, Ding XD, Wang S, Yu C, Shi XB, Du MS, Yang F, Zheng YJ, Zhang Z, Li XD, Brown DE, and Li J. Science 2013;**339**:1191.
- [0506] [37] Rogers JA, Someya T, and Huang YG. Science 2010;**327**:1603.
- [0507] [38] Meitl MA, Zhu ZT, Kumar V, Lee KJ, Feng X, Huang YY, Adesida I, Nuzzo RG, and Rogers JA. Nat Mater 2006;**5**:33.
- [0508] [39] Carlson A, Bowen AM, Huang YG, Nuzzo RG, and Rogers JA. Adv Mater 2012;**24**:5284

[0509] <실시예 4> 프랙탈-기반 설계로 인장성의 배선에 대한 단계적 계산적 모델(hierarchical computational model)

[0510] 초록

[0511] 고 면적 범위, 작은 크기의 안테나 및/또는 자기공명영상 하에서의 비가시성(invisibility)을 가진 전극을 갖춘 기능적 구성요소를 요구하는 인장성의 전자장치는 프랙탈 기반의 레이아웃을 적용한 전기적 와이어 구성의 사용으로 이점이 있을 수 있다. 이러한 설계로 높은 차수의 배선/전극/안테나에 내재하는 복잡하고 다양한 마이크로 구조 때문에, 기존의 한정 요소 분석(FEA)에 기반한 기존의 비선형 포스트버클링(postbuckling) 분석이 번거롭고 시간이 많이 걸릴 수 있다. 본 발명에서, 인장 하에 '자기 유사형'으로 사전에 나타냈던 설계에서, 프랙탈 기반의 배선의 포스트버클링(postbuckling) 분석에 대하여 순차적 풀어짐(unraveling)의 메커니즘에 기반한 단계적 계산적 모델(hierarchical computational model, HCM)을 제시한다. 모델은 실험 및 FEA에 의해 입증된 것과 같이, 수십 배이지만 정확한 예측으로 기존 접근의 계산적 노력을 감소시킨다. 1에서 4로 증가하는 프랙탈 차수에 따라, 탄성 인장성은 ~200배로 증가될 수 있으며, 이는 프랙탈 설계의 단순한 개념의 이점으로 분명히 나타난다. 일반적으로 이러한 결과 및 모델은 넓은 범위의 인장성의 전자장치 시스템에 있어서 최적의 설계의 개선에 이용될 수 있다.

[0512] 1. 도입

[0513] 인장성/유연성의 전자장치(Lacour et al., 2005; Khang et al., 2006; Lacour et al., 2006; Jiang et al., 2007; Jiang et al., 2008; Sekitani et al., 2009; Rogers et al., 2010; Huang et al., 2012; Yang and Lu, 2013; Duan et al., 2014) 및 광전자장치(Kim et al., 2010; Lee et al., 2011a; Lipomi et al., 2011; Nelson et al., 2011)에 대한 역학 및 재료에 있어서 최근의 발전은 고성능 반도체 기능성을 갖춘 시스템은 극도의 기계적 변형, 예를 들어, 고무밴드와 같은 인장, 로프와 같은 비틀림(twisting), 및 종이 한장과 같은 굽힘(bending)을 허용하는 형태로 실현될 수 있음을 입증한다. 이러한 단계의 기술은 기존의 기술로 형성될 수 없

는 다수의 적용 기회를 생성하며, 이는 "표피의" 건강 모니터(Kim et al., 2011b; Kaltenbrunner et al., 2013; Schwartz et al., 2013), 유연한 수술용 기구(Cotton et al., 2009; Yu et al., 2009; Viventi et al., 2010; Graudejus et al., 2012; Kim et al., 2012b), 안구와 같은 디지털 카메라(Ko et al., 2008; Song et al., 2013), 감지성의 로봇 표피(Someya et al., 2004; Wagner et al., 2004; Mannsfeld et al., 2010; Lu et al., 2012)의 범위에 이른다. 이러한 인장성 시스템의 다수는 능동 소자가 비변형 플랫폼들(즉, 아일랜드)에, 그 사이에 변형가능한 배선 (즉, 브릿지)과 함께 존재하는 아일랜드-브릿지 설계(Kim et al., 2008; Ko et al., 2008; Kim et al., 2009; Kim et al., 2011b; Lee et al., 2011b)로 가끔 알려진 방식을 이용한다. 이러한 브릿지들은 인장성을 제공하며, 이때 아일랜드는 능동 소자(Kim et al., 2008; Song et al., 2009)의 기계적 완전함을 보장하기 위해 사소한 변형(보통 <1%의 변형)을 거친다. 아일랜드의 특정 채움 비율과 함께 시스템의 인장성은 하기 식(41)와 같이 나타낼 수 있다

$$\text{stretchability of the system} = (1 - \sqrt{\text{filling ratio}}) * (\text{stretchability of the interconnect})$$

[0514]

[0515]

식(41)

[0516]

다양한 유형의 배선 기술은 발전해왔으며, 일반적으로 평면의 서펜타인(Jones et al., 2004; Lacour et al., 2005; Li et al., 2005; Gonzalez et al., 2008; Kim et al., 2008; Hsu et al., 2009; Kim et al., 2011b; Kim et al., 2012c; Zhang et al., 2013c) 또는 비동일 평면의 서펜타인 또는 직선형태의 브릿지(bridges)(Kim et al., 2008; Ko et al., 2008; Lee et al., 2011b)를 포함한다. 다수의 공개된 예시에서, 이러한 배선은 채움 비율을 상당히 희생하지 않는 시스템에서, 총 인장성<50% (크랙(cracks)의 개시에 의해 정의되는) 및 탄성 인장성<25% (가소성 변형의 개시에 의해 정의되는)을 제공한다. 다수의 적용, 특히 광전자장치(Ko et al., 2008; Kim et al., 2010) 및 에너지 저장 시스템(Lipomi et al., 2011; Xu et al., 2013)에서, 높은 채움 비율을 요구한다. 본 발명에서, 진보된 배선이 요구된다.

[0517]

최근에, Xu 외(2013)는 앞서 언급한 도전을 달성하기 위해, 단순한 프랙탈 기반의 레이아웃(도 54a에 나타난)에서 서펜타인 패턴을 포함하는 공간-채움 곡선의 유형에 기반한 설계를 보고하였다. 프랙탈 기반의 레이아웃의 단계적 구조는 다수의 생물학적 시스템에 존재하는 것으로 보여져 왔으며(Gao et al., 2005; Yao and Gao, 2006; Yao and Gao, 2007; Zhang et al., 2011; Li et al., 2012; Zhang et al., 2012; Li et al., 2013), 이는 표면 접착, 강도 및 물질적 강도를 향상시키거나 조절할 수도 있다. '자기 유사형'설계(Xu et al., 2013)로써 처음 나타난 이러한 기술은 ~300% 및 ~160%의 총 인장성 및 탄성 인장성, 그리고 ~33%의 채움 비율을 갖춘 인장성의 리튬 이온 전지를 가능하게 한다. 이러한 바람직한 역학에 원인이 있는 근본적인 메커니즘은 도 54b에 나타난 것과 같이, 실험 및 한정 요소 분석(FEA) 모두에 의해 연구되었다. 그 결과는 순차적 풀어짐(ordered unraveling)의 메커니즘을 나타낸다. 특히, 0%부터 ~150%까지의 인장 과정으로, 제2차 구조(즉, 큰 스프링)는 제1차 구조(즉, 작은 스프링)에서 기본적으로 변형이 없는 동안에, 버클링(buckling)을 통한 비틀림(twisting) 및 면외 굽힘(bending)을 통하여 1차적으로 풀어진다(도 54b의 상단 4개 이미지에 나타나있다). 제1차 구조의 풀어짐은 제2차 구조가 ~150%의 적용된 변형에 부합하여 완전히 늘어났을 때에만 시작된다. 추가적으로, 큰 인장성(~300%)은 제1차 구조가 거의 최대 규모로 인장되었을 때에 달성된다(도 54b의 하단3개 이미지에 나타나있다). 활성 물질만이 배선이 자유롭게 변형할 수 있는 전지 설계의 연성 기관에 결합된다. 일부 생체의학적 적용(Kim et al., 2011b; Kim et al., 2012c)에 대하여, 서펜타인 배선은 연성 기관에 결합되거나 밀봉되고, 그 결과 변형 메커니즘은 프리스탠딩 배선(Zhang et al., 2013b)과 상당히 다를 수 있지만 그러한 관점은 본 예시의 범위를 벗어난다.

[0518]

도 54a에 나타난 아일랜드-브릿지 설계에서 능동 소자의 채움 비율은 33%이다. 탄성 인장성(~150%)은 90% 및 98%의 채움 비율 각각에 대하여, 22% 및 4.3%로 감소된다. 이러한 탄성 인장성의 정도는 변형(예를 들어, 피부, 심장, 또는 팔꿈치)이 20%를 초과할 수 있는, 표피 장착의 전자장치(Kim et al., 2011b; Ying et al., 2012; Webb et al., 2013) 및 공기주입식 카테터(inflatable catheter) 기술(Kim et al., 2011a; Kim et al., 2012a)과 같은 일부 생체의학의 적용에 미치지 않는다. 가장 실행가능한 해결은 도 54a의 2에서 3 및 도 55의 4 또는 더 높게, 프랙탈 차수를 증가시키는 것이다. 하지만, 프랙탈 차수 4에 대하여, 기존의 FEA 접근은 요소들의 많은 수(> 100만) 및 크게 비선형인 포스트버클링(postbuckling) 분석 때문에, 엄청나게 시간이 걸리게 된다. 이러한 계산적 접근은 빠른 장치의 설계 및 최적화에 대해 비현실적이다.

[0519]

본 예시의 목표는 프랙탈 기반의 레이아웃(하기에서 "프랙탈 배선"으로 나타낸다)을 갖춘 서펜타인 배선의 포스트버클링(postbuckling) 분석에 대하여, 도 54에 나타난 순차적 풀어짐(ordered unraveling)의 메커니즘에 기

조한, 효과적이고 견고한 단계적인 계산적 모델(HCM)을 발전시키는 것이다. 인장하에 n 차 프랙탈 배선에 대하여, 낮은 차수의 구조($\leq n-1$)는 처음에 풀여지지 않고, 단지 굽혀지고 뒤틀려진다. 그 결과, 이러한 낮은 차수의 구조는 도 56에 나타난 것과 같이, 효과적인 장력, 굽힘 및 비틀림(torsion)의 유연성과 같이 수직빔(straight beams)으로 몰드될 수 있다. 가장 높은 차수(n^{th})의 구조가 완전히 인장되면, 제($n-1$)차 구조의 풀어짐이 시작되지만, 제($n-2$)차 및 더 낮은 차수의 구조들은 여전히 풀여지지 않고 빔(beam)으로 몰드될 수 있다. 이러한 과정은 제1차 구조가 풀여지고 총 인장성이 마침내 도달될 때까지 지속된다. 상기 접근은 계산적 노력을 상당히 덜어주는데, 왜냐하면 각 차수에서, 수직 빔의 굽힘 및 비틀림만이 포함되기 때문이다. 이러한 단순화는 높은 차수(본 발명에서 입증한 것과 같이 4까지)의 프랙탈 배선의 시뮬레이션을 가능하게 하며, 이는 기존의 FEA를 사용하는 것과는 상당히 다를 수 있다. 이러한 측정의 세트는 인장성에 대한 프랙탈 차수의 중요한 효과를 나타낼 뿐만 아니라, 높은 차수의 프랙탈 배선을 사용하는 설계에 대한 기준을 제공한다. 예시는 하기와 같이 약술된다. 부문 2는 어느 차수($n \geq 2$)의 프랙탈 배선에 대한 동등한 유연성을 결정한다. 부문 3은 포스트버클링(postbuckling) 과정의 순차적 풀어짐(ordered unraveling)에 대한 HCM을 나타낸다. 부문 4는 탄성 인장성에 대한 프랙탈 차수의 효과를 연구하는 HCM을 적용한다. 일반화된 프랙탈 배선은 부문 5에서 연구되고, 그 결과는 실험 및 기존의 FEA에 의해 입증된다.

2. 프랙탈 배선의 동등한 유연성

2.1 구조

제1차 배선은 도 55의 검은색 박스에 나타난 것과 같이, 직렬로 연결된 직선 와이어 및 반원을 포함하며, 이러한 예시는 4개의 단위 셀을 포함한다. 도 55의 파란색 박스에 나타난, 제2차 배선은 제1차 배선의 규모를 감소함에 의해 형성되며, 이는 90° 회전에 의해 수행되고, 원래 구조의 레이아웃을 재생성하는 방식으로 이들을 연결함으로써 수행된다. 도 55의 넓은 파란색 선은 제1차 구조(원형 부분을 제외한)와 유사한 제2차 구조를 나타낸다. 같은 과정을 수행함으로써, 본 발명은 도 55의 붉은색 및 보라색 박스에 나타난 것과 같이, 제3차 및 제4차 배선을 형성할 수 있으며, 이때 붉은색 및 보라색 선은 제3차 및 제4차 구조를 각각 나타낸다. 제2차 내지 제4차(및 더 높은 차수) 구조는 모두 동일한 직사각형의 형상을 나타내고, 동일한 수의 단위 셀을 가짐이 분명하며, 엄밀히 말하면, 프랙탈은 제2차에서만 시작한다.

n 는 각 차수에서의 높이/간격 총평비를 나타내고, 이때 높이 $h^{(i)}$ 는 $h^{(i)} = n l^{(i)}$ 에 의해 제 i 차($i=1..n$)(도 55)의 간격 $l^{(i)}$ 와 연관된다. 높이 $h^{(i)}$ 는 또한 $h^{(i)} = 2m l^{(i-1)}$ ($i=2..n$)와 같이 단위 셀의 수 m (도 55)에 의해 근접한 차수의 간격 $l^{(i-1)}$ 과 연관된다. 어느 차수 i 에서의 간격 및 높이는 하기 식(42)에 의한 가장 높은 차수 $l^{(n)}$ 의 간격으로 규모가 정해진다.

$$l^{(i)} = \left(\frac{\eta}{2m} \right)^{n-i} l^{(n)}, h^{(i)} = \eta \left(\frac{\eta}{2m} \right)^{n-i} l^{(n)}, (i=1..n) \quad \text{식(42)}$$

그 결과는 프랙탈 배선이 하나의 기본 길이($l^{(n)}$) 및 세개의 무차원 파라미터 즉, 프랙탈 차수(n), 높이/간격 비율(η) 및 단위 셀의 수(m)에 의해 특징지어짐을 나타낸다.

2.2. 동일한 유연성

프랙탈 배선은 폭(w) 및 두께(t)가 길이보다 훨씬 작다면 빔으로 몰드될 수 있다. 도 56a는 왼쪽 끝에 고정된 제 n 차 프랙탈 배선을 나타내고, 오른쪽 끝에 힘과 굽힘 모멘트가 있는 조건을 나타낸다. 오른쪽 끝의 축력 N , 면내 전단력 Q_y 및 굽힘 모멘트 M_x 는 끝에 있는 변위(displacement) u_x 및 u_y 및 회전 θ_z 에 의해 나타나는 면내 변형을 유도한다. 반면에 오른쪽 끝의 면외 전단력 Q_z 및 굽힘 모멘트(bending moment) M_y , 및 회전력(torque) M_x 은 끝에 있는 면외 변위 u_z 및 회전 θ_x 및 θ_y 를 생성한다. 정규화된 변위, 회전, 힘, 굽힘 모멘트 및 회전력은 하기 식(43a) 및 (43b)에 의해 연관된다.

$$\begin{pmatrix} u_x/l^{(n)} \\ u_y/l^{(n)} \\ \theta_z \end{pmatrix} = \mathbf{T}_{in-plane}^{(n)} \begin{pmatrix} N[l^{(n)}]^2/(EI)_{in-plane} \\ Q_y[l^{(n)}]^2/(EI)_{in-plane} \\ M_z l^{(n)}/(EI)_{in-plane} \end{pmatrix}$$

[0528]

식(43a)

$$\begin{pmatrix} u_z/l^{(n)} \\ \theta_y \\ \theta_x \end{pmatrix} = \mathbf{T}_{out-of-plane}^{(n)} \begin{pmatrix} Q_z[l^{(n)}]^2/(EI)_{out-of-plane} \\ M_y l^{(n)}/(EI)_{out-of-plane} \\ M_x l^{(n)}/(EI)_{out-of-plane} \end{pmatrix}$$

[0529]

식(43b)

[0530]

이때 $(EI)_{in-plane} = Ew^3t/12$ 및 $(EI)_{out-of-plane} = Ewt^3/12$ 는 각각 면내 및 면외의 굽힘 강성이고, $\mathbf{T}_{in-plane}^{(n)}$ 및 $\mathbf{T}_{out-of-plane}^{(n)}$ 는 분석적으로 얻을 수 있는 정규화된 탄성 유연성 행렬이다(부록에 나타나있다). 예를 들어, 제1차 프랙탈 배선에 대한 면내 유연성 행렬은 하기 식(44a)이며,

$$\mathbf{T}_{in-plane}^{(1)}(m, \eta) = \begin{pmatrix} \frac{m}{24}(4g^3 + 6\pi g^2 + 24g + 3\pi) & \text{Sym} \\ \frac{m}{4}(g^2 + \pi g + 2) & \frac{4m^3}{3}(2g + \pi) + \frac{m}{24}(8g + \pi) \\ 0 & 2m^2(g + \pi) & m(2g + \pi) \end{pmatrix}$$

[0531]

식(44a)

[0532]

이때 Sym은 대칭 행렬을 나타내고, $g = \eta - 1$ 이다. 제1차 프랙탈 배선에 대한 면외 유연성 행렬은 하기 식(44b)이며,

$$\mathbf{T}_{out-of-plane}^{(1)}(m, \eta) = \begin{pmatrix} \frac{4m^3}{3}k + \frac{m}{48}[4k(3g^2 + 8) - 4(1 + 3\nu)g^3 - 3(7 + \nu)\pi] & \text{Sym} \\ -m^2k & mk \\ 0 & 0 & m[k + (1 - \nu)g] \end{pmatrix}$$

[0533]

식(44b)

[0534]

이때 ν 는 포아송 비(Poisson's ratio)이고, $k = [4(1 + \nu)g + (3 + \nu)\pi]/4$ 이다. 제2차 프랙탈 배선에 대한 면내 유연성 행렬은 하기 식(45a)이며,

$$\mathbf{T}_{in-plane}^{(2)}(m, \eta) = \begin{pmatrix} \frac{m}{4}\eta^2(4 - p) + \frac{\eta^3}{4m^2}T_{in-plane,22}^{(1)} & \text{Sym} \\ \frac{m}{8}\eta(p + 2) & \frac{4m^3}{3}p + \frac{m}{6}(p - 2) + \frac{\eta^3}{4m^2}T_{in-plane,11}^{(1)} \\ 0 & m^2p & mp \end{pmatrix}$$

[0535]

식(45a)

[0536]

이때 $p = 2\eta^2 + (\pi - 2)\eta + 2$ 이고, $T_{in-plane,11}^{(1)}$ 및 $T_{in-plane,22}^{(1)}$ 는 각각 인장 및 면내 전단 신축성에 해당하는 식(44a)에서의 11 및 22 구성요소이다.

[0537]

제2차 프랙탈 배선에 대한 면외 유연성 행렬은 하기 식(45b)이며,

[0538]

$$T_{out-of-plane}^{(2)}(m, \eta) = \begin{Bmatrix} T_{out-of-plane,11}^{(2)} & & \text{Sym} \\ -m^2 \left(p - \frac{1-\nu}{4} \pi \eta \right) & m \left(p - \frac{1-\nu}{4} \pi \eta \right) & \\ 0 & 0 & m \left(\frac{1+\nu}{2} p + \frac{1-\nu}{4} \pi \eta \right) \end{Bmatrix}$$

식(45b)

[0539]

이때 $T_{out-of-plane,11}^{(2)}$ 는 부록에 주어진다. 더 높은 차수($n \geq 3$)의 프랙탈 배선에 대하여, $T_{in-plane}^{(n)}$ 및 $T_{out-of-plane}^{(n)}$ 는 제(n-1)차 및 제(n-2)차에 대한 유연성 행렬을 통한 회귀 공식(recursive formula)에서 얻어진다(부록에 나타나있다).

[0540]

식(44) 및 (45)에서 얻어지는 신축성 및 부록에서의 회귀 공식(recursive formula)은 프랙탈 차수와 함께 증가

$$T_{in-plane,11}^{(n)}(m=4, \eta=8/\sqrt{11})$$

한다. 예를 들어, 인장 구성요소 $T_{in-plane,11}^{(n)}$ 는 $n=1$ 에 대한 15.4에서, $n=2$ 에 대한 40.1 및 $n=3$ 에 대한 105로 증가하며, 즉, 프랙탈 차수의 각 증가에 대한 2.6배로 증가한다. 길이 $l^{(n)}$ 역시 n 과 함께 증가하며, 부합하는 인장 유연성(정규화 없는)은 프랙탈 차수와 함께 더 급격히 증가한다. 실험(Xu 외, 2013)에

$$(EI)_{in-plane} = 7.44 \times 10^{-10} \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

서와 같이 $l^{(1)} = 110 \mu\text{m}$ 에 대하여, 인장 유연성은 $n=1$ 에 대한 0.0276 m/N에서, $n=2$ 에 대한 2.62 m/N 및 $n=3$ 에 대한 250 m/N 로 증가한다. 즉, 각 차수의 증가에 대하여 ~100배로 증가한다. 유연성이 프랙탈 차수와 함께 매우 급속도로 증가하는 사실은 부문 3에서 HCM의 개선에 있어서 중요한 역할을 할 것이다.

[0541]

3. 프랙탈 배선의 순차적 풀어짐(ordered unraveling)에 대한 단계적인 계산적 모델

[0542]

4 단위 셀($n=4$)에 대한 도 56a에 나타난 것과 같이, 제 n 차 프랙탈 배선은 수직방향(y)을 따라 배열된 제(n-1)차 배선, 및 수평방향(x)을 따라 배열된 제(n-2)차 배선으로 구성된다. 낮은 차수의 배선이 풀어지기 전에, 제(n-1)차 및 제(n-2)차 배선은 부문 2에서 얻어진 동등한 유연성 $T^{(n-1)}$ 및 $T^{(n-2)}$ 과 함께 수직 빔(도 56b에, 각각, 파란색 및 주황색으로 나타나는)으로 모델이 된다. 하기 부문에서 나타난 것과 같이, 이러한 접근은 정확한 결과를 나타내지만, 각 차수에서의 계산이 단지 수직 빔(straight beams)만을 포함하기 때문에 매우 단순하다.

[0543]

도 57에 나타난 제2차 프랙탈 배선은 그 접근을 나타내기 위한 예시로써 사용된다. 포스트버클링(postbuckling) 과정은 두가지 단계로 분류될 수 있다.

[0544]

(i) 단계 I: 도 57a에 나타난 것과 같이 제2차 프랙탈 배선의 풀어지는 단계이다. 수직의, 제1차 프랙탈 배선은 식(44)에 주어진 유연성과 함께 수직 빔(도 57a의 파란색)에 의해 나타난다. (도 57a의 갈색에 의해 표시되는 수평 부분들은 이미 수직 빔이다.) FEA는 인장 하에 전체적인 구조를 결정하기 위해서 수직 빔의 동등한 구조가 사용된다. 단계 I 은 수직 빔의 동등한 구조가 완전히 풀어졌을 때, 즉, 양 끝 사이의 거리가 모든 수직 빔의 총 길이가 될 때, 완료된다. 적용된 변형, 양 끝 사이의 거리의 증가된 퍼센트에 의해 정의되는 $\epsilon_{applied}$ 은

단계 I의 마지막에 제2차 프랙탈 배선에 대한 임계값($\varepsilon_{cr(I)}^{(2)}$)에 이른다.

$$\varepsilon_{cr(I)}^{(2)} = \frac{m(2h^{(2)} + 2l^{(2)})}{2ml^{(2)}} - 1 = \eta$$

식(46)

초기의 수직의 제1차 프랙탈 배선(파란색)은 단계 I의 마지막에 거의 수평적으로 된다(도 4a). 이러한 변형은 단위 셀의 주기성 때문에 근본적으로 동일하며, 이는 하기에서 설명된 것과 같이, 단계 II의 분석이 단일의 제1차 프랙탈 배선의 풀어짐에 중점을 둘 수 있는 것과 같다.

