



(19) 대한민국특허청(KR)

(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2021년07월08일

(11) 등록번호 10-2275072

(24) 등록일자 2021년07월02일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H01Q 15/00 (2018.01) H01Q 3/26 (2006.01)(52) CPC특허분류
H01Q 15/0086 (2013.01)
H01Q 3/26 (2018.05)

(21) 출원번호 10-2020-0065261

(22) 출원일자 2020년05월29일

심사청구일자 2020년05월29일

(56) 선행기술조사문헌

KR101888175 B1*

*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자

울산과학기술원

울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50

(72) 발명자

전영철

울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50 울산과학기술원

정훈엽

울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50 울산과학기술원

(뒷면에 계속)

(74) 대리인

오위환, 나성곤, 정기택

전체 청구항 수 : 총 18 항

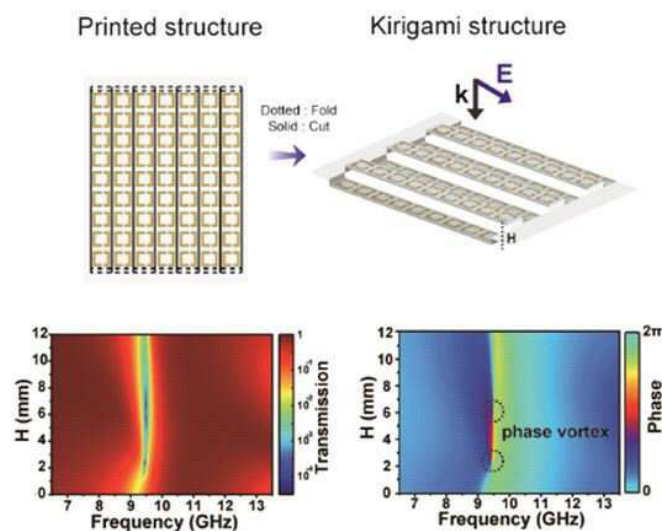
심사관 : 변종길

(54) 발명의 명칭 키리가미 구조 기반 가변형 전자기 메타물질 구조체 및 그의 제조 방법

(57) 요약

본 발명은 종이에 금속 잉크 인쇄를 사용하여 재구성 가능한 마이크로파 메타물질을 만들 수 있도록 한 키리가미(kirigami) 구조 기반 가변형 전자기 메타물질 구조체 및 그의 제조 방법에 관한 것으로, 종이에 금속 나노 입자 잉크 물질층이 인쇄되고, 금속 나노 입자 잉크층이 비대칭 분할 링 공진 특성을 갖도록 구조적으로 상이한 길이를 갖고 분리되어 대향되는 단위 셀 제 1 라인 및 단위 셀 제 2 라인을 구성하여 한 쌍의 금속 라인 형태로 주기를 갖고 배치되는 단위 셀;을 포함하고, 키리가미 기하학을 적용하여 조정 가능하고 재구성 가능한 스펙트럼 공명 및 위상 특성을 구현하는 것이다.

대표도 - 도7



(72) 발명자

임연수

울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50 울산과학기술원

안수찬

울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50 울산과학기술원

변강일

울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50 울산과학기술원

응우옌 티 하이 옌

울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50 울산과학기술원

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711077521
과제번호	2018R1E1A2A02086050
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	중견연구자지원사업 (X-프로젝트 후속연구)
연구과제명	4D 프린팅 기반 자극반응형 하이브리드 메타물질 개발
기 여 율	70/100
과제수행기관명	울산과학기술원
연구기간	2018.11.01 ~ 2019.10.31

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1.200046.01
과제번호	1.200046.01
부처명	울산광역시
과제관리(전문)기관명	울산과학기술원
연구사업명	울산시지원사업
연구과제명	초고감도 스마트 중적외선 검출기
기 여 율	30/100
과제수행기관명	울산과학기술원
연구기간	2020.01.01 ~ 2020.12.31

공지예외적용 : 있음

명세서

청구범위

청구항 1

종이에 금속 나노 입자 잉크층이 인쇄되고,

금속 나노 입자 잉크층이 비대칭 분할 링 공진 특성을 갖도록 구조적으로 상이한 길이를 갖고 분리되어 대향되는 단위 셀 제 1 라인 및 단위 셀 제 2 라인을 구성하여 한 쌍의 금속 라인 형태로 주기를 갖고 배치되는 단위 셀;을 포함하여 키리가미(kirigami) 기하학을 적용하여 조정 가능하고 재구성 가능한 스펙트럼 공명 및 위상 특이성을 구현하는 전자기 메타물질 구조체가 구성되고,

전자기 메타물질 구조체는 Fano 공명 스펙트럼의 제로 진폭 위치에서 위상 특이성을 나타내고, 스펙트럼 위상은 이 특이점에서 급격한 변화를 나타내며, 위상 스펙트럼은 형상 변화에 따라 조정되는 것을 특징으로 하는 키리가미 구조 기반 가변형 전자기 메타물질 구조체.

청구항 2

제 1 항에 있어서, 키리가미 기하학을 적용하기 위하여,

종이에 금속 나노 입자 잉크 물질층이 인쇄되어 라인 단위로 절단되고 접혀서, 인접한 단위 셀들 사이의 스텝 높이가 생성되고 조정될 수 있도록 하는 것을 특징으로 하는 키리가미 구조 기반 가변형 전자기 메타물질 구조체.

청구항 3

제 2 항에 있어서, 절단 방향에 따라 물체가 내는 빛의 파장이 늘어나 보이는 적색 편이(redshift) 또는 빛의 파장이 줄어들어 보이는 청색 편이(blueshift)가 관찰되는 것을 특징으로 하는 키리가미 구조 기반 가변형 전자기 메타물질 구조체.

청구항 4

삭제

청구항 5

제 1 항에 있어서, 단위 셀에서의 구조적 비대칭성은,

단위 셀의 전체 중심과 단위 셀 제 1 라인 및 단위 셀 제 2 라인의 분리 영역의 중심까지의 거리(d)에 의해 정의되는 것을 특징으로 하는 키리가미 구조 기반 가변형 전자기 메타물질 구조체.

청구항 6

제 5 항에 있어서, 거리(d)에 의해 정의되는 대칭 차단(symmetry breaking)으로 인해 다크 모드가 여기될 수 있고, 느리게 변화하는 브라이트 모드(bright mode) 단계에서 다크 모드(dark mode)의 빠른 위상 변화로 인해 투과 및 반사 스펙트럼 모두에서 매우 비대칭적인 선 모양이 나타나는 것을 특징으로 하는 키리가미 구조 기반 가변형 전자기 메타물질 구조체.

청구항 7

제 6 항에 있어서, 구조적 비대칭이 작을수록 파노(Fano) 공명이 더 선명 해지고, 브라이트 모드(bright mode)와 다크 모드(dark mode) 사이의 결합 강도가 감소하여 공명 강도가 동시에 감소하는 것을 특징으로 하는 키리가미 구조 기반 가변형 전자기 메타물질 구조체.

청구항 8

제 7 항에 있어서, 비대칭이 증가함에 따라 파노 공명 강도는 강해지고 동시에 스펙트럼은 넓어지고, 비대칭 파

라미터 d가 증가함에 따라 전송 최소값은 0에 가까워지는 것을 특징으로 하는 키리가미 구조 기반 가변형 전자기 메타물질 구조체.

청구항 9

제 2 항에 있어서, 라인 단위 절단에서 수직 절단에 대한 전송 스펙트럼에서 Fano 공명은 스텝 높이가 증가함에 따라 점진적인 적색 편이를 나타내고,

수평 절단의 전체 공명 이동은 수직 절단의 공명 이동보다 훨씬 작고, 스텝 높이가 증가하면 처음에는 약간의 청색 편이가 있고 그 다음에는 적색 편이가 있는 것을 특징으로 하는 키리가미 구조 기반 가변형 전자기 메타물질 구조체.

청구항 10

제 9 항에 있어서, 수직 및 수평 절단에 관한 쌍극자 커플링은,

두 경우 모두 자기 쌍극자가 횡 방향으로 연결되고, 전기 쌍극자는 x 방향에서 횡방향으로 연결되는 반면, y 방향에서 길이 방향으로 연결되고,

수직 절단에서, x 방향에서 횡방향으로 결합된 전기 쌍극자는 공간에서 분리되고, 수평 절단에서, y 방향에서 길이 방향으로 결합된 전기 쌍극자는 공간에서 분리되는 것을 특징으로 하는 키리가미 구조 기반 가변형 전자기 메타물질 구조체.

청구항 11

제 1 항에 있어서, Fano 공명 주파수에서의 비대칭 분할 링 공진기는 자기 쌍극자 모멘트 M_z 와 전기 쌍극자 모멘트 P_y 를 모두 유지하고,

인접 단위 셀에서 쌍극자 사이의 횡방향 및 종방향 커플링은 스펙트럼 적색 편이 또는 청색 편이를 초래하는 것을 특징으로 하는 키리가미 구조 기반 가변형 전자기 메타물질 구조체.