(ii) 단계 II: 도 57b에 나타난 제1차 프랙탈 배선의 풀어짐. 단계 II에서의 인장은 주로 (수평적으로 배열된) 제1차 프랙탈 배선(도 57a의 파란색)에 의해 조절되며, 이는 인장 유연성이 수직 빔(갈색)보다 훨씬 크기 때문이다. 그렇게 함으로써, 수직 빔의 변형은 무시해도 될 정도이고, 단일의 제1차 프랙탈 배선(예를 들어, 도 57b의 CD)만이 FEA에 의해 분석되며(모든 제1차 배선이 근본적으로 동일한 변형을 가지기 때문에), 이는 계산적 비

율을 상당히 감소시킨다. 단계 II에서 추가적인 인장, $\varepsilon_{applied} - \varepsilon_{cr(I)}^{(2)}$, 은 제2차 프랙탈 배선의 양 끝 사이의 추

$$2ml^{(2)} \left[\varepsilon_{applied} - \varepsilon_{cr(I)}^{(2)} \right]$$

가적인 변위 와 부합하며, 이때 단계 II의 각 제1차 프랙탈 배선에 대하여 FEA에서의

$$l^{(2)} \left[\varepsilon_{applied} - \varepsilon_{cr(I)}^{(2)} \right]$$

인장 변위 로 해석한다. 단계 II는 각 제1차 배선이 길이 $m[2h^{(1)} + (\pi - 2)l^{(1)}]$ 에 도달하여 완전히 풀어질 때 완료된다.

상기에서 설명된 HCM은 높은 차수($n \geq 3$)의 프랙탈 배선에도 적용된다. 제n차 프랙탈 배선에 대하여, (초기에 수직의) 제(n-1)차 및 (수평의) 제(n-2)차 배선은 단계 II에서 제(n-1)차 프랙탈 배선의 풀어짐에 따라, 단계 I에서 수직 빔으로 모델이 된다. 제n차 및 제(n-1)차 배선으로부터 나오는 모든 제(n-2)차 프랙탈 배선은 단계 II 이후에 추가적인 인장에 따라 풀어짐을 시작한다. 이러한 과정은 제1차 프랙탈 배선이 풀어질 때까지 모든 낮은 차수에 대해 반복한다.

4. 탄성 인장성 및 변형의 패턴에 대한 프랙탈 차수의 효과

부문 3의 HCM은 높이/간격 종횡비 $\eta = 8/\sqrt{11}$ 및 단위 셀의 수 $m=4$ 를 가지는 제1차 내지 제4차 프랙탈 배선에 대하여, 도 55에 나타난 것과 같이, 다수의 단위 셀을 가진 높은 차수의 프랙탈 배선의 포스트버클링(postbuckling) 거동을 연구하는 것을 가능하게 한다. 구리 배선은 탄성-이상적 소성 모델(Hill, 1950)에서 탄성 계수 $E_{Cu}=119$ GPa, 포아송 비 $\nu_{Cu}=0.34$, 및 항복 변형 0.3%(William 외, 1999)를 가진다. 그 결과는 높은 차수($n \geq 4$)의 배선에 대한 분석이 기존 FEA에 의해서는 매우 어렵고 시간이 소요되기 때문에, 프랙탈 차수 $n \leq 3$ 에 대한 기존의 FEA(HCM의 근사(approximations) 없이)에 의해 입증된다.

탄성 인장성은 배선에서의 최대 변형이 재료의 항복 변형(0.3%, William 외 (1999))에 도달할 때의 변형이 적용된다. 도 58은 $\eta = 8/\sqrt{11}$ 및 $m=4$ 에 대한 제n차 프랙탈 배선에 대한 탄성 인장성을 나타낸다. 교차 부분에서의 두께/폭 종횡비는 $t/w=0.03$ 이고, 간격에 대한 폭의 비율은 $w/l^{(1)}=0.4$ 이다. 그 결과는 $n \leq 3$ 에 대한 기존의 FEA와 매우 잘 맞는다. n 의 1씩 증가에 대하여, 탄성 인장성은 > 3 배로 증가하며, 이는 높은 차수의 프랙탈 설계가 탄성 제한을 상당히 향상시킬 수 있음을 제시한다. 예를 들어, 탄성 인장성은 제1차에 대한 ~10.7%에서, ~200배 증가하여, 제4차에 대해 ~2140%로 될 수 있다.

도 59 내지 62는 프랙탈 배선에서의 최대 주변형 및 프랙탈 차수 1 내지 4에 대하여, 각각의 변형 패턴에 대한 발전을 나타낸다. 제1차 프랙탈 배선(도 59)에 대하여, 최대 주변형은 적용된 변형으로 급속히 증가하고, 항복 변형 0.3%에 빠르게 도달하며, 이때 배선은 여전히 완전한 풀어지지 않고 따라서 탄성 인장성이 10.7%에만 이른다. 제2차 프랙탈 배선(도 60a)에 대하여, 최대 주변형은 제2차 구조의 풀어짐에 시작될 때, 초기에 천천히 증가하지만, 적용된 변형의 범위 $150\% < \varepsilon_{applied} < 240\%$ 에서, (제2차 구조의) 풀어짐의 종료 가까이에서는 "변형 경

화(strain hardening)"가 나타난다(도 60b). 항복 변형 0.3%는 변형 경화동안에 도달되며, 이는 192%의 탄성 인장성을 가져온다. 제3차 프랙탈 배선(도 61a)에 대하여, 변형 경화의 두가지 범위, $150\% < \epsilon_{\text{applied}} < 240\%$ 및 $500\% < \epsilon_{\text{applied}} < 820\%$ 는 가장 높은(제3차)차수 및 다음 차수(제2차) 구조의 풀어짐(의 종료)에 각각 부합한다(도 61b). 항복 변형 0.3%는 747%의 탄성 인장성을 나타내는 후반의 변형 경화(제2차 구조의 풀어짐에 부합하는)동안 도달된다. 도 61a와 비교하여, 제4차 프랙탈 배선(도 62a)은 변형 경화의 추가적인 범위($1500\% < \epsilon_{\text{applied}} < 2300\%$)를 나타내고, 제4차, 제3차 및 제2차 구조의 풀어짐(의 종료)에 각각 부합하는 변형 경화의 세가지 범위를 나타낸다(도 62b). 탄성 인장성 2140%는 마지막 변형 경화의 성과(제2차 구조의 풀어짐에 부합하는)동안에 도달된다. 프랙탈 배선의 순차적 풀어짐이 최대 주변형의 증가 속도를 지연시키고, 따라서 큰 변형 인장성을 가능하게 한다는 것이 분명하다.

[0553] 이러한 배선 인장성의 정도(2140%)는 식(41)에 기반한 능동 소자의 ~90% 충전 비율에 대한 시스템의 탄성 인장성 110%로 해석하고, 생체의학적 적용에 충분한 98% 충전 비율에 대한 22%로 해석할 수 있다.

[0554] 5. 일반화된 프랙탈 배선

[0555] 상기에서 설명된 프랙탈 배선은 각 차수의 배선이 각자의 높이/간격 중형비 $n^{(i)}$ 및 단위 셀의 수 $m^{(i)}$ ($i=1,2,\dots,n$)을 가질 때 일반화될 수 있다. 일반화된 프랙탈 배선은 Xu 외(2013)에서 입증된 것과 같이, 큰 탄성 인장성 및 상대적으로 낮은 전기적 저항성을 동시에 제공할 수 있다. 제n차의 일반화된 프랙탈 배선에 대하여, 그 구조적 관계 식(42)는 하기 식(47)로 나타낼 수 있다.

$$l^{(i)} = \left[\prod_{k=1}^{n-i} \frac{\eta^{(n-k+1)}}{2m^{(n-k)}} \right] l^{(n)}, \quad h^{(i)} = \eta^{(i)} \left[\prod_{k=1}^{n-i} \frac{\eta^{(n-k+1)}}{2m^{(n-k)}} \right] l^{(n)}, \quad (i=1..n-1)$$

[0556] 식(47)

[0557] 부분 3에서 설명된 HCM은 일반화된 프랙탈 배선의 포스트버클링(postbuckling)을 연구하기 위하여 단도직입적으로 연장될 수 있다. 도 63은 인장성 전지의 실험(Xu 외, 2013)에서의 일반화된 제2차 프랙탈 배선을 나타낸다. 도 63의 상단에서 나타난 배선($\epsilon=0\%$)은 전도성의 구리층($0.6\mu\text{m}$ 의 두께)을 끼워넣은 두개의 폴리이미드(PI)층(둘다 $1.2\mu\text{m}$ 의 두께, $E_{PI}=2.5\text{ GPa}$ 및 $\nu_{PI}=0.34$)으로 구성된다. 금속 트레이스(trace)는 전체 구조의 인장 동안에 거의 변형되지 않는 두개의 리지드(rigid), 원형의 아일랜드에 의해 연결된다.

[0558] 도 63은 두개의 다른 버클링(buckling) 모델, 즉, 대칭 및 비대칭의 방식에 대하여, 프랙탈 배선의 변형된 구조에서 HCM에 의해 얻어지는 결과에 대한 실험으로부터의 광학 이미지를 비교한다. HCM 및 실험 사이의 우수한 일치치는 두가지 방식에 대한 인장의 전체 범위(0% 내지 300%)에 대해 관찰된다. HCM에 의해 얻어지는 금속층에서의 최대 변형은 기존의 FEA에 의해 얻어지는 결과와 매우 일치하지만(도 64), 전자가 훨씬 빠르고 높은 프랙탈 차수에 적용이 가능하다. 실험(도 63) 및 기존의 FEA(도 64)는 HCM을 분명히 입증한다.

[0559] 6. 결론 및 토의

[0560] 순차적 풀어짐의 메커니즘에 기초한 프랙탈 배선의 포스트버클링(postbuckling) 분석에 대한 단계적인 계산적 모델은 상기 예시에서 발전된다. 그 접근은 기존의 FEA와 비교하여 계산적 노력 및 비용을 상당히 감소시키지만, 실험 및 FEA 둘 다에 의해 입증된 것과 같이, 정확한 예측성도 가지고 있다. 상기 설계는 프랙탈 차수가 1에서 4로 증가함에 따라, 탄성 인장성에 대해 큰 향상(~200배)을 제공한다. HCM은 페아노(Peano) 및 힐버트(Hilbert) 곡선(Sagan, 1994)과 같이, 교차 지점없이 형성된 프랙탈 레이아웃의 많은 다른 유형에도 적용이 가능하다. 또한, 인장성의 광전지(Yoon 외, 2008) 및 전자 안구 카메라(Ko et 외, 2008)와 같은 능동 소자의 큰 면적 범위를 동시에 요구하는 인장성의 전자장치의 발전에 유용하다. 프랙탈 배선의 개념은 인장성을 추가적으로 향상시키기 위해서, 연성 기관의 사전변형(Lee et al., 2011b; Zhang et al., 2013b)과 같은 인장성에 대한 다른 방식과도 추가적으로 조합될 수 있다.

[0561] 프랙탈 차수와 함께 배선의 총 길이의 단순한 증가 이외에, 높은 차수의 프랙탈 배선의 향상된 탄성 인장성에 있어서 중요한 역할을 하는 순차적 풀어짐의 과정에 주목하여야 한다. 예를 들어, 도 65의 제1차 및 제2차 프랙탈 배선은 동일한 총 길이 및 교차 구역(폭 및 두께) 및 장치 아일랜드들 사이의 동일한 간격을 가지지만, 제2차 배선은 탄성 인장성에 대해 거의 2배 증가함(528% versus 284%)에 의해 제1차 배선을 능가한다(Xu 외, 2013).

[0562]

부록. 제n차 프랙탈 배선의 효과적인 신축성

[0563]

오른쪽 끝의 굽힘 모멘트(bending moment)(M_x , M_y , M_z) 및 힘(N , Q_y , Q_z)을 조건으로 하고 왼쪽 끝에 고정된 제1차 프랙탈 배선에 대하여, 전체 배선의 변형 에너지는 모든 직선 및 곡선의 부분에서의 굽힘 에너지의 합으로부

터 얻어질 수 있다(Zhang 외, 2013a). 제1차 배선의 유연성 행렬 $T_{in-plane}^{(1)}$ 및 $T_{out-of-plane}^{(1)}$ 는 식(44a) 및 (44b)에서 주어진 것과 같이, 힘(또는 굽힘 모멘트)의 구성요소에 대하여 변형 에너지 함수에서 도출되는 제2차로부터 얻어질 수 있다.

[0564]

제2차 프랙탈 배선은 수직적으로 배열된 제1차 배선 및 수평적으로 배열된 수직 빔(straight beams)으로 구성된

다. 제1차 배선의 변형 에너지는 그 유연성 행렬, $T_{in-plane}^{(1)}$ 및 $T_{out-of-plane}^{(1)}$ 를 사용하여 구할 수 있는 반면, 제2차 배선의 변형 에너지는 모든 제1차 배선 및 수직 빔에서의 에너지의 합이다. 한편, 제2차 프랙탈 배선의

변형 에너지는 $T_{in-plane}^{(2)}$ 및 $T_{out-of-plane}^{(2)}$ 의 조건에서 구해질 수 있다. 이러한 에너지 동등은 식(45a) 및 (45

b)에서의 $T_{in-plane}^{(2)}$ 및 $T_{out-of-plane}^{(2)}$ 의 분석적 표현이 나오게 하며, 이때 구성요소 $T_{out-of-plane,11}^{(2)}$ 는 하기 식 (A.1)에 의해 주어진다.

$$T_{out-of-plane,11}^{(2)} = \frac{m^3}{3} [4p - (1-\nu)\pi\eta] + \frac{m}{12} \eta [k(\eta^2 + 2) + (5+\nu)\eta - 2(1-\nu)] \\ + \frac{\eta^3}{384m} \{8\eta p + [(5+3\nu)\pi - 16](p - \pi\eta) + 8[8(1+\nu) - \pi]\eta + 2(7+5\nu)\pi - 16(3+4\nu)\}$$

[0565]

식(A.1)

[0566]

제n차 배선은 수직적으로 배열된 제(n-1)차 배선 및 수평적으로 배열된 제(n-2)차 배선으로 구성된다. 제n차 배선의 변형 에너지 및 모든 제(n-1)차 및 제(n-2)차 배선에서의 변형 에너지의 합으로부터의 변형 에너지의 동등

에 기초하여, $T_{in-plane}^{(n)}$ 및 $T_{out-of-plane}^{(n)}$ 는 제(n-1)차 및 제(n-2)차에 대한 유연성 행렬을 통한 하기 회귀 공식(recursive formula)에서 구해진다:

$$T_{in-plane}^{(n)} = \frac{\eta}{2m} \begin{pmatrix} \frac{\eta}{2m} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\eta}{2m} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} + \sum_{k=1}^m \left\{ \begin{pmatrix} \bar{D}_I [T_{in-plane}^{(n-1)} K_1(m) + K_1^T(m) T_{in-plane}^{(n-1)}] \bar{D}_I^T \\ + \bar{D}_{II} T_{in-plane}^{(n-1)} \bar{D}_{II}^T \\ + \bar{D}_{III} [T_{in-plane}^{(n-1)} K_1(m) + K_1^T(m) T_{in-plane}^{(n-1)}] \bar{D}_{III}^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\eta}{2m} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\eta}{2m} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \right\} \\ + \frac{\eta^2}{4m^2} \sum_{k=1}^m [\bar{D}_{IV}^* T_{in-plane}^{(n-2)} \bar{D}_{IV}^{*T} + \bar{D}_V^* T_{in-plane}^{(n-2)} \bar{D}_V^{*T}] \quad \text{for } n \geq 3$$

[0567]

식(A.2a)

$$\begin{aligned}
& \mathbf{T}_{out-of-plane}^{(n)} = \\
& \frac{\eta}{2m} \begin{pmatrix} \frac{\eta}{2m} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \sum_{k=1}^m \left\{ \begin{aligned} & \bar{\mathbf{R}}_I \left[\mathbf{T}_{out-of-plane}^{(n-1)} \mathbf{K}_2(m) + \mathbf{K}_2^T(m) \mathbf{T}_{out-of-plane}^{(n-1)} \right] \bar{\mathbf{R}}_I^T \\ & + \bar{\mathbf{R}}_{II} \mathbf{T}_{out-of-plane}^{(n-1)} \bar{\mathbf{R}}_{II}^T \\ & + \bar{\mathbf{R}}_{III} \left[\mathbf{T}_{out-of-plane}^{(n-1)} \mathbf{K}_2(m) + \mathbf{K}_2^T(m) \mathbf{T}_{out-of-plane}^{(n-1)} \right] \bar{\mathbf{R}}_{III}^T \end{aligned} \right\} \begin{pmatrix} \frac{\eta}{2m} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
& + \frac{\eta^2}{4m^2} \sum_{k=1}^m \left[\bar{\mathbf{R}}_{IV}^* \mathbf{T}_{out-of-plane}^{(n-2)} \bar{\mathbf{R}}_{IV}^{*T} + \bar{\mathbf{R}}_{V'}^* \mathbf{T}_{out-of-plane}^{(n-2)} \bar{\mathbf{R}}_{V'}^{*T} \right] \quad \text{for } n \geq 3
\end{aligned}$$

[0568]

[0569]

식(A.2b)

[0570]

이 때

$$\begin{aligned}
\bar{\mathbf{D}}_I &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & -m \\ 1 & 0 & -4(m-k+1)m\eta^{-1} \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathbf{D}}_{II} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -m \\ -1 & 0 & (4m-4k+2)m\eta^{-1} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\
\bar{\mathbf{D}}_{III} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -4(m-k)m\eta^{-1} \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathbf{D}}_{IV}^* = \begin{bmatrix} \eta^2/(4m^2) & 0 & \eta/2 \\ 0 & \eta^2/(4m^2) & 2m-2k+1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\
\bar{\mathbf{D}}_{V'}^* &= \begin{bmatrix} \eta^2/(4m^2) & 0 & \eta/2 \\ 0 & -\eta^2/(4m^2) & -2m+2k \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K}_1(m) = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -m & 1 \end{pmatrix}, \\
\bar{\mathbf{R}}_I &= \begin{bmatrix} 1 & m & -4(m-k+1)m\eta^{-1} \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathbf{R}}_{II} = \begin{bmatrix} 1 & m & (4m-4k+2)m\eta^{-1} \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \\
\bar{\mathbf{R}}_{III} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & -4(m-k)m\eta^{-1} \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathbf{R}}_{IV}^* = \begin{bmatrix} \eta^2/(4m^2) & -(2m-2k+1) & -\eta^3/(8m^2) \\ 0 & \eta^2/(4m^2) & 0 \\ 0 & 0 & \eta^2/(4m^2) \end{bmatrix},
\end{aligned}$$

[0571]

$$\bar{\mathbf{R}}_{V'}^* = \begin{bmatrix} \eta^2/(4m^2) & -(2m-2k) & -\eta^3/(8m^2) \\ 0 & \eta^2/(4m^2) & 0 \\ 0 & 0 & -\eta^2/(4m^2) \end{bmatrix}, \text{ and } \mathbf{K}_2(m) = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ m & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

[0572]

[0573]

이다.

[0574]

참조문헌

[0575]

[1] Cotton, D. P. J., Graz, I. M., and Lacour, S. P., 2009. A Multifunctional Capacitive Sensor for Stretchable Electronic Skins. *IEEE Sensors Journal* 9, 2008-2009.

[0576]

[2] Duan, Y. Q., Huang, Y. A., Yin, Z. P., Bu, N. B., and Dong, W. T., 2014. Non-wrinkled, highly

stretchable piezoelectric devices by electrohydrodynamic direct-writing. *Nanoscale* In Press, doi: 10.1039/C3NR06007A.

- [0577] [3] Gao, H. J., Wang, X., Yao, H. M., Gorb, S., and Arzt, E., 2005. Mechanics of hierarchical adhesion structures of geckos. *Mechanics of Materials***37**, 275-285.
- [0578] [4] Gonzalez, M., Axisa, F., BuIcke, M. V., Brosteaux, D., Vandeveld, B., and Vanfleteren, J., 2008. Design of metal interconnects for stretchable electronic circuits. *Microelectronics Reliability***48**, 825-832.
- [0579] [5] Graudejus, O., Morrison, B., Goletiani, C., Yu, Z., and Wagner, S., 2012. Encapsulating Elastically Stretchable Neural Interfaces: Yield, Resolution, and Recording/Stimulation of Neural Activity. *Advanced Functional Materials***22**, 640-651.
- [0580] [6] Hsu, Y. Y., Gonzalez, M., Bossuyt, F., Axisa, F., Vanfleteren, J., and De Wolf, I., 2009. In situ observations on deformation behavior and stretching-induced failure of fine pitch stretchable interconnect. *Journal of Materials Research***24**, 3573-3582.
- [0581] [7] Huang, Y. A., Wang, X. M., Duan, Y. Q., Bu, N. B., and Yin, Z. P., 2012. Controllable self-organization of colloid microarrays based on finite length effects of electrospun ribbons. *Soft Matter***8**, 8302-8311.
- [0582] [8] Jiang, H. Q., Khang, D. Y., Fei, H. Y., Kim, H., Huang, Y. G., Xiao, J. L., and Rogers, J. A., 2008. Finite width effect of thin-films buckling on compliant substrate: Experimental and theoretical studies. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids***56**, 2585-2598.
- [0583] [9] Jiang, H. Q., Khang, D. Y., Song, J. Z., Sun, Y. G., Huang, Y. G., and Rogers, J. A., 2007. Finite deformation mechanics in buckled thin films on compliant supports. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America***104**, 15607-15612.
- [0584] [10] Jones, J., Lacour, S. P., Wagner, S., and Suo, Z. G., 2004. Stretchable wavy metal interconnects. *Journal of Vacuum Science & Technology* **A22**, 1723-1725.
- [0585] [11] Kaltenbrunner, M., Sekitani, T., Reeder, J., Yokota, T., Kuribara, K., Tokuhara, T., Drack, M., Schwodiauer, R., Graz, I., Bauer-Gogonea, S., Bauer, S., and Someya, T., 2013. An ultra-lightweight design for imperceptible plastic electronics. *Nature***499**, 458-463.
- [0586] [12] Khang, D. Y., Jiang, H. Q., Huang, Y., and Rogers, J. A., 2006. A stretchable form of single-crystal silicon for high-performance electronics on rubber substrates. *Science***311**, 208-212.
- [0587] [13] Kim, D. H., Ghaffari, R., Lu, N. S., Wang, S. D., Lee, S. P., Keum, H., D'Angelo, R., Klinker, L., Su, Y. W., Lu, C. F., Kim, Y. S., Ameen, A., Li, Y. H., Zhang, Y. H., de Graff, B., Hsu, Y. Y., Liu, Z. J., Ruskin, J., Xu, L. Z., Lu, C., Omenetto, F. G., Huang, Y. G., Mansour, M., Slepian, M. J., and Rogers, J. A., 2012a. Electronic sensor and actuator webs for large-area complex geometry cardiac mapping and therapy. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America***109**, 19910-19915.
- [0588] [14] Kim, D. H., Liu, Z. J., Kim, Y. S., Wu, J., Song, J. Z., Kim, H. S., Huang, Y. G., Hwang, K. C., Zhang, Y. W., and Rogers, J. A., 2009. Optimized Structural Designs for Stretchable Silicon Integrated Circuits. *Small***15**, 2841-2847.
- [0589] [15] Kim, D. H., Lu, N. S., Ghaffari, R., Kim, Y. S., Lee, S. P., Xu, L. Z., Wu, J. A., Kim, R. H., Song, J. Z., Liu, Z. J., Viventi, J., de Graff, B., Elolampi, B., Mansour, M., Slepian, M. J., Hwang, S., Moss, J. D., Won, S. M., Huang, Y. G., Litt, B., and Rogers, J. A., 2011a. Materials for multifunctional balloon catheters with capabilities in cardiac electrophysiological mapping and ablation therapy. *Nature Materials***10**, 316-323.
- [0590] [16] Kim, D. H., Lu, N. S., Ma, R., Kim, Y. S., Kim, R. H., Wang, S. D., Wu, J., Won, S. M., Tao, H., Islam, A., Yu, K. J., Kim, T. I., Chowdhury, R., Ying, M., Xu, L. Z., Li, M., Chung, H. J., Keum, H.,

McCormick, M., Liu, P., Zhang, Y. W., Omenetto, F. G., Huang, Y. G., Coleman, T., and Rogers, J. A., 2011b. Epidermal Electronics. *Science***333**, 838-843.