청구항 12

제 11 항에 있어서, 이웃하는 셀들 사이의 쌍극 커플링의 차이 때문에 수직 및 수평 절단을 위해 다른 라그랑지안을 갖고,

각 경우에 대해 Lagrange 방정식을 풀면 공명 주파수는,

$$w_V = w_0 \sqrt{\frac{1 + \frac{2k_e}{(P^2 + H^2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{4k_e}{P^3}}{1 - 2k_h \left[\frac{1 - 3 \sin^2 \theta_0}{(P^2 + H^2)^{\frac{3}{2}}} \right] - \frac{2k_h}{P^3}}}$$

(for vertical cut)

$$w_H = w_0 \sqrt{\frac{1 + \frac{2k_e}{P^3} - \frac{2k_e(3 \cos^2 \theta_0 - 1)}{(P^2 + H^2)^{\frac{3}{2}}}}{1 - 2k_h \left[\frac{1 - 3 \sin^2 \theta_0}{(P^2 + H^2)^{\frac{3}{2}}} \right] - \frac{2k_h}{P^3}}}$$

(for horizontal cut)

으로 정의되고,

여기서, P는 x와 y 방향 모두에 대한 단위 셀 사이의 주기이고, H는 키리가미 스텝 높이, w_0 는 단일 공진기의 공진 주파수, θ_0 는 키리가미 각도이고, k_e 및 k_h 는 각각 전기 및 자기 쌍극자에 대한 결합 강도인 것을 특징으로 하는 키리가미 구조 기반 가변형 전자기 메타물질 구조체.

청구항 13

금속 나노 입자 잉크를 사용하여 금속 나노 입자를 인쇄지에 인쇄하는 단계;

인쇄 후 어닐링을 하여 전도성을 증가시키고 잔류 유기물질 제거하는 단계;

어닐링 후, 인쇄된 종이를 라인 단위로 수직 또는 수평 방향으로 절단하고 접어서 인접한 단위 셀 사이에 스텝 높이를 생성하는 단계;를 포함하여 키리가미(kirigami) 기하학을 적용하여 조정 가능하고 재구성 가능한 스펙트럼 공명 및 위상 특이성을 구현하는 전자기 메타물질 구조체를 형성하고,

금속 나노 입자 잉크층이 비대칭 분할 링 공진 특성을 갖도록 구조적으로 상이한 길이를 갖고 분리되어 대향되는 단위 셀 제 1 라인 및 단위 셀 제 2 라인을 구성하여 한 쌍의 금속 라인 형태로 주기를 갖고 배치되는 단위 셀을 제조하고,

전자기 메타물질 구조체는 Fano 공명 스펙트럼의 제로 진폭 위치에서 위상 특이성을 나타내고, 스펙트럼 위상은 이 특이점에서 급격한 변화를 나타내며, 위상 스펙트럼은 형상 변화에 따라 조정되는 것을 특징으로 하는 키리가미 구조 기반 가변형 전자기 메타물질 구조체의 제조 방법.

청구항 14

제 13 항에 있어서, 단위 셀에서의 구조적 비대칭성은,

단위 셀의 전체 중심과 단위 셀 제 1 라인 및 단위 셀 제 2 라인의 분리 영역의 중심까지의 거리(d)에 의해 정의되는 것을 특징으로 하는 키리가미 구조 기반 가변형 전자기 메타물질 구조체의 제조 방법.

청구항 15

제 14 항에 있어서, 거리(d)에 의해 정의되는 대칭 차단(symmetry breaking)으로 인해 다크 모드가 여기될 수 있고, 느리게 변화하는 브라이트 모드(bright mode) 단계에서 다크 모드(dark mode)의 빠른 위상 변화로 인해 투과 및 반사 스펙트럼 모두에서 매우 비대칭적인 선 모양이 나타나는 것을 특징으로 하는 키리가미 구조 기반 가변형 전자기 메타물질 구조체의 제조 방법.

청구항 16

제 15 항에 있어서, 구조적 비대칭이 작을수록 파노(Fano) 공명이 더 선명 해지고, 브라이트 모드(bright mode)와 다크 모드(dark mode) 사이의 결합 강도가 감소하여 공명 강도가 동시에 감소하는 것을 특징으로 하는 키리가미 구조 기반 가변형 전자기 메타물질 구조체의 제조 방법.

청구항 17

제 16 항에 있어서, 비대칭이 증가함에 따라 파노 공명 강도는 강해지고 동시에 스펙트럼은 넓어지고, 비대칭 파라미터 d가 증가함에 따라 전송 최소값은 0에 가까워지는 것을 특징으로 하는 키리가미 구조 기반 가변형 전자기 메타물질 구조체의 제조 방법.