- [0591] [17] Kim, D. H., Song, J. Z., Choi, W. M., Kim, H. S., Kim, R. H., Liu, Z. J., Huang, Y. Y., Hwang, K. C., Zhang, Y. W., and Rogers, J. A., 2008. Materials and noncoplanar mesh designs for integrated circuits with linear elastic responses to extreme mechanical deformations. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America***105**, 18675-18680.
- [0592] [18] Kim, D. H., Wang, S. D., Keum, H., Ghaffari, R., Kim, Y. S., Tao, H., Panilaitis, B., Li, M., Kang, Z., Omenetto, F., Huang, Y. G., and Rogers, J. A., 2012b. Thin, Flexible Sensors and Actuators as 'Instrumented' Surgical Sutures for Targeted Wound Monitoring and Therapy. *Small***18**, 3263-3268.
- [0593] [19] Kim, R. H., Kim, D. H., Xiao, J. L., Kim, B. H., Park, S. I., Panilaitis, B., Ghaffari, R., Yao, J. M., Li, M., Liu, Z. J., Malyarchuk, V., Kim, D. G., Le, A. P., Nuzzo, R. G., Kaplan, D. L., Omenetto, F. G., Huang, Y. G., Kang, Z., and Rogers, J. A., 2010. Waterproof AlInGaP optoelectronics on stretchable substrates with applications in biomedicine and robotics. *Nature Materials***9**, 929-937.
- [0594] [20] Kim, R. H., Tao, H., Kim, T. I., Zhang, Y. H., Kim, S., Panilaitis, B., Yang, M. M., Kim, D. H., Jung, Y. H., Kim, B. H., Li, Y. H., Huang, Y. G., Omenetto, F. G., and Rogers, J. A., 2012c. Materials and Designs for Wirelessly Powered Implantable Light-Emitting Systems. *Small***18**, 2812-2818.
- [0595] [21] Ko, H. C., Stoykovich, M. P., Song, J. Z., Malyarchuk, V., Choi, W. M., Yu, C. J., Geddes, J. B., Xiao, J. L., Wang, S. D., Huang, Y. G., and Rogers, J. A., 2008. A hemispherical electronic eye camera based on compressible silicon optoelectronics. *Nature***454**, 748-753.
- [0596] [22] Lacour, S. P., Jones, J., Wagner, S., Li, T., and Suo, Z. G., 2005. Stretchable interconnects for elastic electronic surfaces. *Proceedings of the IEEE***93**, 1459-1467.
- [0597] [23] Lacour, S. P., Wagner, S., Narayan, R. J., Li, T., and Suo, Z. G., 2006. Stiff subcircuit islands of diamondlike carbon for stretchable electronics. *Journal of Applied Physics***100**, 014913.
- [0598] [24] Lee, C. H., Kim, Y. J., Hong, Y. J., Jeon, S. R., Bae, S., Hong, B. H., and Yi, G. C., 2011a. Flexible Inorganic Nanostructure Light-Emitting Diodes Fabricated on Graphene Films. *Advanced Materials***23**, 4614-4619.
- [0599] [25] Lee, J., Wu, J. A., Shi, M. X., Yoon, J., Park, S. I., Li, M., Liu, Z. J., Huang, Y. G., and Rogers, J. A., 2011b. Stretchable GaAs Photovoltaics with Designs That Enable High Areal Coverage. *Advanced Materials***23**, 986-991.
- [0600] [26] Li, T., Suo, Z. G., Lacour, S. P., and Wagner, S., 2005. Compliant thin film patterns of stiff materials as platforms for stretchable electronics. *Journal of Materials Research***20**, 3274-3277.
- [0601] [27] Li, Y., Ortiz, C., and Boyce, M. C., 2012. Bioinspired, mechanical, deterministic fractal model for hierarchical suture joints. *Physical Review E***85**,
- [0602] [28] Li, Y., Ortiz, C., and Boyce, M. C., 2013. A generalized mechanical model for suture interfaces of arbitrary geometry. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids***61**, 1144-1167.
- [0603] [29] Lipomi, D. J., Tee, B. C. K., Vosgueritchian, M., and Bao, Z. N., 2011. Stretchable Organic Solar Cells. *Advanced Materials***23**, 1771-1775.
- [0604] [30] Lu, N. S., Lu, C., Yang, S. X., and Rogers, J., 2012. Highly Sensitive Skin-Mountable Strain Gauges Based Entirely on Elastomers. *Advanced Functional Materials***22**, 4044-4050.
- [0605] [31] Mannsfeld, S. C. B., Tee, B. C. K., Stoltenberg, R. M., Chen, C., Barman, S., Muir, B. V. O., Sokolov, A. N., Reese, C., and Bao, Z. N., 2010. Highly sensitive flexible pressure sensors with microstructured rubber dielectric layers. *Nature Materials***9**, 859-864.
- [0606] [32] Nelson, E. C., Dias, N. L., Bassett, K. P., Dunham, S. N., Verma, V., Miyake, M., Wiltzius, P., Rogers, J. A., Coleman, J. J., Li, X. L., and Braun, P. V., 2011. Epitaxial growth of three-

dimensionally architected optoelectronic devices. *Nature Materials***10**, 676-681.

- [0607] [33] Rogers, J. A., Someya, T., and Huang, Y. G., 2010. Materials and Mechanics for Stretchable Electronics. *Science***327**, 1603-1607.
- [0608] [34] Sagan, H. Space-filling curves. New York: Springer-Verlag, 1994.
- [0609] [35] Schwartz, G., Tee, B. C. K., Mei, J. G., Appleton, A. L., Kim, D. H., Wang, H. L., and Bao, Z. N., 2013. Flexible polymer transistors with high pressure sensitivity for application in electronic skin and health monitoring. *Nature Communications***4**, 1859.
- [0610] [36] Sekitani, T., Nakajima, H., Maeda, H., Fukushima, T., Aida, T., Hata, K., and Someya, T., 2009. Stretchable active-matrix organic light-emitting diode display using printable elastic conductors. *Nature Materials***8**, 494-499.
- [0611] [37] Someya, T., Sekitani, T., Iba, S., Kato, Y., Kawaguchi, H., and Sakurai, T., 2004. A large-area, flexible pressure sensor matrix with organic field-effect transistors for artificial skin applications. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America***101**, 9966-9970.
- [0612] [38] Song, J., Huang, Y., Xiao, J., Wang, S., Hwang, K. C., Ko, H. C., Kim, D. H., Stoykovich, M. P., and Rogers, J. A., 2009. Mechanics of noncoplanar mesh design for stretchable electronic circuits. *Journal of Applied Physics***105**, 123516.
- [0613] [39] Song, Y. M., Xie, Y. Z., Malyarchuk, V., Xiao, J. L., Jung, I., Choi, K. J., Liu, Z. J., Park, H., Lu, C. F., Kim, R. H., Li, R., Crozier, K. B., Huang, Y. G., and Rogers, J. A., 2013. Digital cameras with designs inspired by the arthropod eye. *Nature***497**, 95-99.
- [0614] [40] Viventi, J., Kim, D. H., Moss, J. D., Kim, Y. S., Blanco, J. A., Annetta, N., Hicks, A., Xiao, J. L., Huang, Y. G., Callans, D. J., Rogers, J. A., and Litt, B., 2010. A Conformal, Bio-Interfaced Class of Silicon Electronics for Mapping Cardiac Electrophysiology. *Science Translational Medicine***2**, 24ra22.
- [0615] [41] Wagner, S., Lacour, S. P., Jones, J., Hsu, P. H. I., Sturm, J. C., Li, T., and Suo, Z. G., 2004. Electronic skin: architecture and components. *Physica E-Low-Dimensional Systems & Nanostructures***25**, 326-334.
- [0616] [42] Webb, R. C., Bonifas, A. P., Behnaz, A., Zhang, Y. H., Yu, K. J., Cheng, H. Y., Shi, M. X., Bian, Z. G., Liu, Z. J., Kim, Y. S., Yeo, W. H., Park, J. S., Song, J. Z., Li, Y. H., Huang, Y. G., Gorbach, A. M., and Rogers, J. A., 2013. Ultrathin conformal devices for precise and continuous thermal characterization of human skin. *Nature Materials***12**, 938-944.
- [0617] [43] William, F. R., Leroy, D. S., and Don, H. M. Mechanics of Materials. New York: Jon Wiley & Sons, 1999.
- [0618] [44] Xu, S., Zhang, Y. H., Cho, J., Lee, J., Huang, X., Jia, L., Fan, J. A., Su, Y. W., Su, J., Zhang, H. G., Cheng, H. Y., Lu, B. W., Yu, C. J., Chuang, C., Kim, T. I., Song, T., Shigeta, K., Kang, S., Dagdeviren, C., Petrov, I., Braun, P. V., Huang, Y., Paik, U., and Rogers, J. A., 2013. Stretchable batteries with self-similar serpentine interconnects and integrated wireless recharging systems. *Nature Communications***4**, 1543.
- [0619] [45] Yang, S. X., and Lu, N. S., 2013. Gauge Factor and Stretchability of Silicon-on-Polymer Strain Gauges. *Sensors***13**, 8577-8594.
- [0620] [46] Yao, H., and Gao, H., 2006. Mechanics of robust and releasable adhesion in biology: Bottom-up designed hierarchical structures of gecko. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids***54**, 1120-1146.
- [0621] [47] Yao, H., and Gao, H., 2007. Multi-scale cohesive laws in hierarchical materials. *International Journal of Solids and Structures***44**, 8177-8193.

- [0622] [48] Ying, M., Bonifas, A. P., Lu, N. S., Su, Y. W., Li, R., Cheng, H. Y., Ameen, A., Huang, Y. G., and Rogers, J. A., 2012. Silicon nanomembranes for fingertip electronics. *Nanotechnology***23**, 344004.
- [0623] [49] Yoon, J., Baca, A. J., Park, S. I., Elvikis, P., Geddes, J. B., Li, L. F., Kim, R. H., Xiao, J. L., Wang, S. D., Kim, T. H., Motala, M. J., Ahn, B. Y., Duoss, E. B., Lewis, J. A., Nuzzo, R. G., Ferreira, P. M., Huang, Y. G., Rockett, A., and Rogers, J. A., 2008. Ultrathin silicon solar microcells for semitransparent, mechanically flexible and microconcentrator module designs. *Nature Materials***7**, 907-915.
- [0624] [50] Yu, Z., Graudejus, O., Tsay, C., Lacour, S. P., Wagner, S., and Morrison, B., 2009. Monitoring Hippocampus Electrical Activity In Vitro on an Elastically Deformable Microelectrode Array. *Journal of Neurotrauma***26**, 1135-1145.
- [0625] [51] Zhang, Y. H., Fu, H. R., Su, Y. W., Xu, S., Cheng, H. Y., Fan, J. A., Hwang, K. C., Rogers, J. A., and Huang, Y., 2013a. Mechanics of ultra-stretchable self-similar serpentine interconnects. *Acta Materialia***61**, 7816-7827.
- [0626] [52] Zhang, Y. H., Wang, S. D., Li, X. T., Fan, J. A., Xu, S., Song, Y. M., Choi, K. J., Yeo, W. H., Lee, W., Nazaar, S. N., Lu, B. W., Yin, L., Hwang, K. C., Rogers, J. A., and Huang, Y., 2013b. Experimental and Theoretical Studies of Serpentine Microstructures Bonded To Prestrained Elastomers for Stretchable Electronics. *Advanced Functional Materials* In Press, doi: 10.1002/adfm.201302957.
- [0627] [53] Zhang, Y. H., Xu, S., Fu, H. R., Lee, J., Su, J., Hwang, K. C., Rogers, J. A., and Huang, Y., 2013c. Buckling in serpentine microstructures and applications in elastomer-supported ultra-stretchable electronics with high areal coverage. *Soft Matter***9**, 8062-8070.
- [0628] [54] Zhang, Z., Zhang, T., Zhang, Y. W., Kim, K.-S., and Gao, H., 2012. Strain-Controlled Switching of Hierarchically Wrinkled Surfaces between Superhydrophobicity and Superhydrophilicity. *Langmuir***28**, 2753-2760.
- [0629] [55] Zhang, Z., Zhang, Y.-W., and Gao, H., 2011. On optimal hierarchy of load-bearing biological materials. *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences***278**, 519-525.
- [0630] 참조로 포함된 것과 용어에 대한 설명
- [0631] 본 출원 전반에 걸쳐 참조로 사용된 인용문헌들, 일례로 발행 또는 등록된 특허나 그에 준하는 특허 서류들, 특허출원공보, 비특허 문헌 또는 그 외 근거자료들은, 개별적으로 포함되어 있으나 각각의 참조가 최소한 본 출원의 개시 내용과 부분적인 불일치가 없는 한 온전히 본 문서에 포함된다 (일례로, 부분적인 불일치를 포함하는 참조는 일치하지 않는 부분을 제외하고 참조로 포함된다).
- [0632] 본 명세서에 사용된 용어와 표현들은 한정이 아닌 설명을 위해 사용된 것이고, 이 용어와 표현들의 사용은 본 명세서에서 보여지거나 설명된 특징 이나 부분의 등가물을 배제하기 위해 사용된 것이 아니다. 그러나 보호받고자 하는 발명의 범위 안에서 다양하게 수정이 가능하다. 따라서, 본발명이 본 명세서에 개시된 개념에 관한 최적실시예, 개략적인 실시예, 추가적인 특징들, 수정과 변수에 의해 특정되긴 하였지만 당업자에 의해 수단으로 사용될 수 있음이 이해되어야 한다. 그리고 이러한 수정과 변수들은 첨부된 청구항에 의해 정의된 것과 마찬가지로 본 발명의 권리범위 안에 포함되는 것으로 간주한다. 본 명세서에서 제공하는 특정 실시예들은 본 발명에서 사용가능한 실시예들이고, 이들은 당업자에게 있어 본발명은 본발명에서 설명된 장치들, 장치의 구성요소들, 방법들의 수많은 변화를 통해서 수행될 수 있음이 자명 할 것이다. 당업자에게 자명한 것처럼, 본 발명의 유용한 방법들과 장치들은 수많은 추가구성과 절차에 필요한 요소와 단계들을 포함할 수 있다.
- [0633] 본 명세서에 개시된 치환기 그룹은, 그에 포함된 개별요소들과 그룹 구성의 이성질체, 거울상 이성질체, 및 부분 이성질체를 포함하는 모든 하위그룹이 각기 따로 개시된 것으로 본다. 본 명세서에서 사용된 마쿠쉬 그룹 또는 다른 그룹들, 그 그룹의 모든 각각의 구성요소들, 그룹안에서 나올 수 있는 모든 조합과 부조합들은 본발명의 개시내용에 개별적으로 포함되기 위한 것이다. 본 명세서에서 설명된 화합물에서, 화합물의 특정 이성질체, 거울상 이성질체 또는 부분 이성질체는, 일례로, 화학식 또는 화학명으로 특정되지 않고, 본 설명에서는 화합물의 이성질체, 거울상 이성질체 또는 부분 이성질체를 개별 또는 이들의 조합으로 포함한다. 나아가, 별도로 지정되지 않는다면, 본 명세서에서 나타난 화합물의 모든 동위원소의 변형은 개시로 포함될 수 있다. 일례로, 개

시된 분자의 하나 이상의 수소는 중수소 또는 삼중수소로 대체될 수 있음이 이해되어야 한다. 분자의 동위원소의 변형은 일반적으로 분자 또는 그 사용과 관련된 화학적 및 생물학적 연구에서 그리고 분자에 대한 분석에서 기준으로써 유용하다. 이러한 동위원소의 변형을 만드는 방법은 당업자에게 자명하다. 당업자는 같은 화합물 등에 대해 다른 이름을 붙일 수도 있는 것이 알려져 있는 만큼, 화합물등의 특정 이름들은 예시적으로 사용된 것이다.

[0634] 본 명세서에 개시된 다수의 분자들은 하나 이상의 이온화 가능 그룹을 포함한다[양성자가 제거(일례로, $-COOH$) 또는 첨가(일례로, 아민) 또는 4요소화(일례로, 아민)될 수 있는 그룹]. 이러한 분자의 가능한 모든 이온 형태 및 그것의 염은 본 명세서의 개시에서 개별적으로 포함될 수 있다. 본 명세서에서 화합물의 염에 대하여, 당업자에게 자명한 기술 중 하나는 주어진 적용에 대한 본 발명의 염의 제조에 적합한 매우 다양한 가능한 반대이온들 중에서 선택될 수 있다. 특정 적용에 있어서, 염을 제조하기 위하여 주어진 음이온 또는 양이온의 선택은 그 염의 증가된 또는 감소된 용해성을 가져올 수 있다.

[0635] 본 명세서에서 설명되거나 예증된 모든 공식과 구성요소들의 조합은 특별한 제제가 없는 한 발명의 실시를 위해 사용될 수 있다.

[0636] 본 명세서 및 추가되는 청구항에서 사용되는 것으로, 단일 표면 "a", "an", 및 "the"는 내용이 명백히 다른 사항을 나타내지 않는다면 복수의 참고문헌을 포함한다. 따라서, 일례로, "a cell"에 대한 참고문헌은 복수의 상기 셀들 및 당업계에서 자명한 그것의 동등물 등을 포함한다. 또한, 용어 "a"(또는 "an"), "하나 이상" 및 "적어도 하나"는 본 명세서에서 상호교환적으로 사용될 수 있다. 또한 용어 "포함하는", "함유하는" 및 "가지는"은 상호교환적으로 사용될 수 있다. 표현 "청구항 XX-YY의 어느 하나에 있어서"(XX 및 YY는 청구항 숫자를 나타낸다)는 선택적 형식으로 다수의 종속항을 제공하기 위함이고, 일부 실시형태에서는 "청구항 XX-YY 중 어느 한 항에 있어서"라는 표현과 상호교환적이다.

[0637] 본 명세서에, 일례로 물리적 특성의 범위, 크기 범위, 온도 범위, 시간 범위 또는 조성물 또는 농도 범위 등의 범위가 주어진 경우, 모든 중간 범위 및 하위 범위들은 그 범위에 포함된 각각의 주어진 수치들과 마찬가지로 본 발명의 개시 내용에 포함되는 것이다. 본 명세서에서 사용된 것과 같이, 범위는 특히 범위의 종점(endpoint)값으로 제공되는 수치를 포함한다. 예를 들어, 1 내지 100의 범위는 특히 1 및 100의 종점값을 포함한다. 본 명세서의 상세한 설명에 포함된 범위나 하위 범위에 속한 어떤 하위 범위들이나 개별값들은 본 발명의 청구항에 명시되지 않을 수도 있다.

[0638] 본 명세서에서 언급된 모든 특허 및 공보들은 본 발명에 관계된 해당 업자들의 지식수준에 준한다. 본 명세서에서 인용된 참고문헌들은 그것들의 공보시점이나 출원된 시점에서의 최신기술을 나타내기 위해 참고 사항으로 본 명세서에 포함되며, 이 정보들은 필요에 따라 선행기술의 특정 실시예를 배제하기 위해 사용될 수 있다. 일례로, 물질의 구성에 대해 보호받고자 할 때, 출원인의 발명에 선행하고, 본 발명에서 인용된 참조에 실시가능성이 제공된 알려지거나 사용가능한 화합물들은 이 건 발명의 물질 청구항의 구성에 포함되는 용도로 사용되는 것이 아니다.

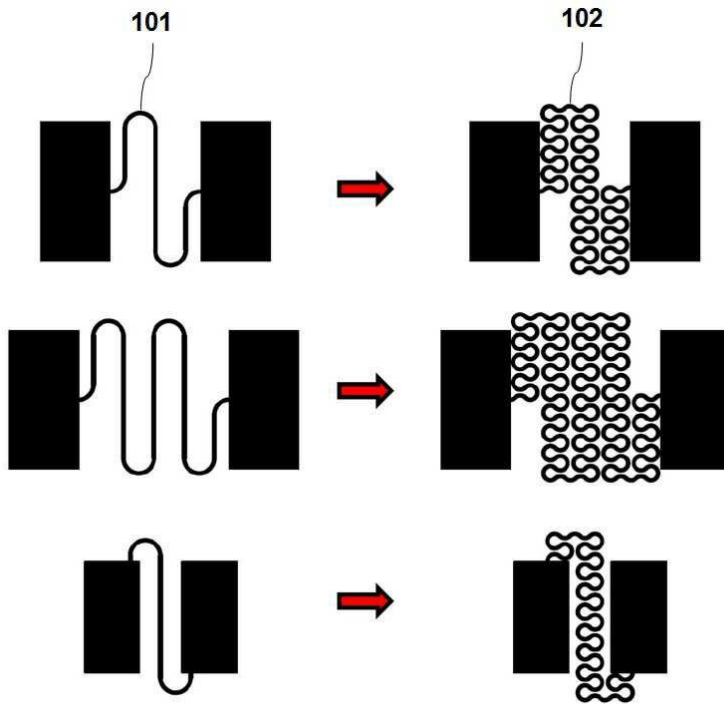
[0639] 본 명세서에서 사용된 표현인 "구비하는"은 "포함하는", "함유하는", 또는 "특징을 가지는"과 동의어이며, 추가적이며 인용되지 않은 요소나 방법의 단계들을 배제하지 않는 포괄적이거나 열린 의미의 표현이다. 본 명세서에서 사용된 표현인 "구성된"은 청구항에서 특정되지 않은 어떠한 요소, 단계 혹은 성분은 포함하지 않는 표현이다. 본 명세서에서 사용된 표현인 "필수 구성요소로 이루어진"은 청구항의 기본적인 신규한 특징들에 실질적인 영향을 끼치지 않는 원료나 단계들을 배제하지 않는 의미로 사용된다. 본 명세서에서 사용된 예시에서 용어 "구비하는", "구성된" 및 "필수구성요소로 이루어진"은 상호 대체 가능하다. 본 명세서에서 적절하게 예시적으로 묘사된 발명은 본 명세서에서 구체적으로 개시되지 않은 어떤 요소나 요소들 혹은 한정과 한정들 없이도 실시될 수도 있다.

[0640] 당업자는 구체적으로 실증된 것 이외의 출발물질, 생물학 원료, 시약, 합성방법, 정제방법, 분석방법, 분석법 및 생물학적 방법들이 본 발명의 실시 사용될 수 있을 수 있음을 수행되지 않은 실험에 관한 개시가 없어도 이해할 것이다. 해당 원료들과 방법들에 해당하는 모든 업계내 알려진 기능적 등가물들은 본 발명에 해당된다. 본 명세서에서 사용된 용어나 표현들은 상세한 설명의 조건들로 사용되었으며, 한정을 위해 사용된 것이 아니다. 그리고 본 명세서에서 나타내는 특징이나 묘사, 혹은 본 명세서의 부분에 있어 이러한 용어나 표현들의 사용은 어떠한 등가물을 배제하는 용도로 사용된 것이 아니다. 하지만 본 발명의 권리범위 안에서 다양한 수정이 가능하다. 따라서, 본 발명이 최적실시예와 선택적인 특징, 본 명세서의 개념에 대한 수정 및 변수들에 관해 개시된 내용으로 인해 구체적으로 개시되어 있긴 하지만 당업자에 의해 사용될 수 있으며, 이러한 수정과 변수

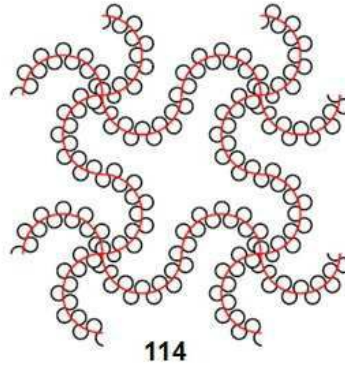
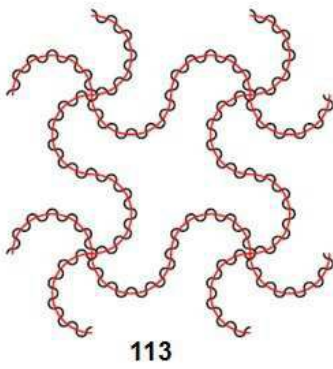
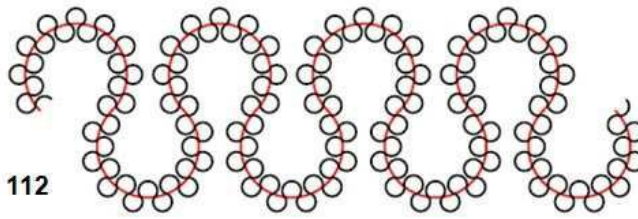
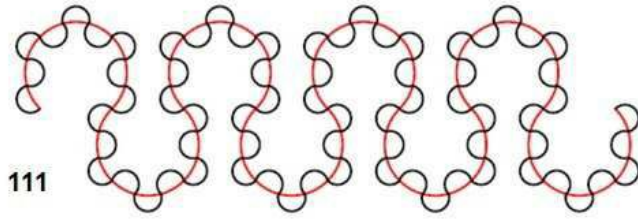
들은 본 명세서에 첨부된 청구항들에 의해 규정되는 본발명의 권리범위 안에 포함되는 것으로 간주된다.