청구항 18

제 13 항에 있어서, 라인 단위 절단에서 수직 절단에 대한 전송 스펙트럼에서 Fano 공명은 스텝 높이가 증가함에 따라 점진적인 적색 편이를 나타내고,

수평 절단의 전체 공명 이동은 수직 절단의 공명 이동보다 훨씬 작고, 스텝 높이가 증가하면 처음에는 약간의 청색 편이가 있고 그 다음에는 적색 편이가 있는 것을 특징으로 하는 키리가미 구조 기반 가변형 전자기 메타물질 구조체의 제조 방법.

청구항 19

제 18 항에 있어서, 수직 및 수평 절단에 관한 쌍극자 커플링은,

두 경우 모두 자기 쌍극자가 횡 방향으로 연결되고, 전기 쌍극자는 x 방향에서 횡방향으로 연결되는 반면, y 방향에서 길이 방향으로 연결되고,

수직 절단에서, x 방향에서 횡방향으로 결합된 전기 쌍극자는 공간에서 분리되고, 수평 절단에서, y 방향에서

길이 방향으로 결합된 전기 쌍극자는 공간에서 분리되는 것을 특징으로 하는 키리가미 구조 기반 가변형 전자기 메타물질 구조체의 제조 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 메타물질에 관한 것으로, 구체적으로 종이에 금속 잉크 인쇄를 사용하여 재구성 가능한 마이크로파 메타물질을 만들 수 있도록 한 키리가미 구조 기반 가변형 전자기 메타물질 구조체 및 그의 제조 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 최근 메타물질(Metamaterial)을 이용하여 안테나를 설계하는 연구가 급증하고 있다. 메타물질이란 특정 단위 격자를 주기적으로 배열하여 자연계에 존재하지 않는 전자기적 성질을 가지는 물질 특성을 나타내는 것이다.

[0003] 여러 종류의 메타물질 중 유전율과 투자율의 값을 임의로 조정할 수 있는 메타물질이 많은 관심을 받고 있다.

[0004] 메타물질 기술은 기존의 기술로는 불가능했던 주파수 독립적인 파장, 위상 및 굴절률 제어가 가능한 신개념의 차세대 혁신 기술로서 정보통신기기, 전자제품 등의 초소형화, 고성능화 등의 실현이 가능하며 고성능/고효율의 전파통신 부품, 광통신 부품, 의료진단 영상장치, 보안 감시 시스템 등에 응용되어 유비쿼터스 사회의 산업 전반에 지대한 파급 효과를 미칠 것으로 보고 선진 각국에서는 차세대 핵심 원천 기술로서 개발을 경쟁적으로 추진하고 있다.

[0005] 한편, IoT(Internet of Things) 기술에서 물리적 객체는 무수한 센서가 내장되어 있으며 마이크로파 무선 네트워크를 통해 통신을 한다.

[0006] 이러한 IoT 기술에는 광범위한 안테나와 센서가 필요한데, 높은 성능을 유지하면서 광범위하게 배포할 수 있을 정도로 저렴해야 하고, 운영 환경의 변화에 따라 쉽게 재구성 가능해야 한다.

[0007] 전자기 메타물질은 전례 없는 수준으로 전자기파를 궁극적으로 제어할 수 있으므로 다양한 마이크로파 안테나 및 구성 요소에 매우 유용할 수 있다.

[0008] 메타물질의 공진 전계 개선으로 전자기 감지를 통한 다양한 감지 응용 분야에 이상적이다. 따라서, 메타물질은 다양한 IoT 장치에서 중요한 역할을 할 수 있다.

[0009] 그러나 이러한 메타물질은 종종 복잡하고 값 비싼 제조 절차가 필요하여 광범위한 사용을 제한하고 있고, 조정 가능하고 재구성 가능한 메타물질을 구현하려면 훨씬 더 복잡한 제조 및 장치 작동이 필요할 수 있다.

[0010] 따라서, 제작이 용이하지만 여전히 기능적이고 조정 가능한 요소를 가능하게 하는 메타물질 제조에 관한 새로운 기술의 개발이 요구되고 있다.

선행기술문헌

특허문헌

- [0011] (특허문헌 0001) 대한민국 등록특허 제10-1852071호
(특허문헌 0002) 대한민국 등록특허 제10-1822754호
(특허문헌 0003) 대한민국 공개특허 제10-2008-0102205호

발명의 내용

해결하려는 과제

[0012] 본 발명은 종래 기술의 메타물질 제작의 문제점을 해결하기 위한 것으로, 종이에 금속 잉크 인쇄를 사용하여 재구성 가능한 마이크로파 메타물질을 만들 수 있도록 한 키리가미(kirigami) 구조 기반 가변형 전자기 메타물질

구조체 및 그의 제조 방법을 제공하는데 그 목적이 있다.