도면

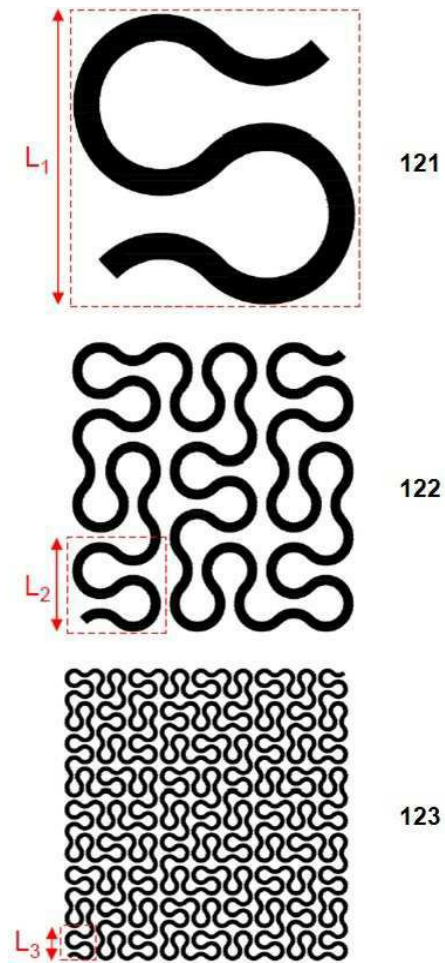
도면1a



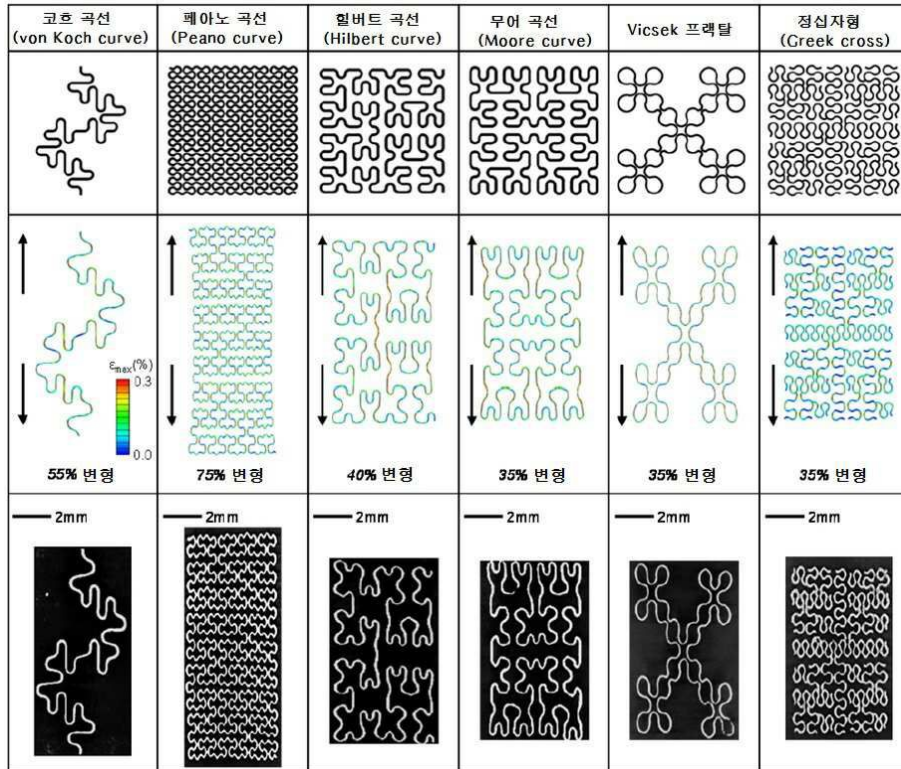
도면1b



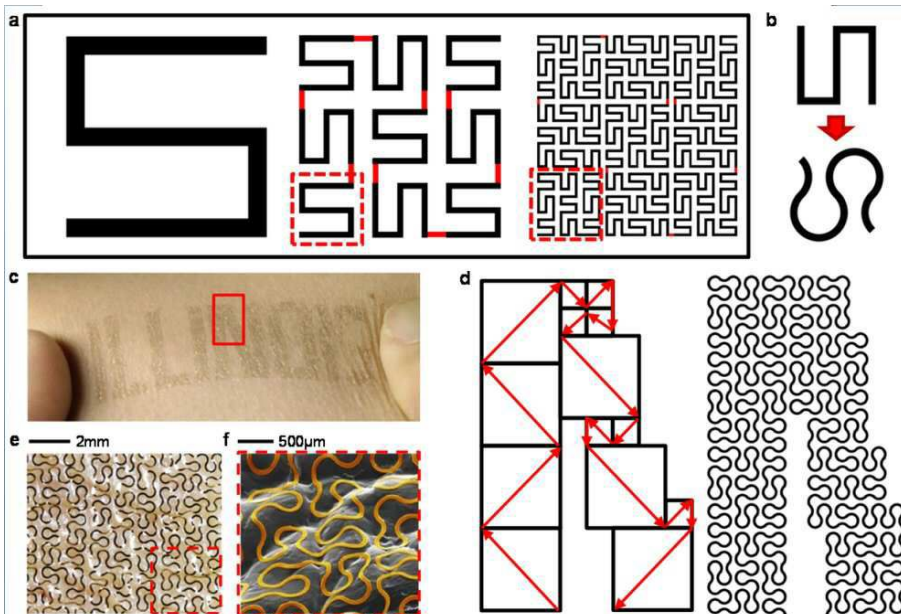
도면1c



도면2



도면3

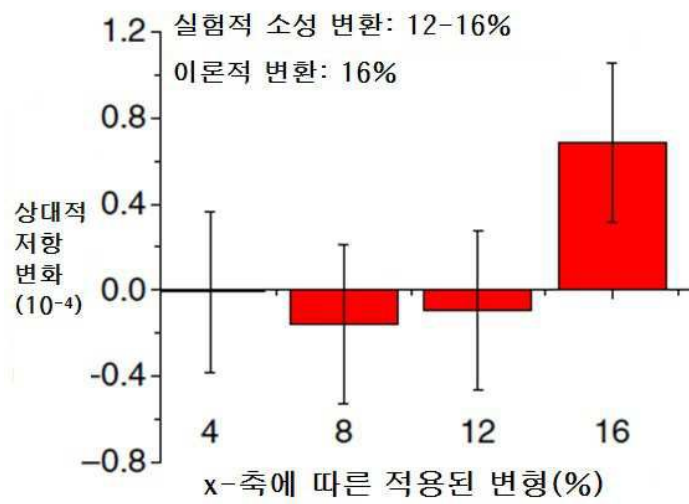


도면4a



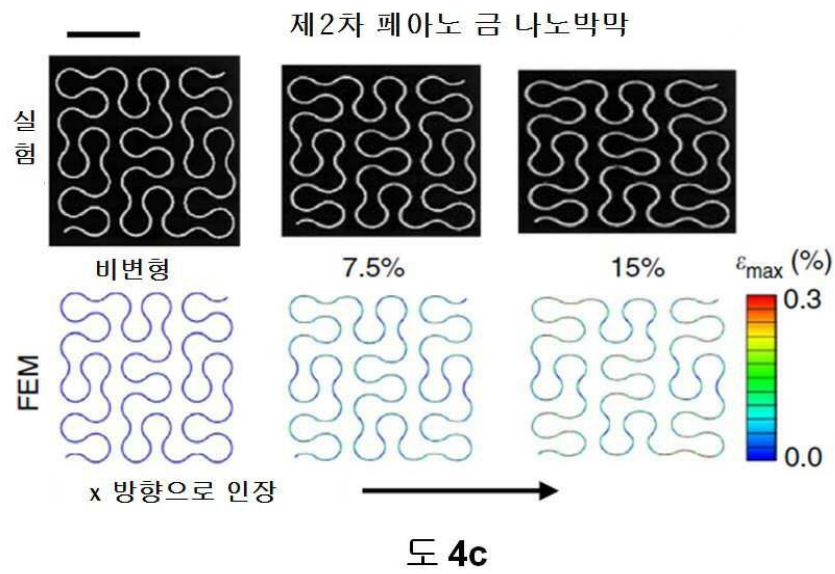
도 4a

도면4b

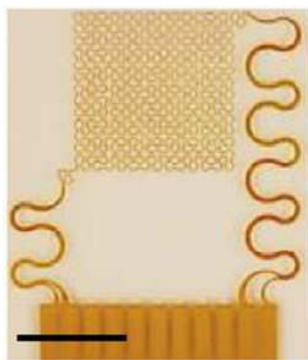


도 4b

도면4c

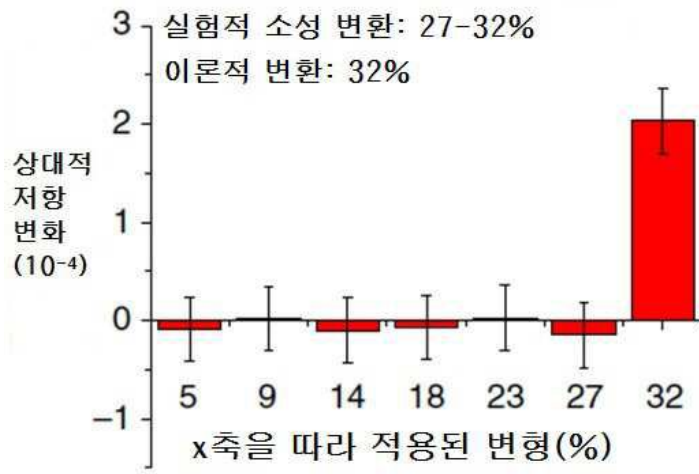


도면4d



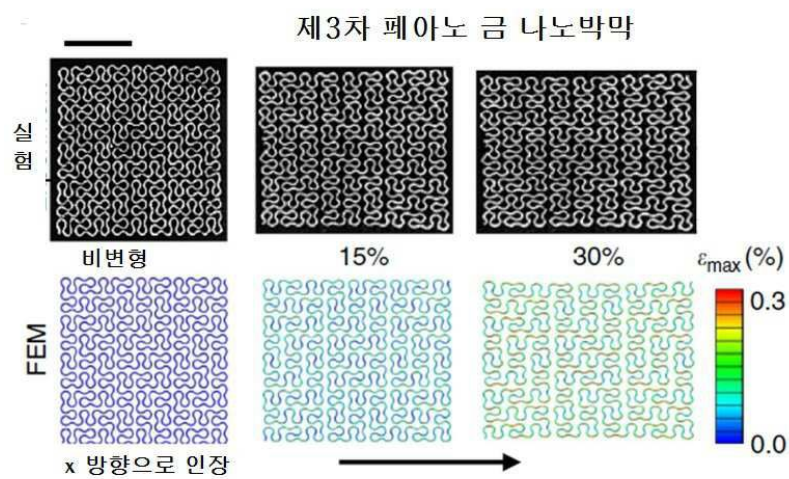
도 4d

도면4e



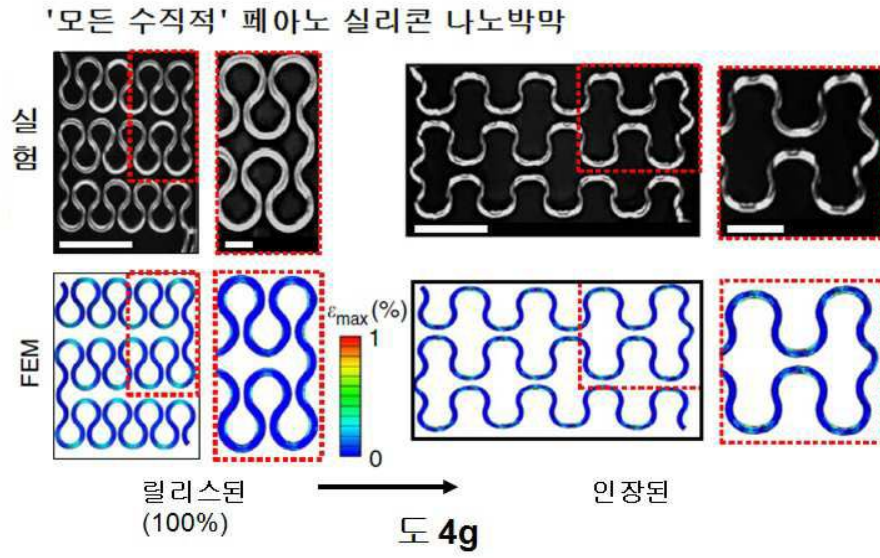
도 4e

도면4f

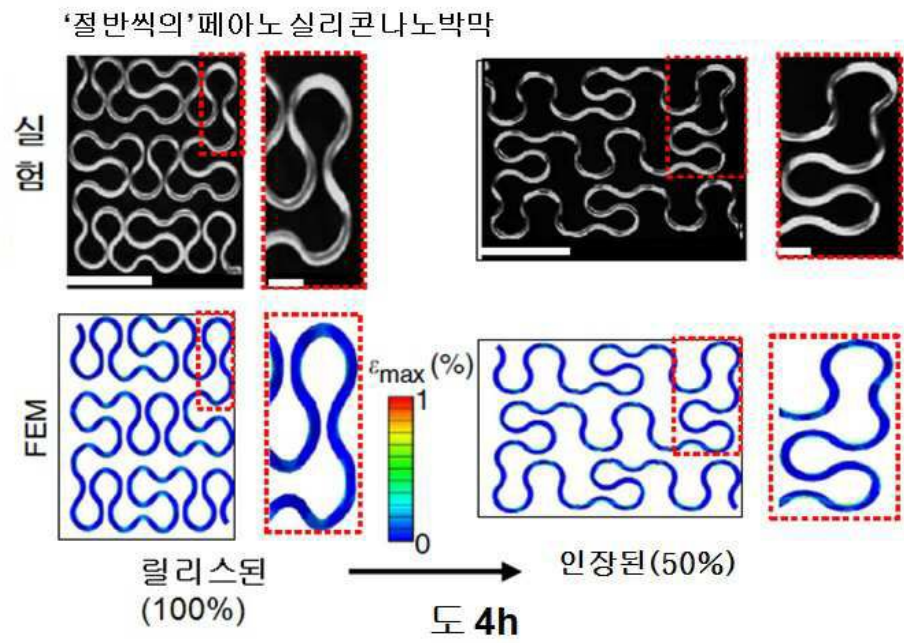


도 4f

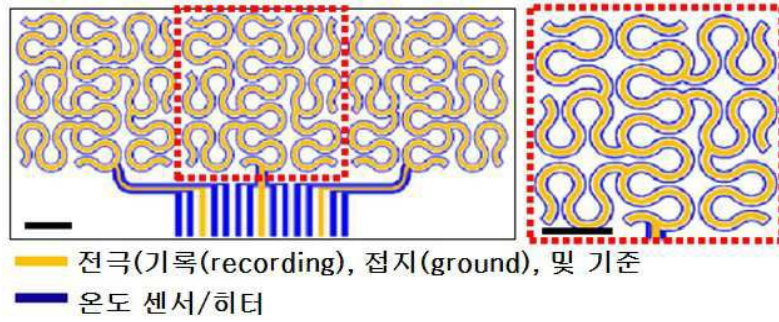
도면4g



도면4h

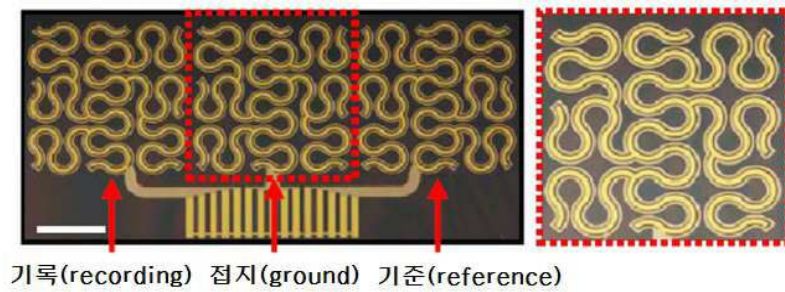


도면5a



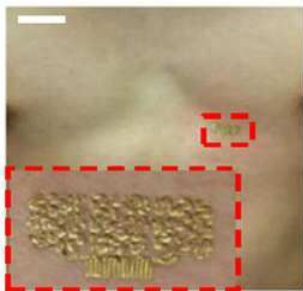
도 5a

도면5b



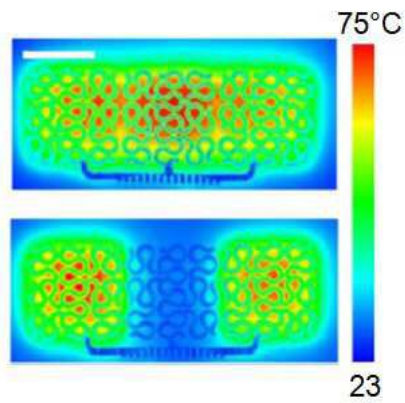
도 5b

도면5c



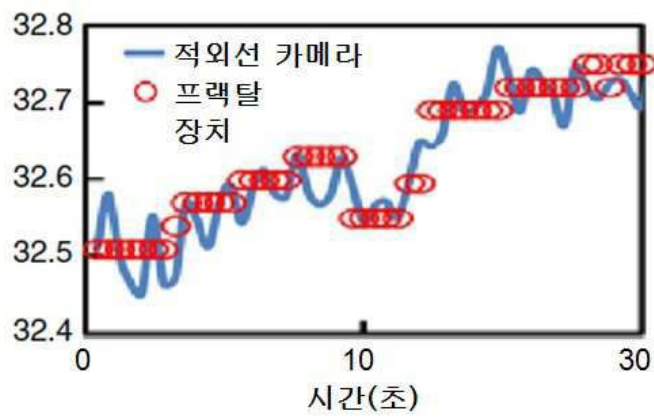
도 5c

도면5d



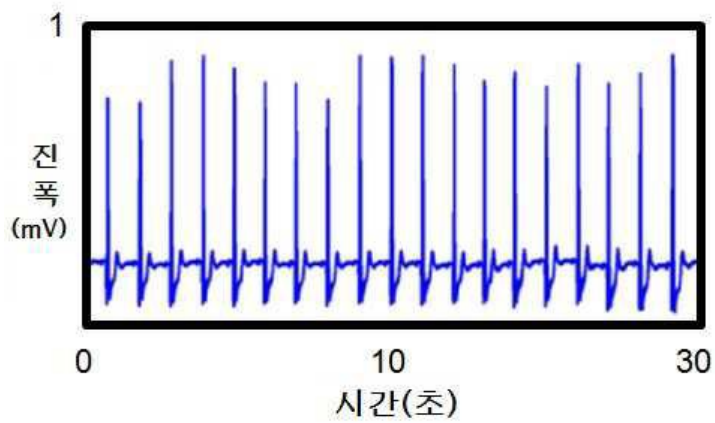
도 5d

도면5e



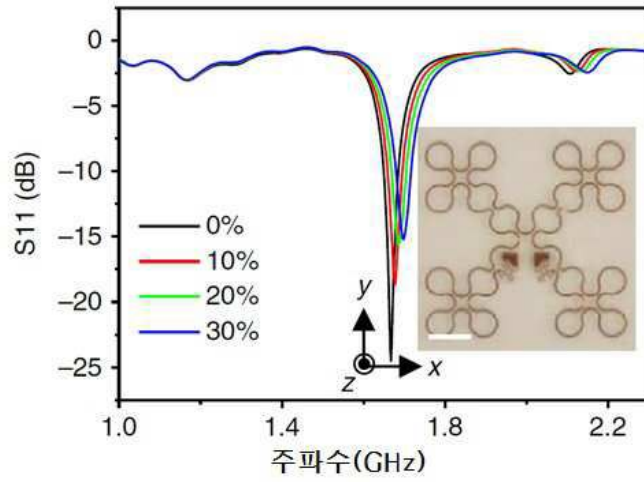
도 5e

도면5f



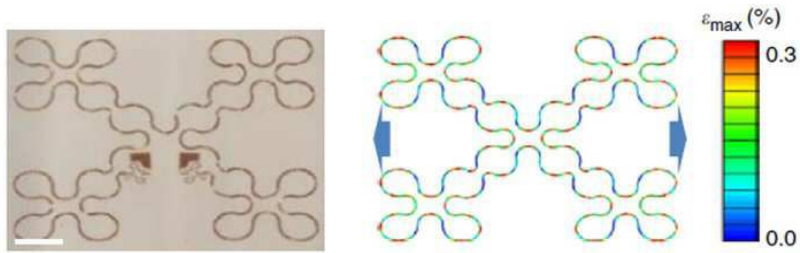
도 5f

도면6a



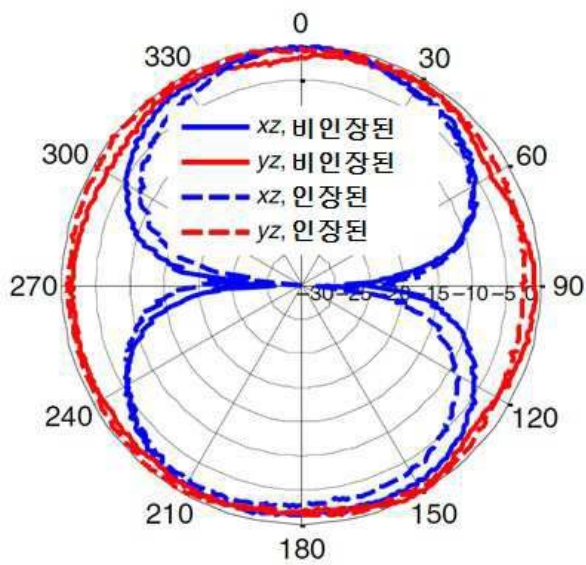
도 6a

도면6b



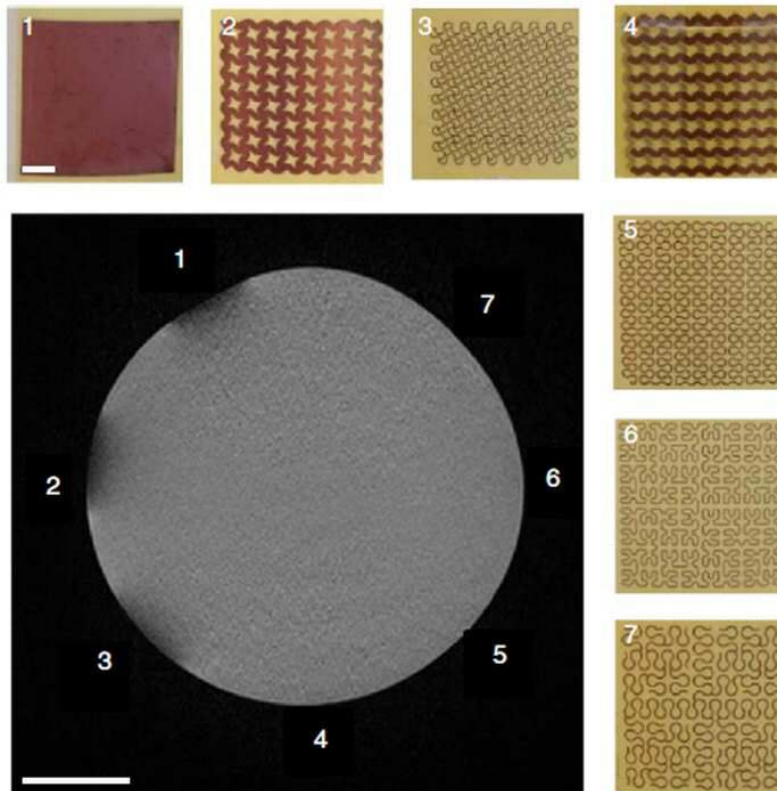
도 6b

도면6c



도 6c

도면6d

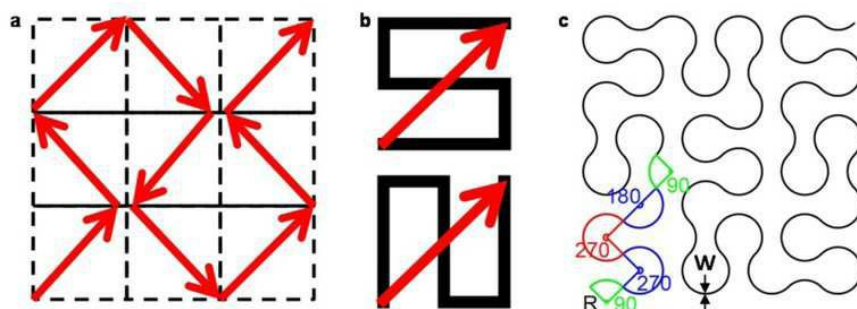


도 6d

도면7



도면8

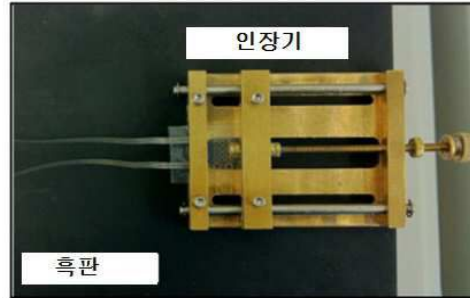


도면9

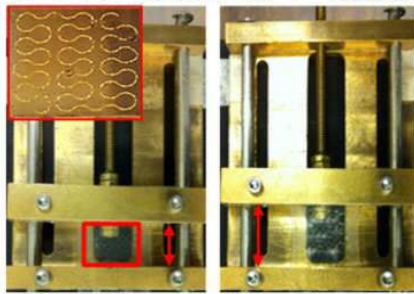
a 실험 설치



b 인장기 위 장치



c. 주기적 로딩(loading)/언로딩(unloading) d 탄성-소성 변형 스트레인

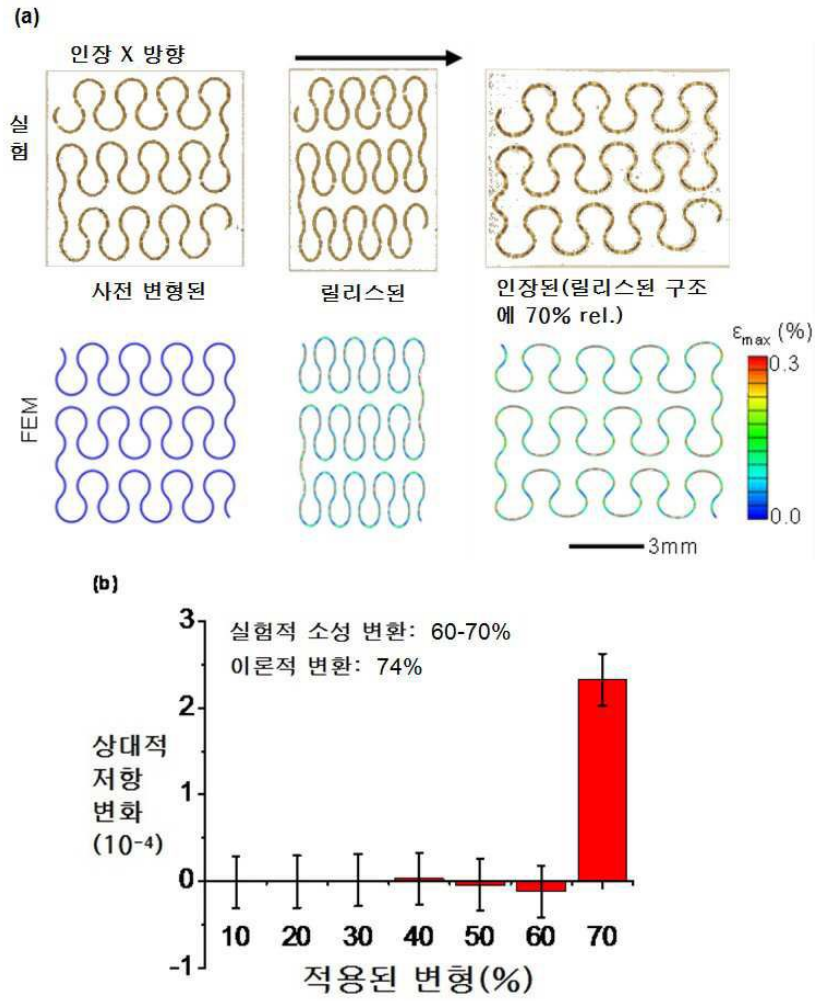


언로딩(unloading)

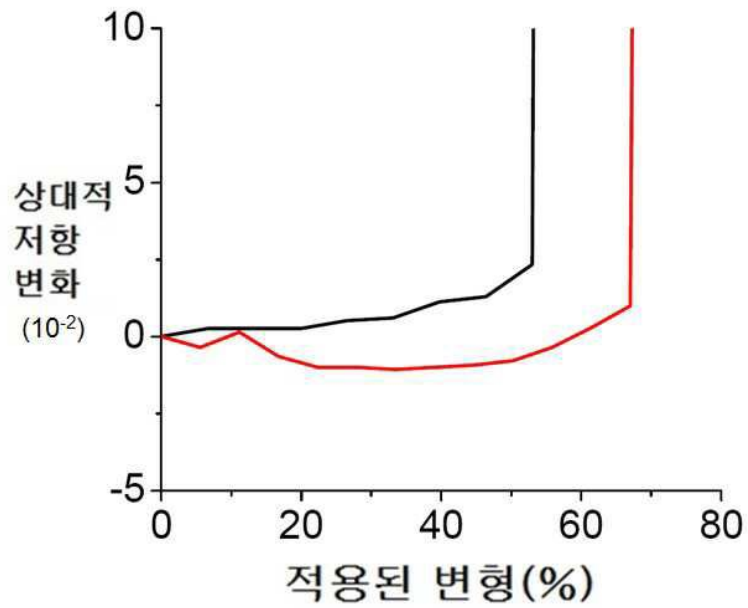
로딩(loading)

	실험	이론
제 2차(x)	16-20%	16%
제 2차(y)	12-16%	13%
제 3차(x)	27-32%	32%
제 3차(y)	27-32%	28%

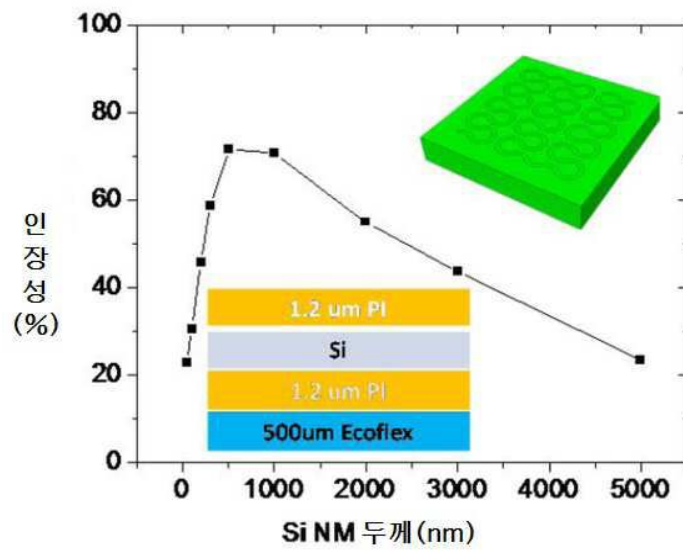
도면10



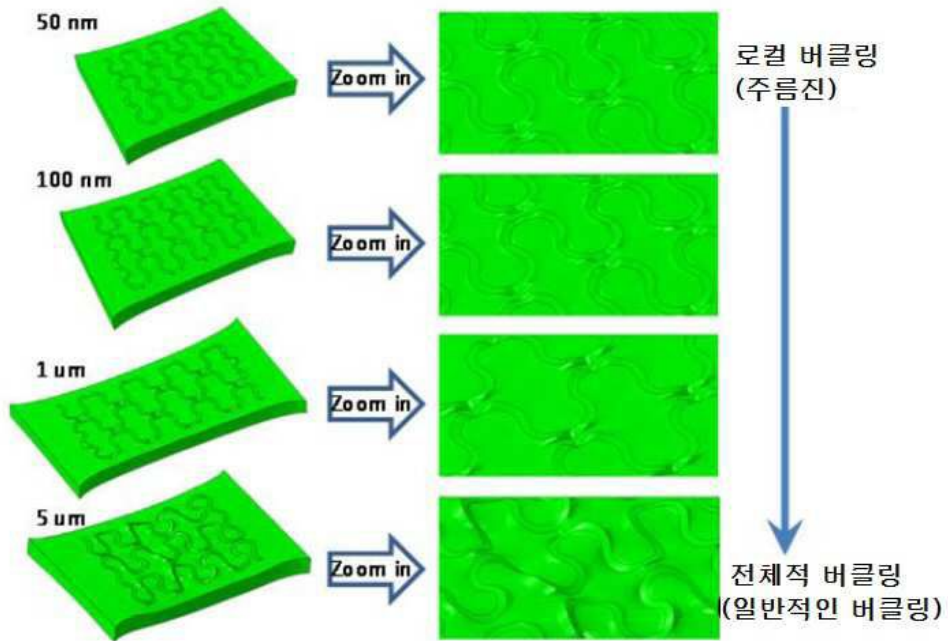
도면11



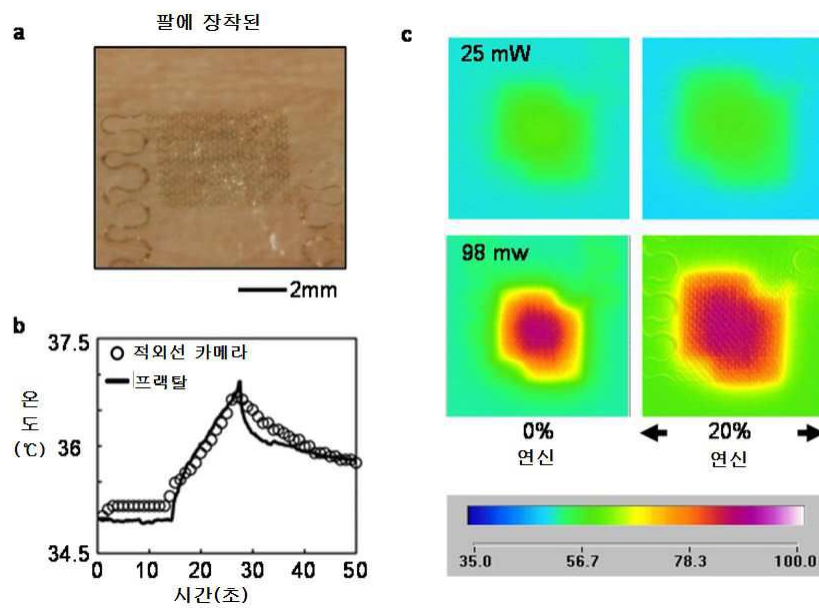
도면12a



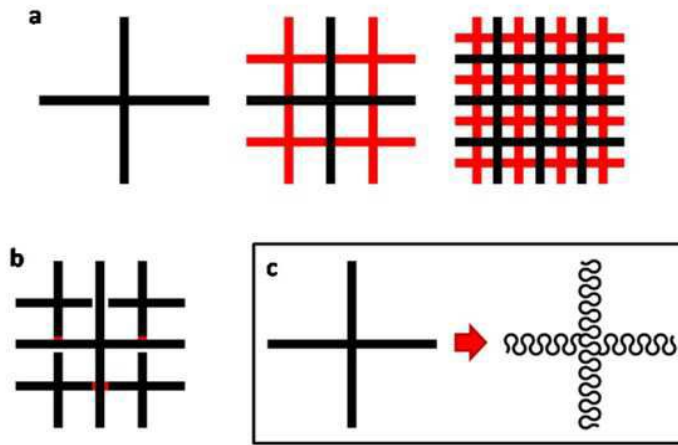
도면12b



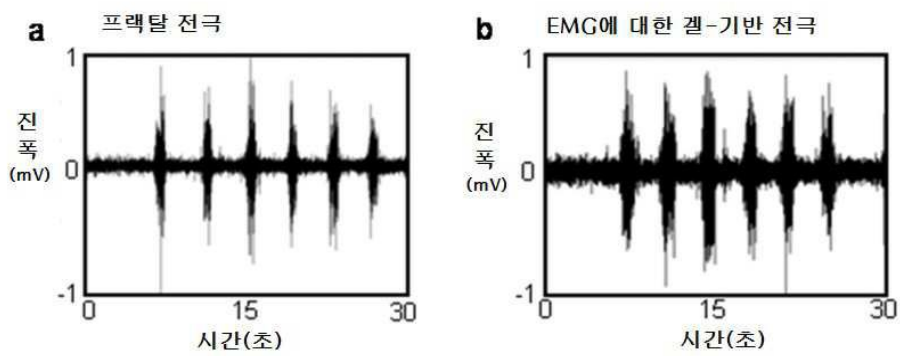
도면13



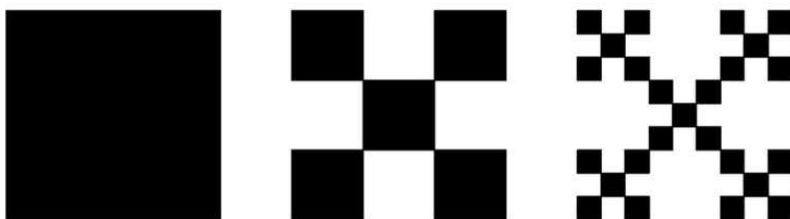
도면14



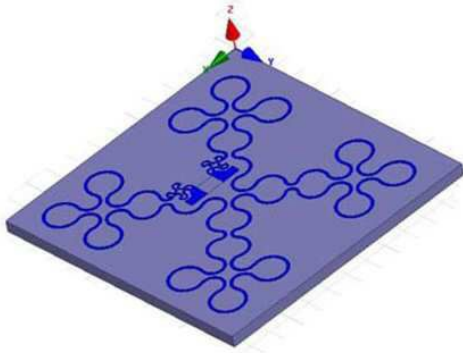
도면15



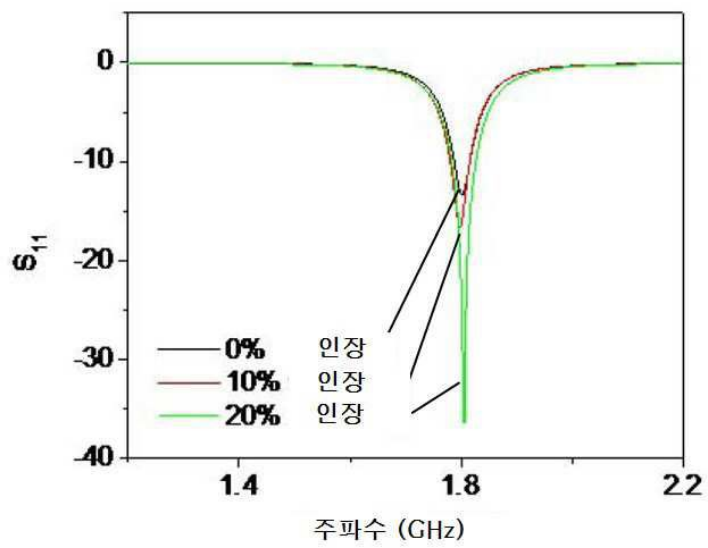
도면16



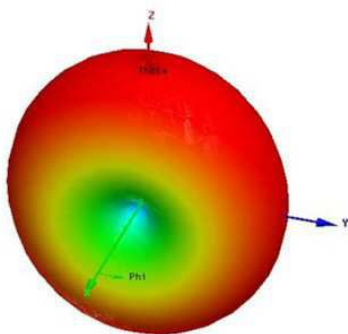
도면17a




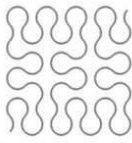
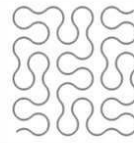
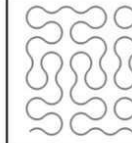
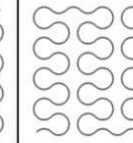
도면17b




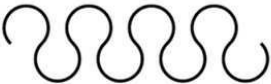




도면17c



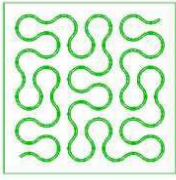
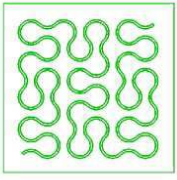
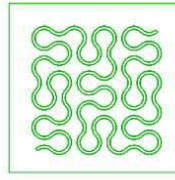
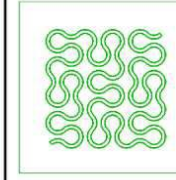
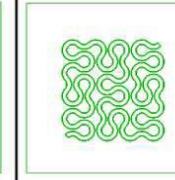
도면18

	모두 수평적인	거의 수평적인	절반씩의	거의 수직적인	모두 수직적인
구조					
x-축	31%	16%	16%	11%	9%
y-축	9%	12%	13%	14%	33%

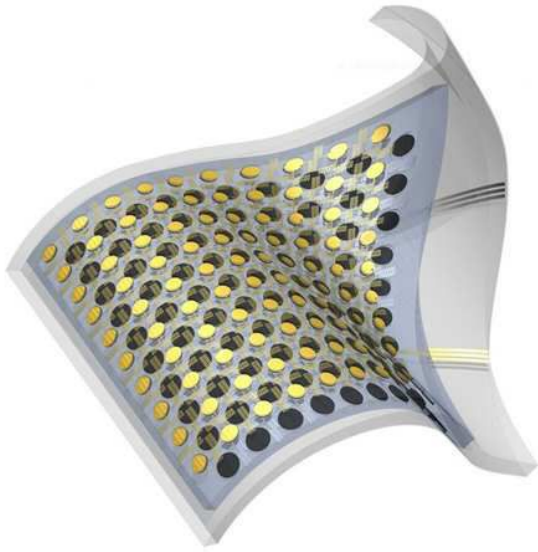
도면19

서펜타인 패턴	아크 각도 	탄성 인장성
	270°	61%
	235°	60%
	180°	36%
	135°	18%
	90°	6%

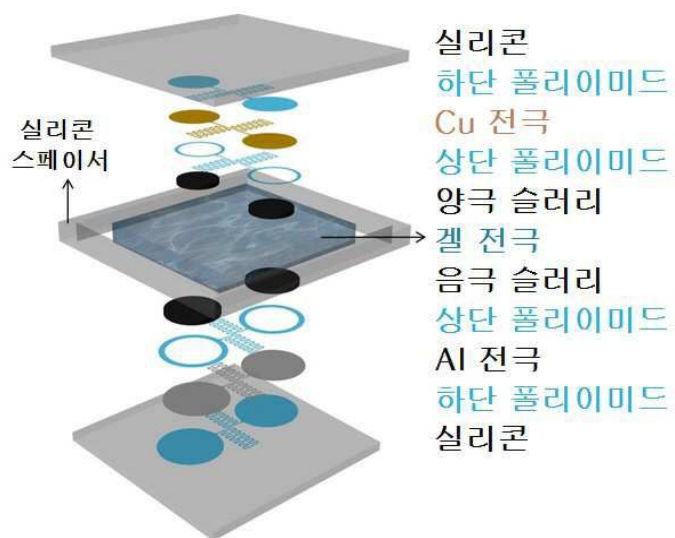
도면20

6.0 mm	4.5 mm	3.0 mm	2.3 mm	1.5 mm
				
16%	28%	24%	23%	20%

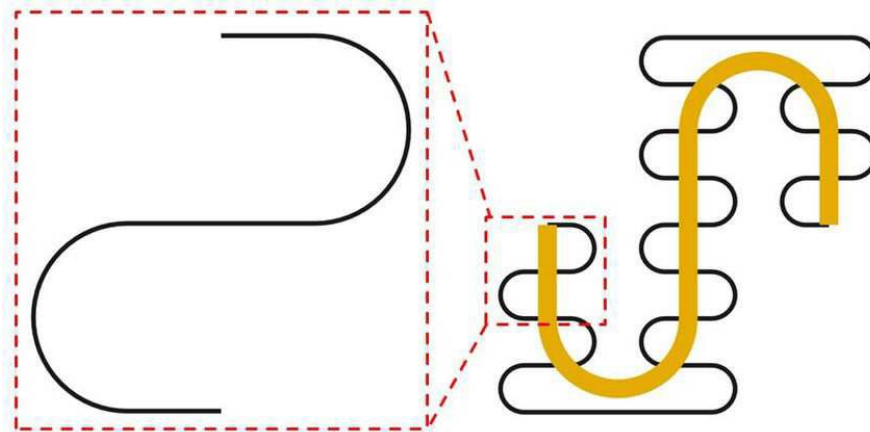
도면21a



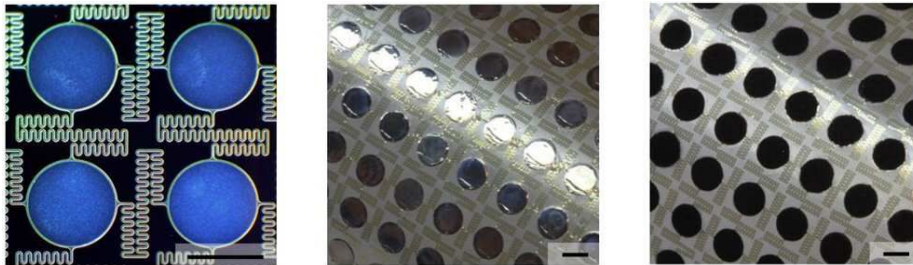
도면21b



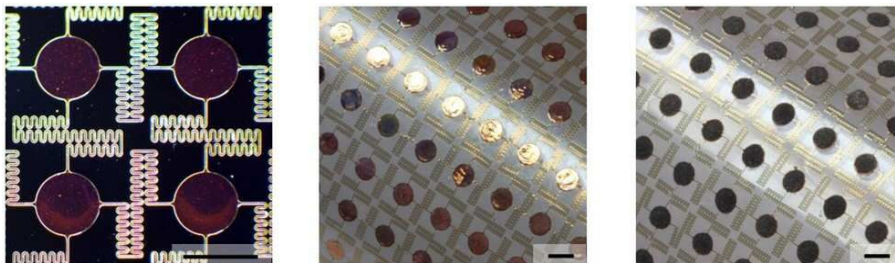
도면21c



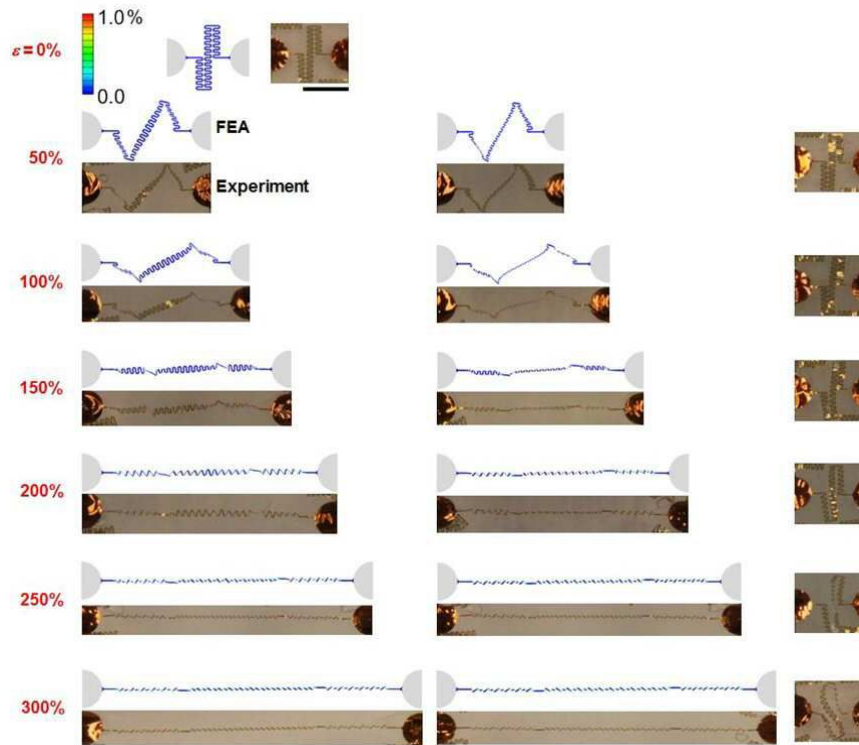
도면21d



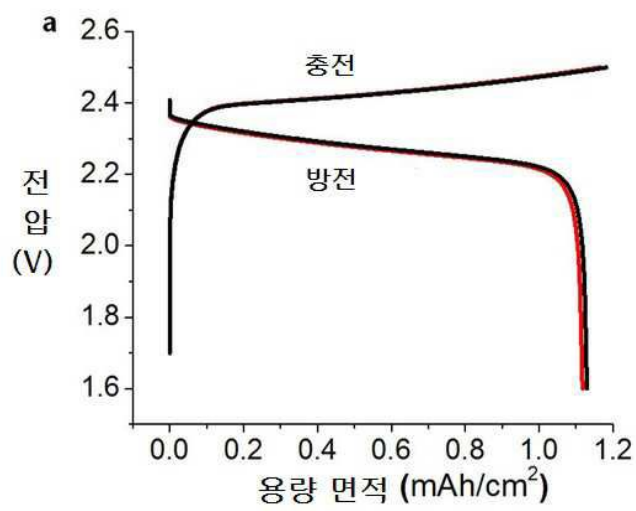
도면21e



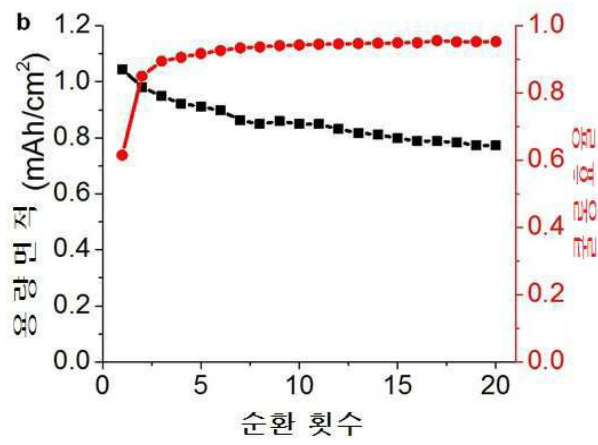
도면22



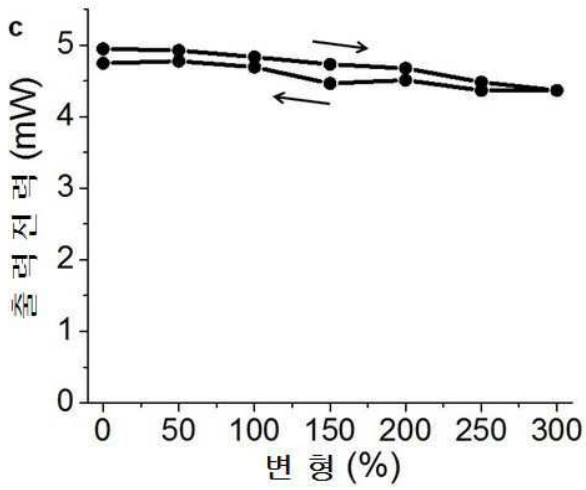
도면23a



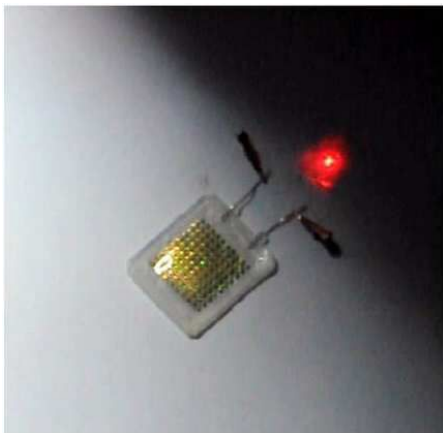
도면23b



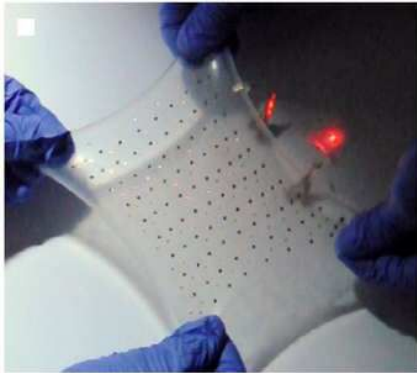
도면23c



도면23d



도면23e



도면23f



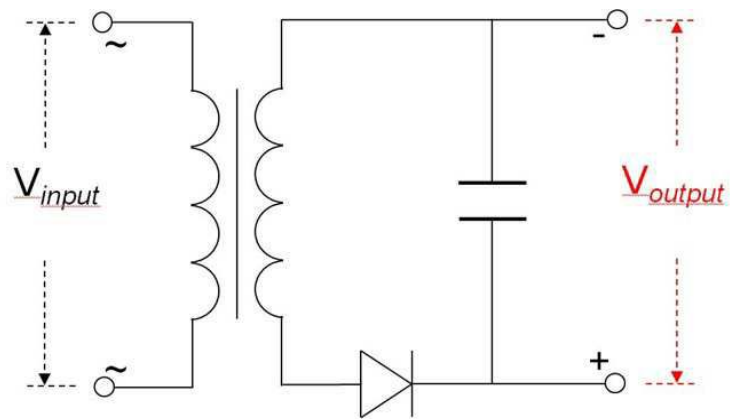
도면23g



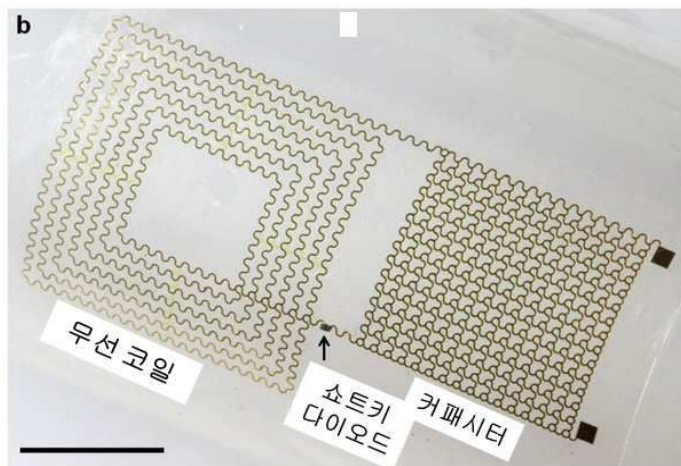
도면23h



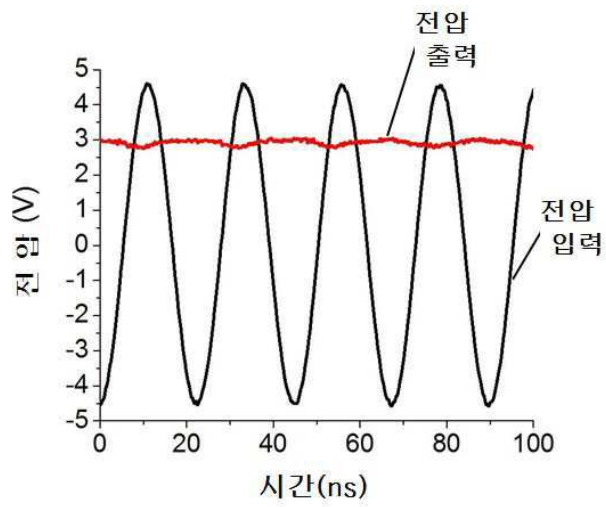
도면24a



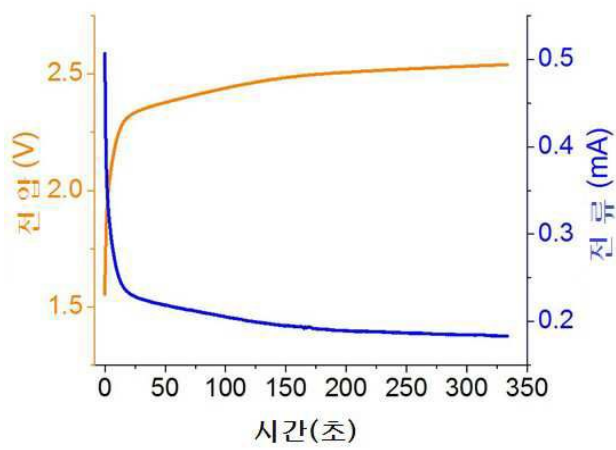
도면24b



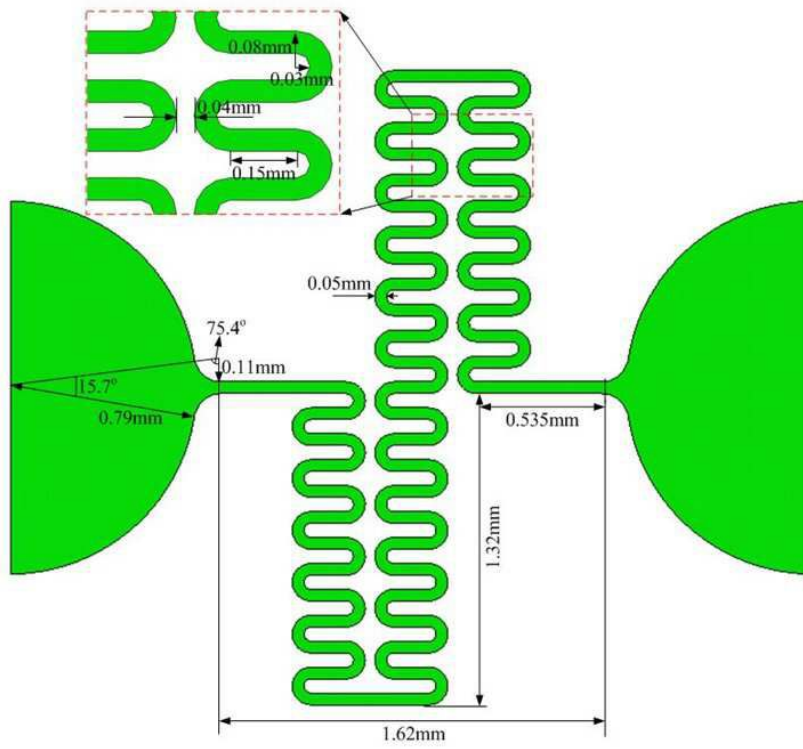
도면24c



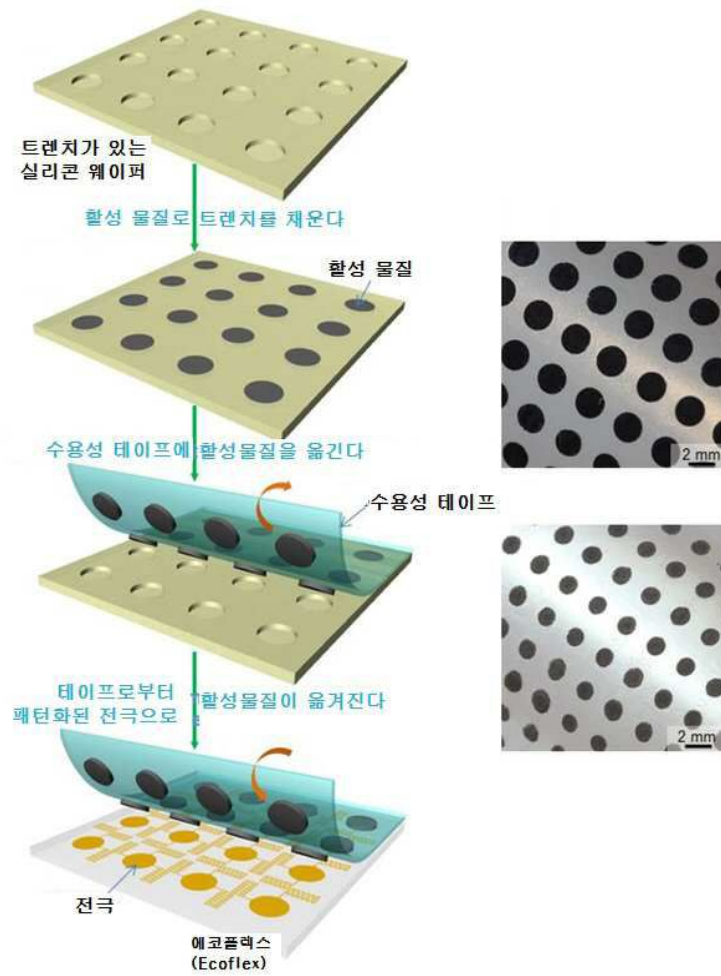
도면24d



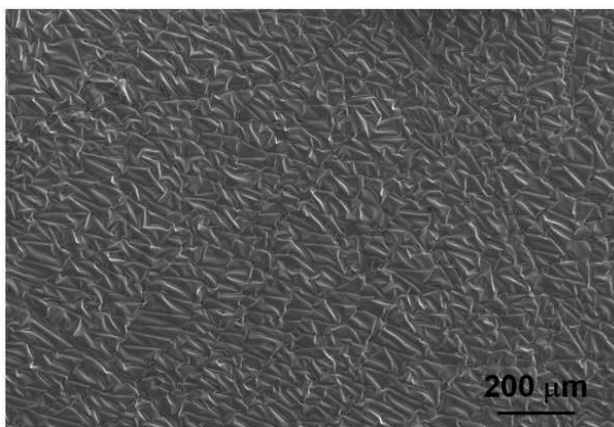
도면25



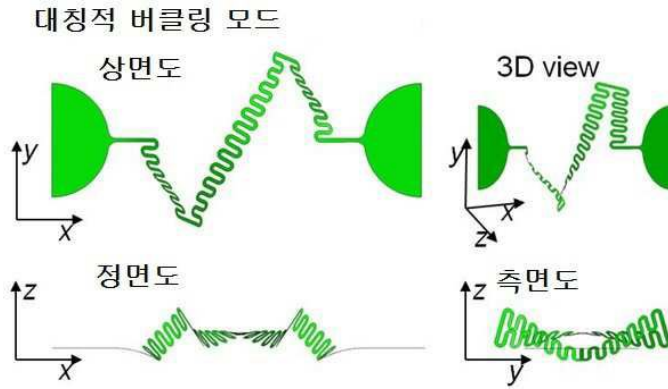
도면26



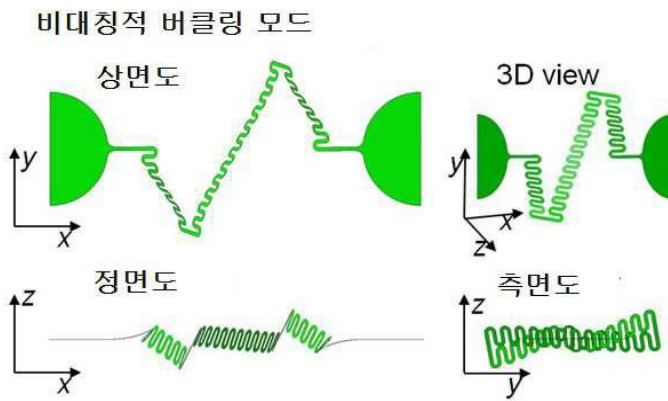
도면27



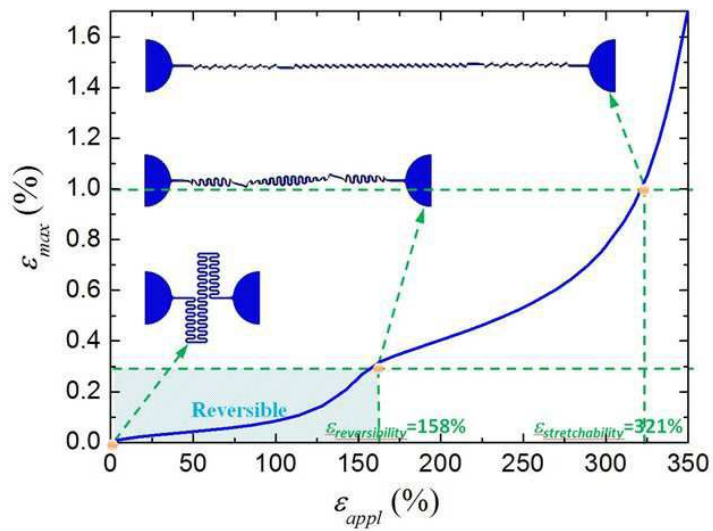
도면28a



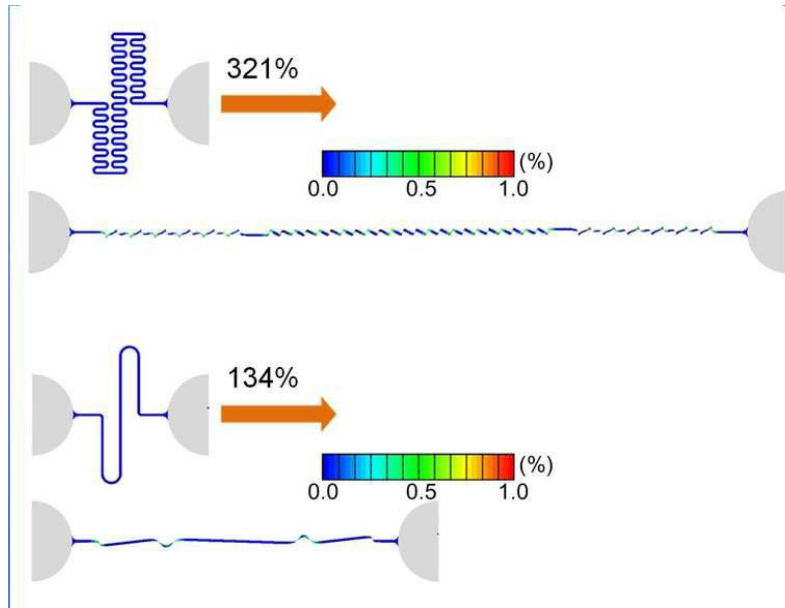
도면28b



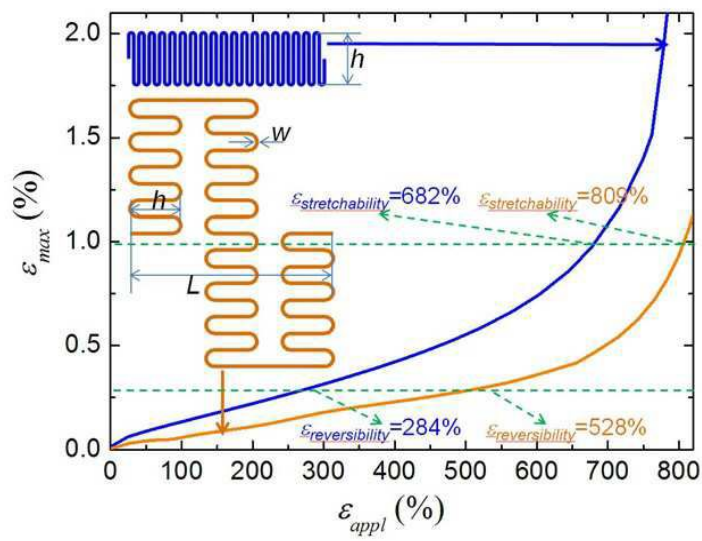
도면29



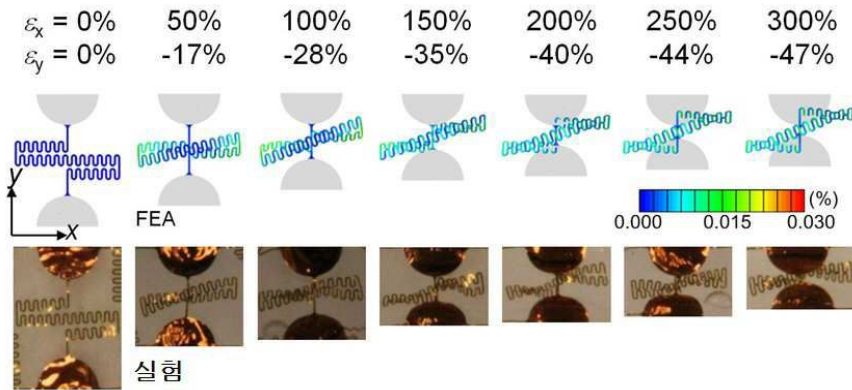
도면30



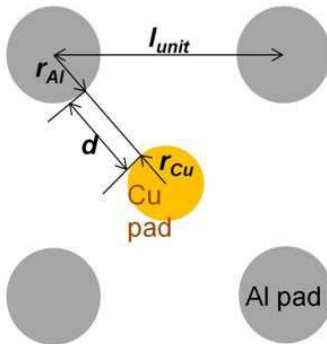
도면31



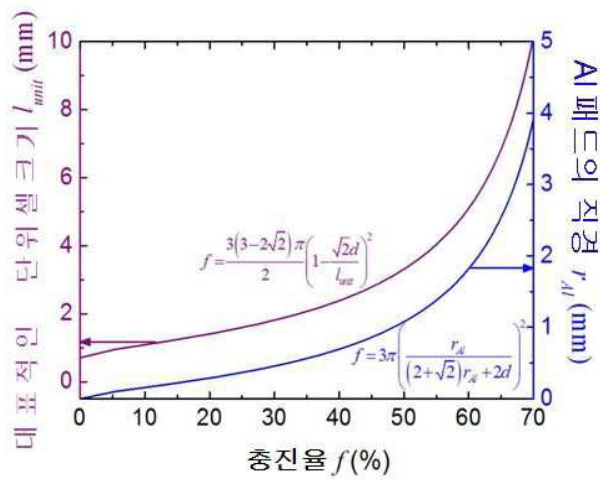
도면32



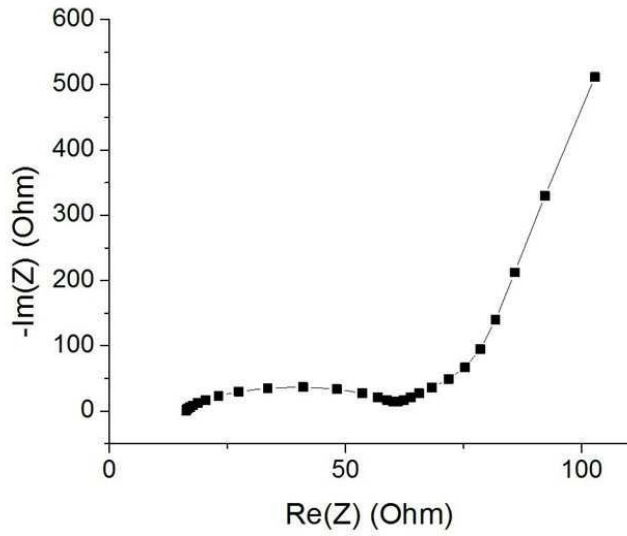
도면33a



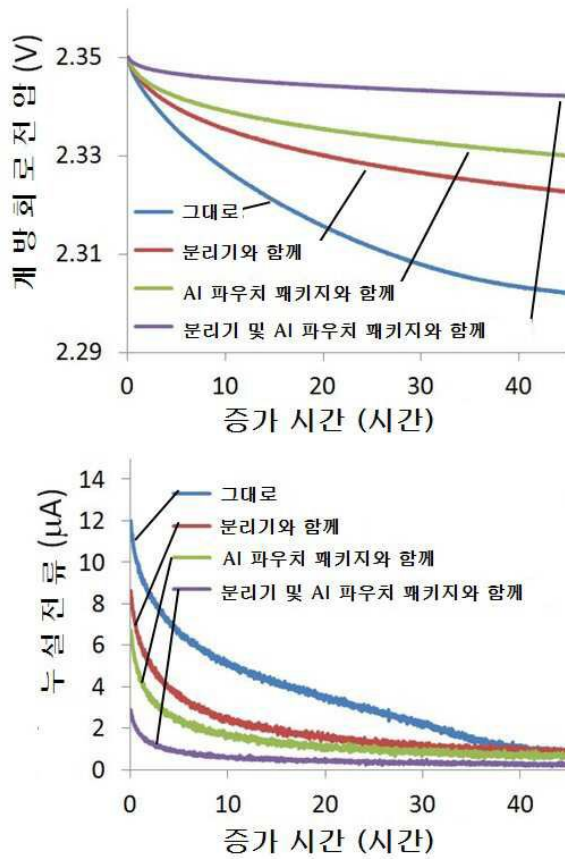
도면33b



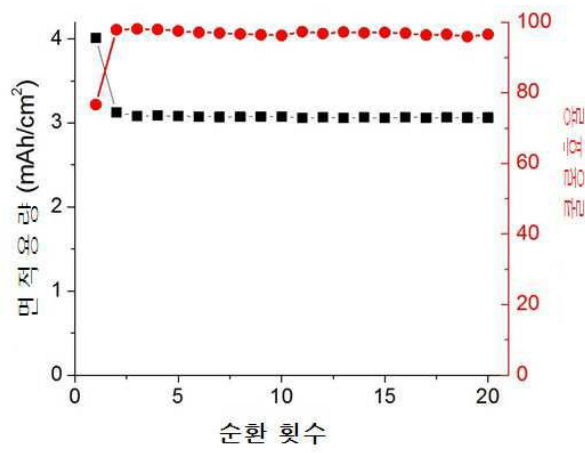
도면34



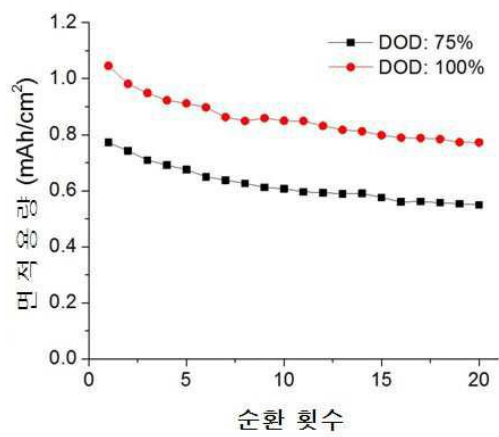
도면35



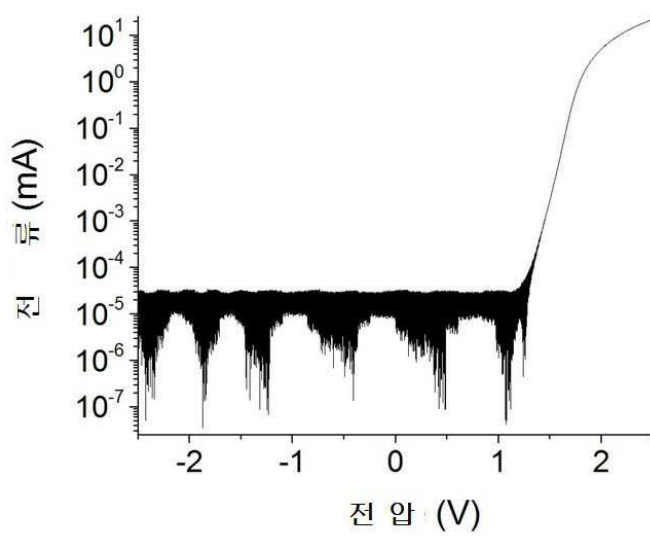
도면36



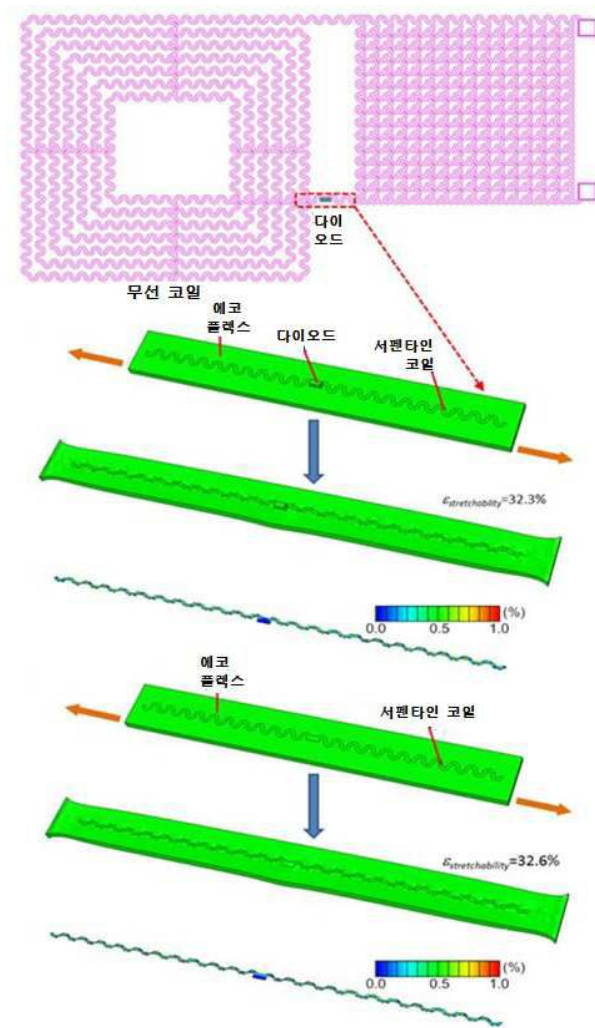
도면37



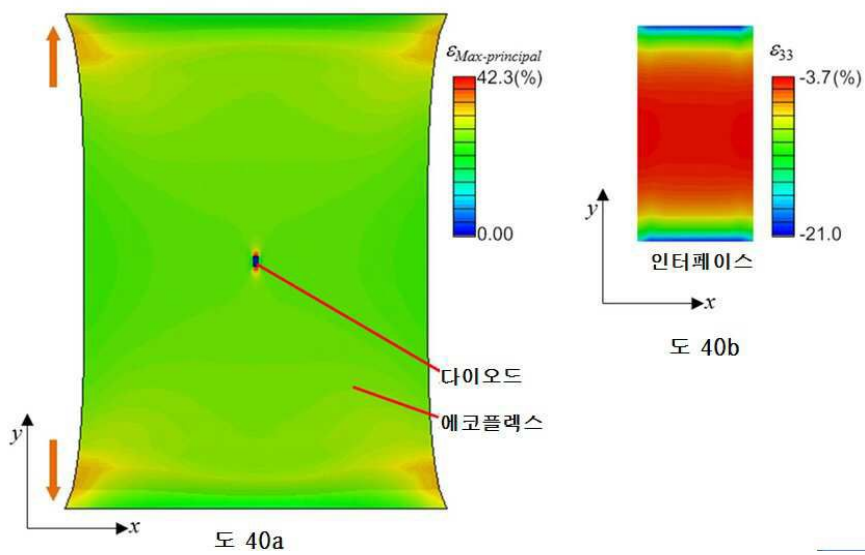
도면38



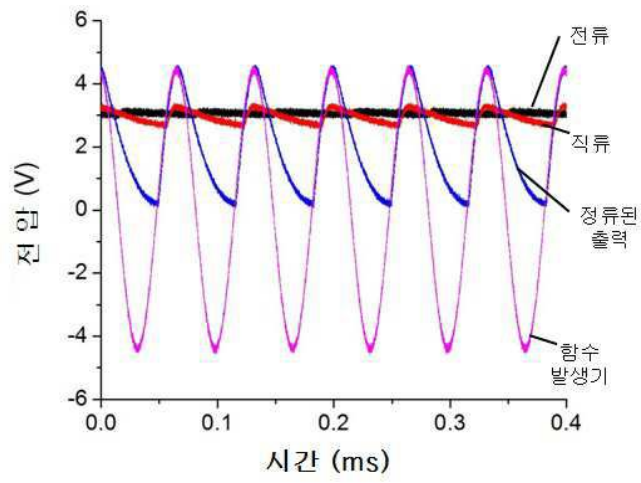
도면39



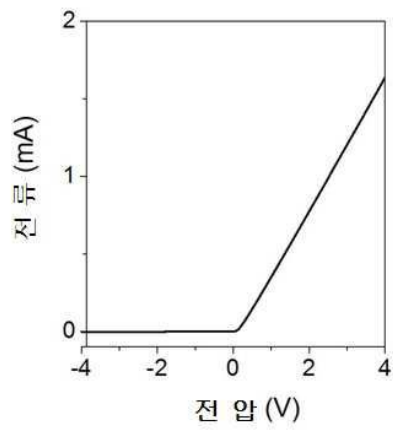
도면40



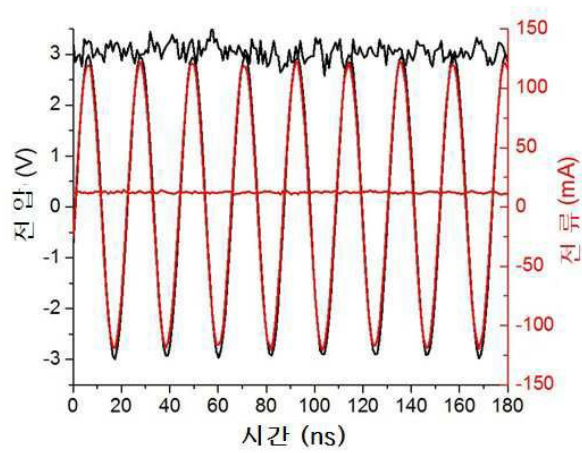
도면41



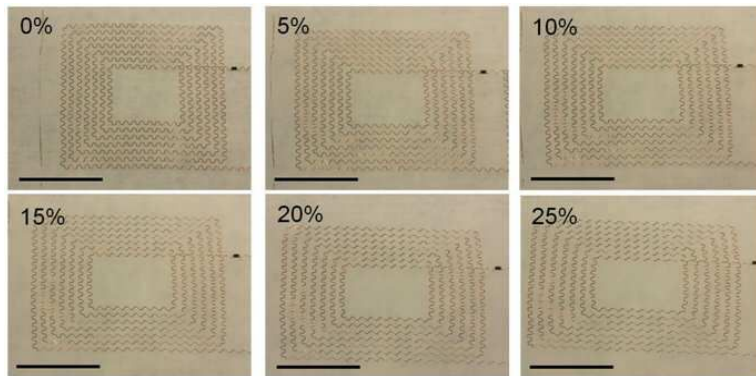
도면42



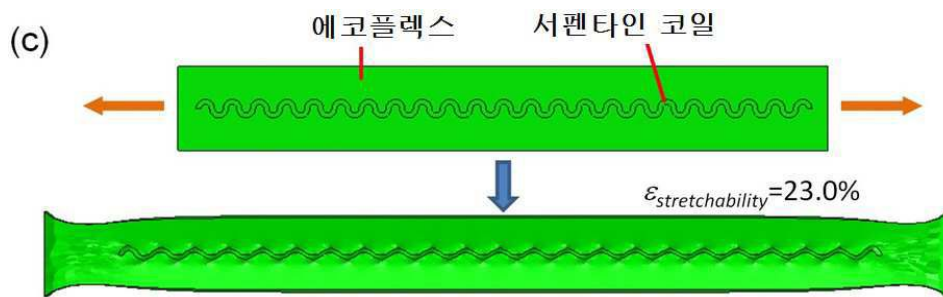
도면43a



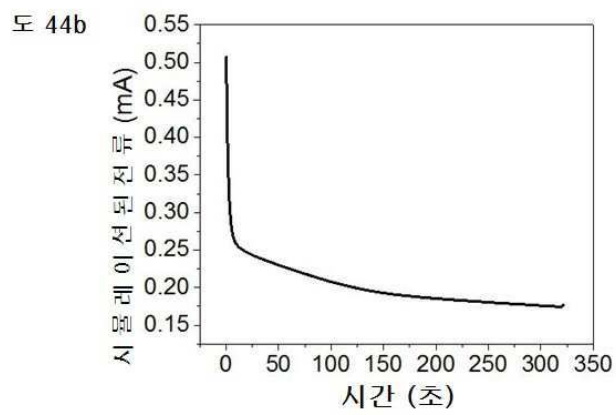
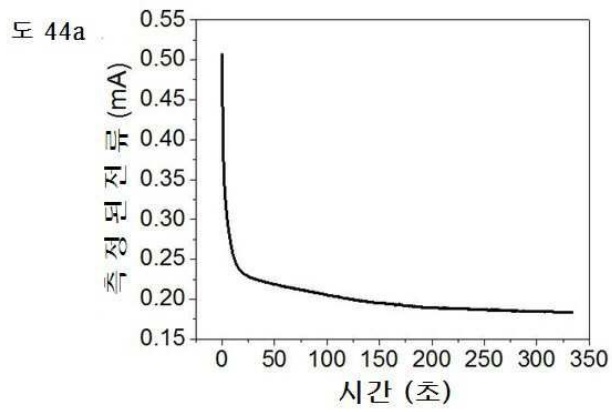
도면43b



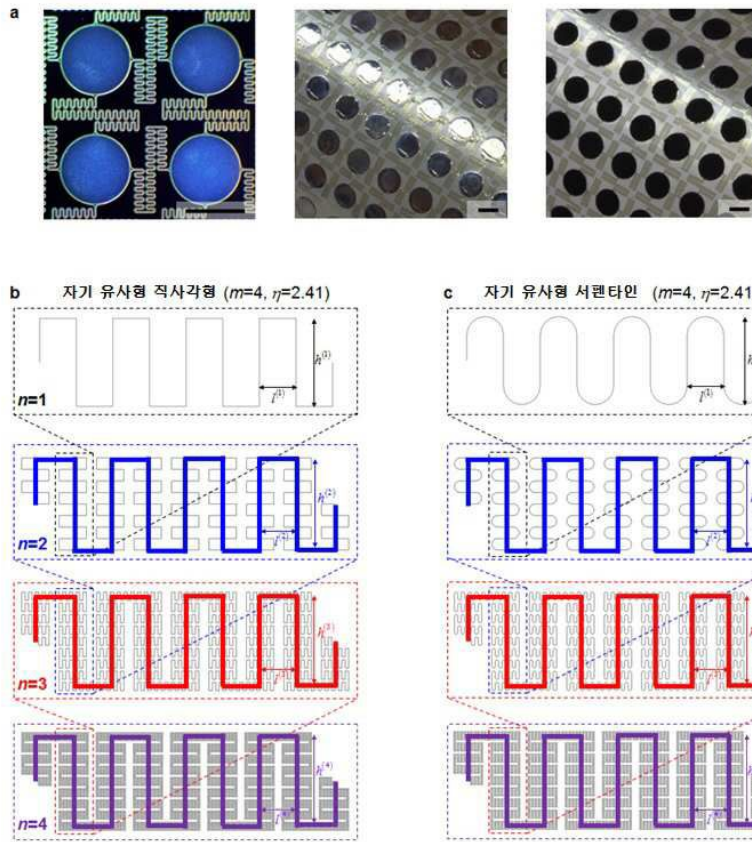
도면43c



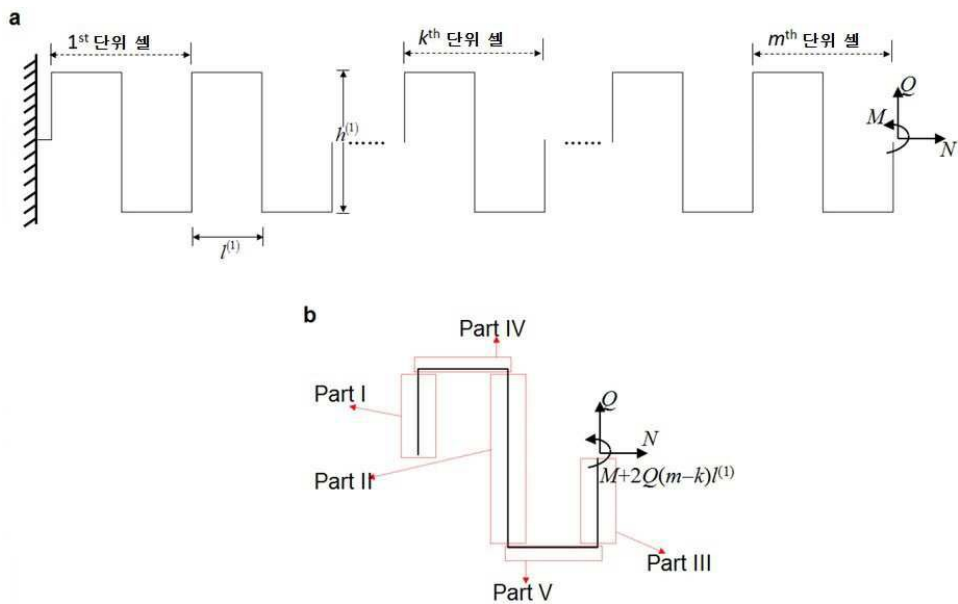
도면44



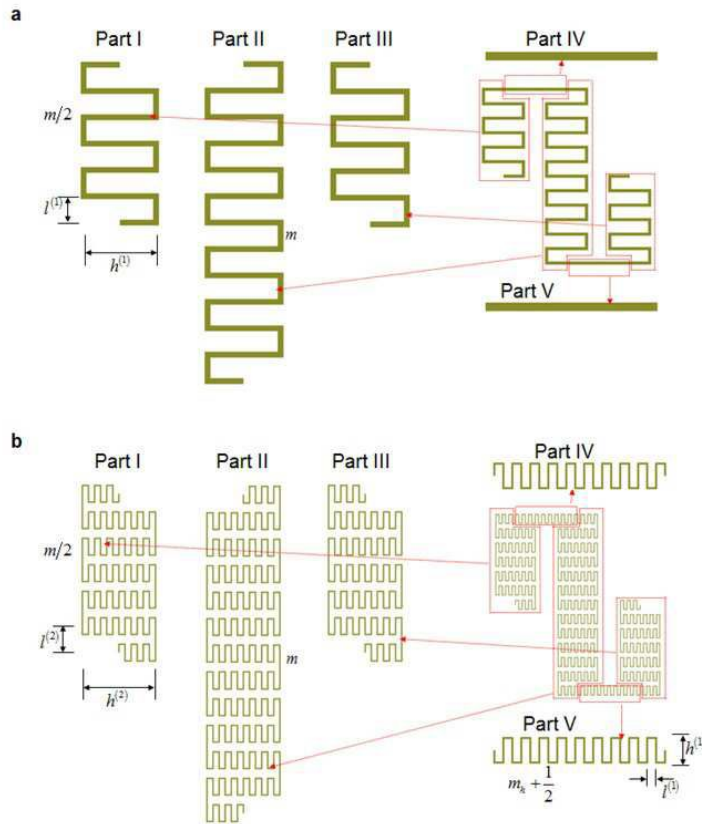
도면45



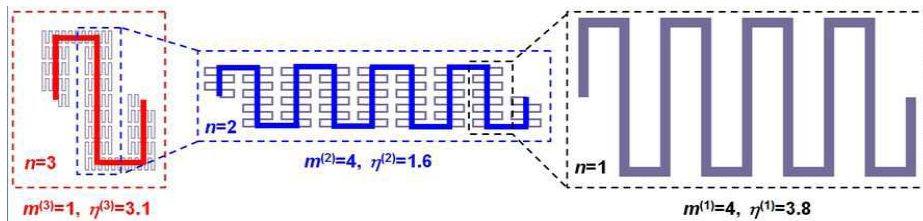
도면46



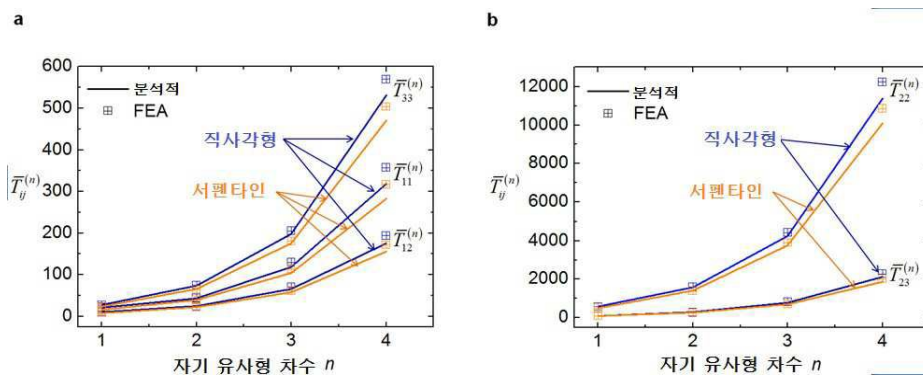
도면47



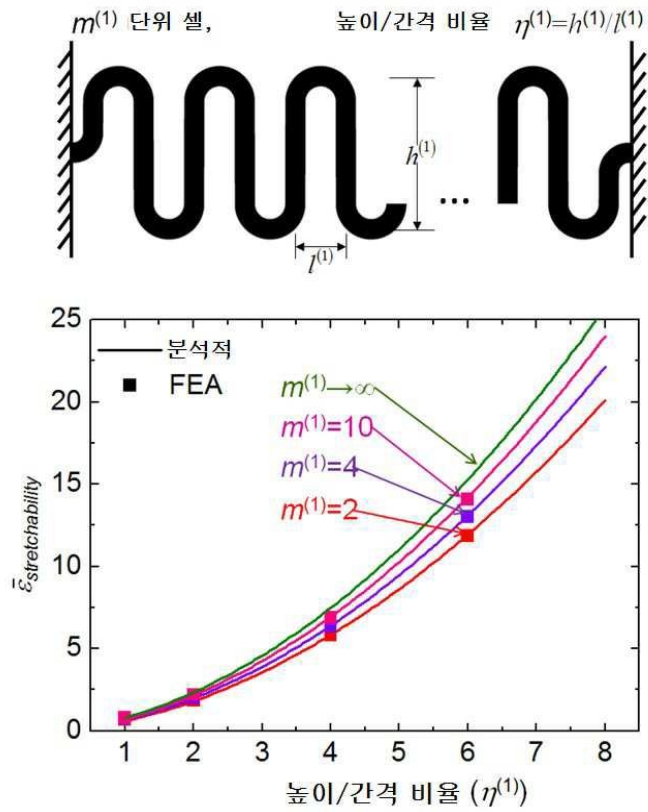
도면48



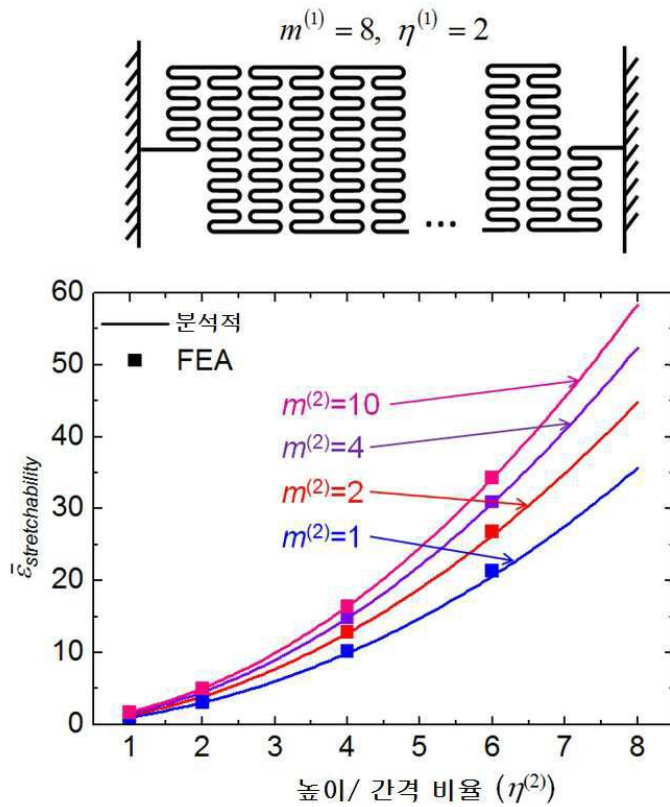
도면49



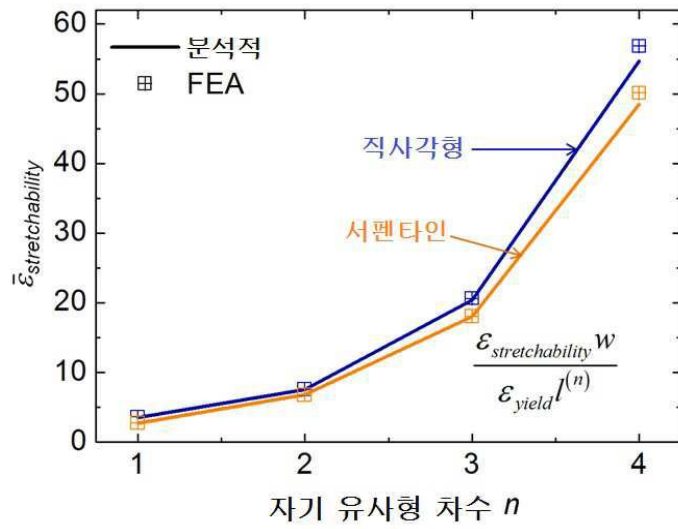
도면50



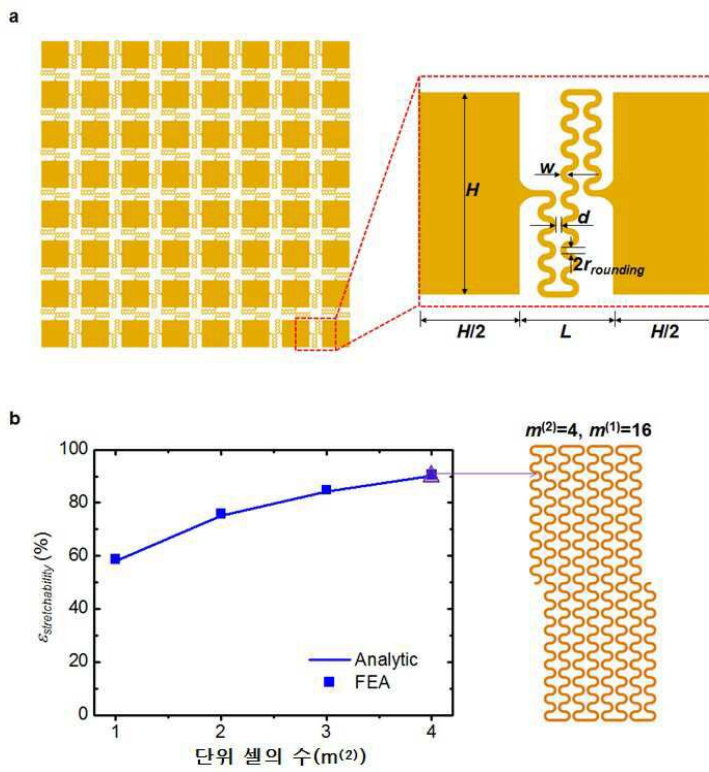
도면51



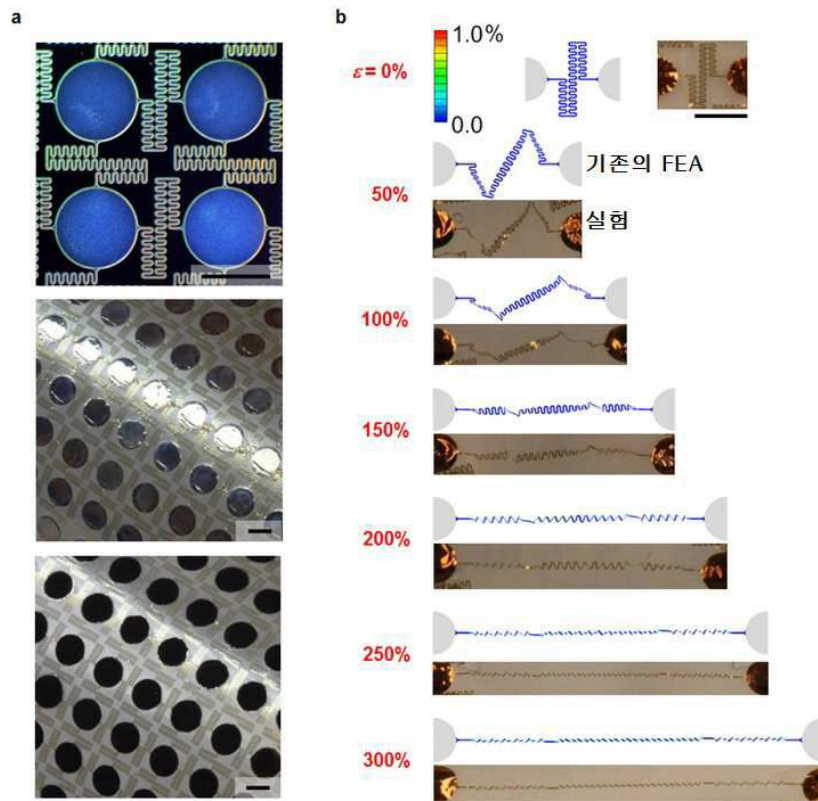
도면52



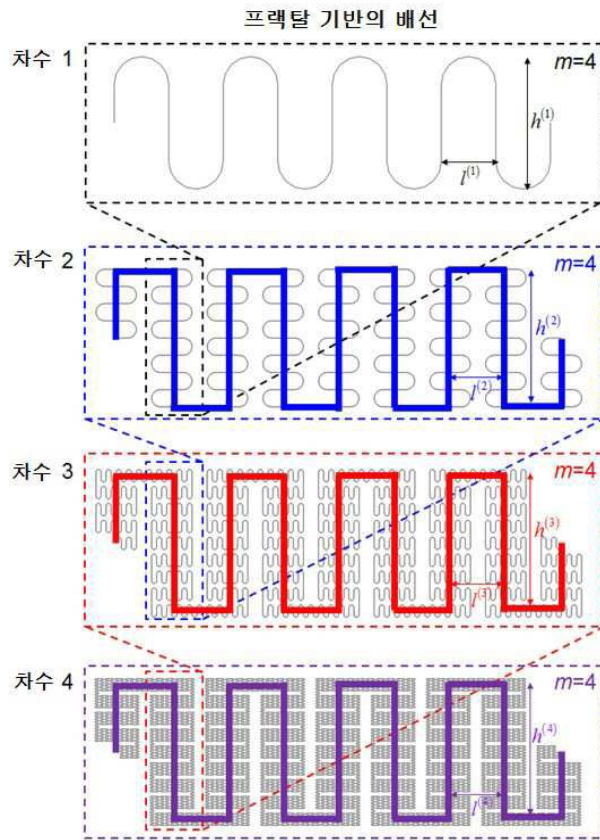
도면53



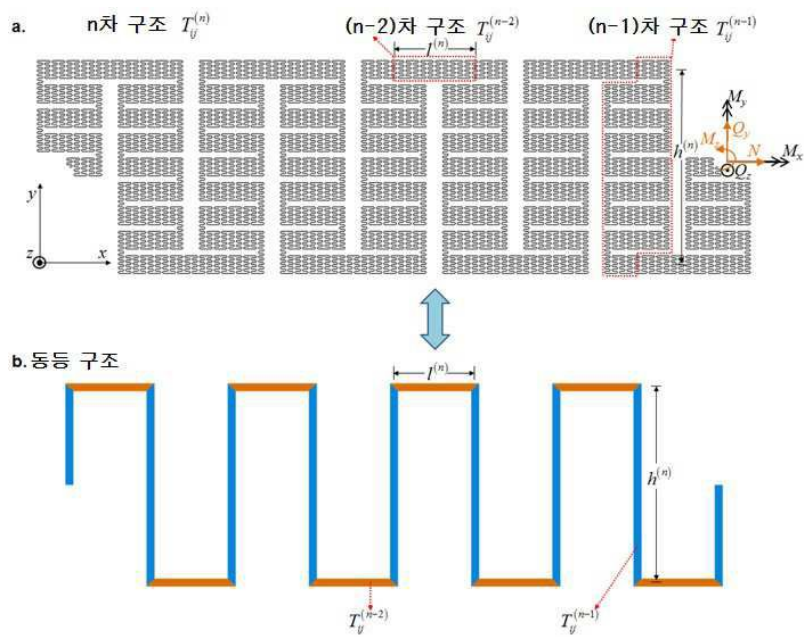
도면54



도면55



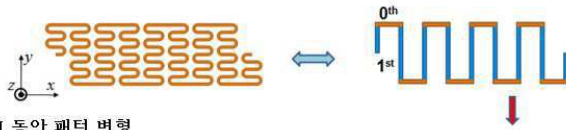
도면56



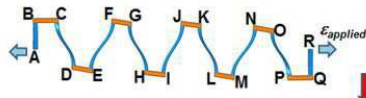
도면57

a. Stage I : 제2차 배선의 풀어짐

(i) 제2차 프랙탈 배선에 대한 수직 빔의 등등 구조



(ii) stage I 동안 패턴 변형

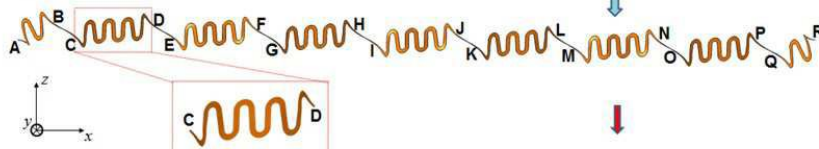


(iii) stage I 의 종료 :



b. Stage II : 각 제1차 배선의 풀어짐

(i) 완전히 풀어진 제2차 배선으로부터 제1차 배선을 얻는다



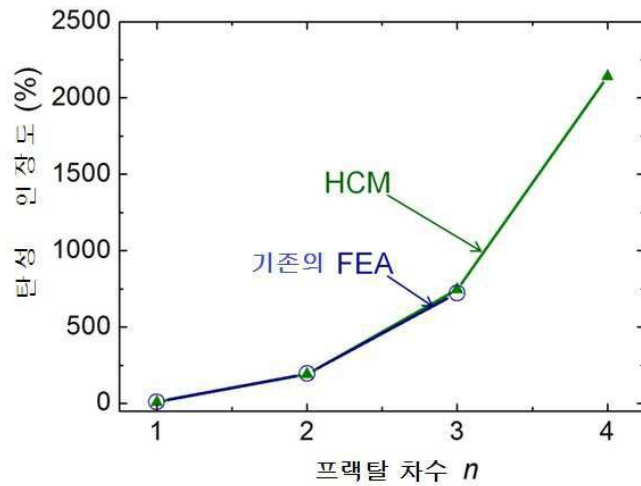
(ii) stage II 동안 패턴의 변형



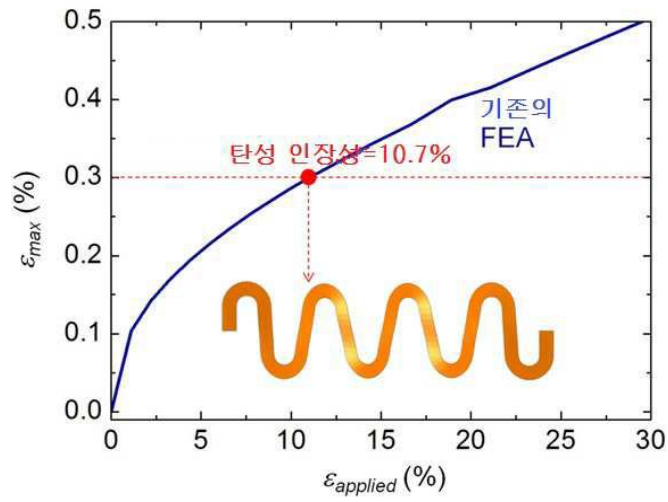
(iii) stage II 의 종료 :



도면58

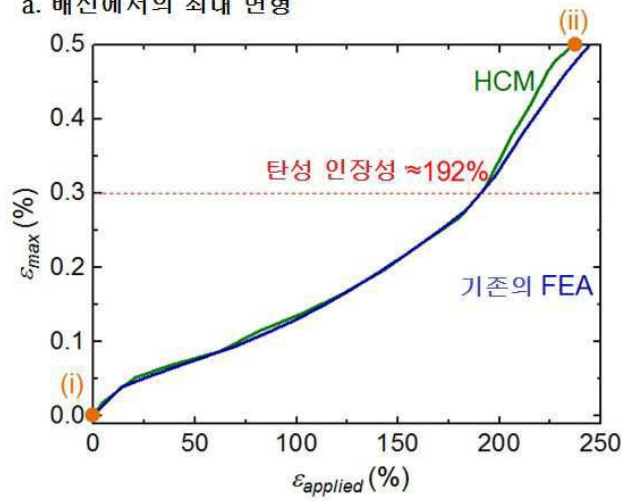


도면59



도면60

a. 배선에서의 최대 변형

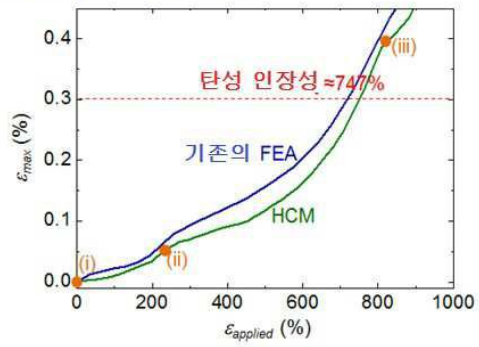


b. 구조의 진화

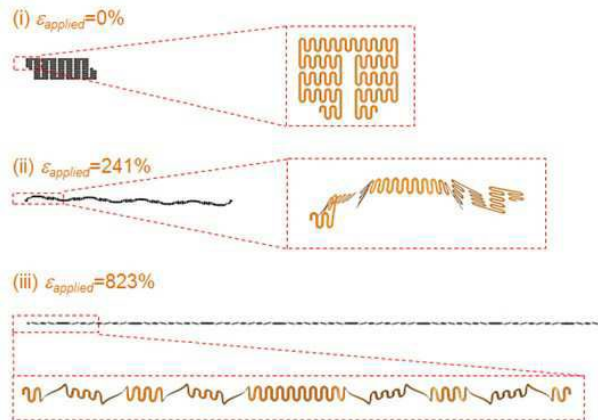


도면61

a. 배선에서의 최대 변형

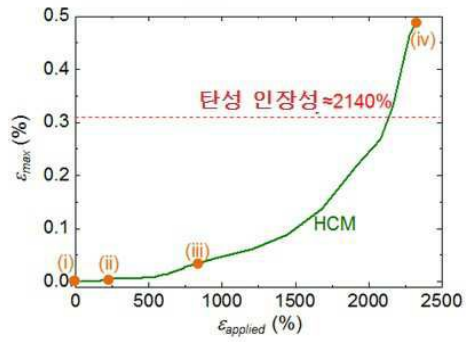


b. 구조의 진화

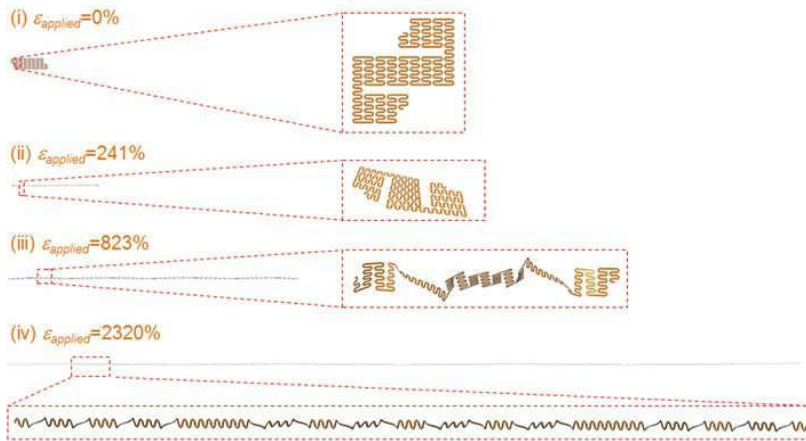


도면62

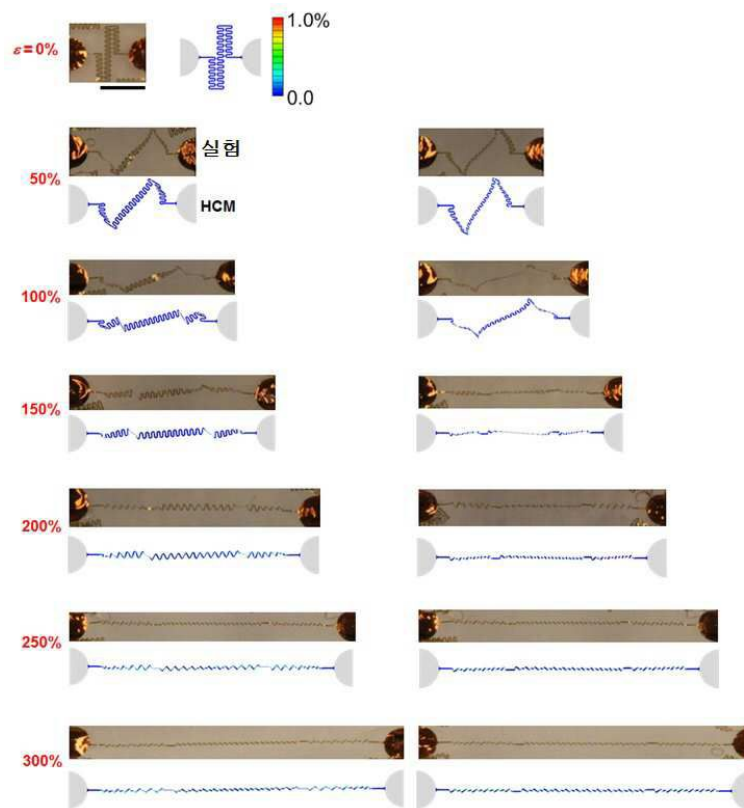
a. 배선에서의 최대 변형



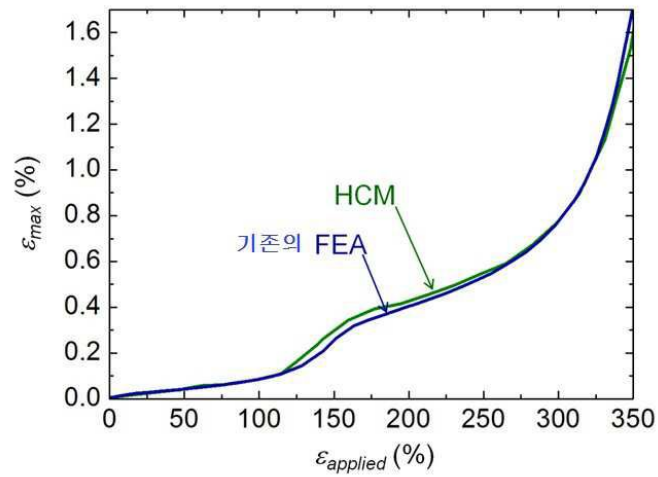
b. 구조의 진화



도면63

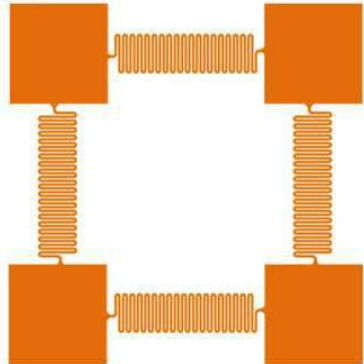


도면64

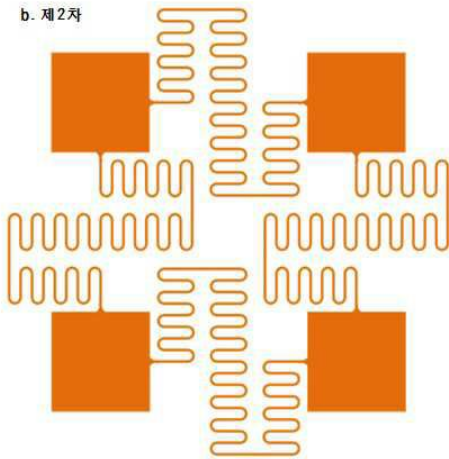


도면65

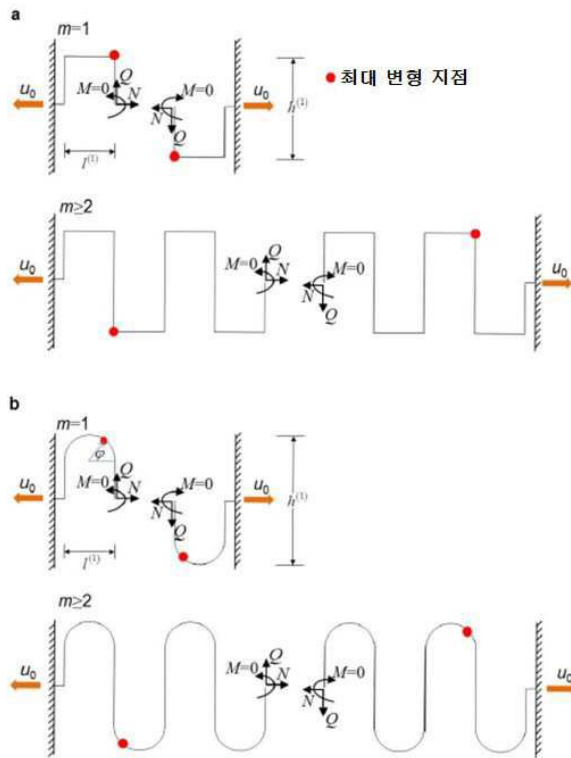
a. 제 1차



b. 제 2차



도면66



도면67

(a)	분석				FEA-미소 변형				FEA-한정 변형			
	$\eta^{(1)}=1$	$\eta^{(1)}=2$	$\eta^{(1)}=4$	$\eta^{(1)}=6$	$\eta^{(1)}=1$	$\eta^{(1)}=2$	$\eta^{(1)}=4$	$\eta^{(1)}=6$	$\eta^{(1)}=1$	$\eta^{(1)}=2$	$\eta^{(1)}=4$	$\eta^{(1)}=6$
$m^{(1)}=1$	0.55	1.66	5.20	10.41	0.70	1.79	5.23	10.37	0.69	1.79	5.20	10.40
$m^{(1)}=2$	0.60	1.81	5.84	11.94	0.69	1.87	5.84	11.88	0.68	1.87	5.87	11.87
$m^{(1)}=4$	0.66	1.99	6.39	11.94	0.73	2.02	6.37	13.01	0.73	2.02	6.4	13.07
$m^{(1)}=10$	0.72	2.17	6.95	14.22	0.80	2.20	6.91	14.09	0.8	2.19	6.9	14

(b)	분석				FEA-미소 변형				FEA-한정 변형			
	$\eta^{(2)}=1$	$\eta^{(2)}=2$	$\eta^{(2)}=4$	$\eta^{(2)}=6$	$\eta^{(2)}=1$	$\eta^{(2)}=2$	$\eta^{(2)}=4$	$\eta^{(2)}=6$	$\eta^{(2)}=1$	$\eta^{(2)}=2$	$\eta^{(2)}=4$	$\eta^{(2)}=6$
$m^{(2)}=1$	1.01	3.04	9.91	20.65	1.02	3.11	10.23	21.38	0.99	3.00	9.83	20.50
$m^{(2)}=2$	1.30	3.88	12.70	26.32	1.30	3.90	12.87	26.81	1.30	3.92	12.67	24.92
$m^{(2)}=4$	1.52	4.51	14.79	30.77	1.51	4.50	14.83	30.94	1.48	4.45	14.33	28.00
$m^{(2)}=10$	1.70	5.01	15.43	32.23	1.69	5.00	16.37	34.27	1.57	4.70	15.00	29.58

(c)	분석			FEA-미소 변형			FEA-한정 변형		
	$m^{(1)}=2$	$m^{(1)}=4$	$m^{(1)}=6$	$m^{(1)}=2$	$m^{(1)}=4$	$m^{(1)}=6$	$m^{(1)}=2$	$m^{(1)}=4$	$m^{(1)}=6$
$\eta^{(1)}=1$	2.16	2.21	2.25	2.39	2.31	2.31	2.40	2.30	2.31
$\eta^{(1)}=1.5$	2.59	2.59	2.63	2.83	2.70	2.67	2.80	2.67	2.67
$\eta^{(1)}=1.8$	2.87	2.81	2.86	3.11	2.93	2.93	3.07	2.90	2.91
$\eta^{(1)}=2$	/	2.96	3.01	/	3.08	3.09	/	3.03	3.04
$\eta^{(1)}=2.5$	/	3.34	3.37	/	3.47	3.44	/	3.40	3.40
$\eta^{(1)}=3$	/	3.72	3.73	/	3.83	3.82	/	3.77	3.73
$\eta^{(1)}=4$	/	/	4.46	/	/	4.56	/	/	4.44
$\eta^{(1)}=5$	/	/	5.21	/	/	5.31	/	/	5.11