- [0013] 본 발명은 용이하고 저렴한 제조 공정으로 조정 가능하고 재구성 가능한 메타물질을 구현할 수 있도록 한 키리가미 구조 기반 가변형 전자기 메타물질 구조체 및 그의 제조 방법을 제공하는데 그 목적이 있다.
- [0014] 본 발명은 키리가미 기하학을 적용하여 조정 가능하고 재구성 가능하도록 하여 스펙트럼 공명 및 위상 특이성을 구현하는 키리가미 구조 기반 가변형 전자기 메타물질 구조체 및 그의 제조 방법을 제공하는데 그 목적이 있다.
- [0015] 본 발명은 금속 나노 입자 잉크층이 구조적으로 상이한 길이의 한 쌍의 금속 라인 형태로 주기를 갖고 배치되어 간단한 기하학적 구조에도 불구하고 상당한 스펙트럼 이동과 공명 튜닝 특성을 갖도록 한 키리가미 구조 기반 가변형 전자기 메타물질 구조체 및 그의 제조 방법을 제공하는데 그 목적이 있다.
- [0016] 본 발명은 비대칭 분할 링 공진기 어레이가 마이크로파 영역 (~ 10 GHz)에서 Fano 공명을 유도하기 위해 인화지에 인쇄되고, 인쇄된 종이는 라인 단위로 절단되고 접혀서, 인접한 단위 셀들 사이의 스텝 높이가 생성되고 조정될 수 있도록 한 키리가미 구조 기반 가변형 전자기 메타물질 구조체 및 그의 제조 방법을 제공하는데 그 목적이 있다.
- [0017] 본 발명의 다른 목적들은 이상에서 언급한 목적으로 제한되지 않으며, 언급되지 않은 또 다른 목적들은 아래의 기재로부터 당업자에게 명확하게 이해될 수 있을 것이다.

과제의 해결 수단

- [0018] 상기와 같은 목적을 달성하기 위한 본 발명에 따른 키리가미 구조 기반 가변형 전자기 메타물질 구조체는 종이에 금속 나노 입자 잉크 물질층이 인쇄되고, 금속 나노 입자 잉크층이 비대칭 분할 링 공진 특성을 갖도록 구조적으로 상이한 길이를 갖고 분리되어 대향되는 단위 셀 제 1 라인 및 단위 셀 제 2 라인을 구성하여 한 쌍의 금속 라인 형태로 주기를 갖고 배치되는 단위 셀;을 포함하고, 키리가미 기하학을 적용하여 조정 가능하고 재구성 가능한 스펙트럼 공명 및 위상 특이성을 구현하는 것을 특징으로 한다.
- [0019] 여기서, 키리가미 기하학을 적용하기 위하여, 종이에 금속 나노 입자 잉크 물질층이 인쇄되어 라인 단위로 절단되고 접혀서, 인접한 단위 셀들 사이의 스텝 높이가 생성되고 조정될 수 있도록 하는 것을 특징으로 한다.
- [0020] 그리고 절단 방향에 따라 물체가 내는 빛의 파장이 늘어나 보이는 적색 편이(redshift) 또는 빛의 파장이 줄어 들어 보이는 청색 편이(blueshift)가 관찰되는 것을 특징으로 한다.
- [0021] 그리고 전자기 메타물질 구조체는, Fano 공명 스펙트럼의 제로 진폭 위치에서 위상 특이성을 나타내고, 스펙트럼 위상은 이 특이점에서 급격한 변화를 나타내며, 위상 스펙트럼은 형상 변화에 따라 조정되는 것을 특징으로 한다.
- [0022] 그리고 단위 셀에서의 구조적 비대칭성은, 단위 셀의 전체 중심과 단위 셀 제 1 라인 및 단위 셀 제 2 라인의 분리 영역의 중심까지의 거리(d)에 의해 정의되는 것을 특징으로 한다.
- [0023] 그리고 거리(d)에 의해 정의되는 대칭 차단(symmetry breaking)으로 인해 다크 모드가 여기될 수 있고, 느리게 변화하는 브라이트 모드(bright mode) 단계에서 다크 모드(dark mode)의 빠른 위상 변화로 인해 투과 및 반사 스펙트럼 모두에서 매우 비대칭적인 선 모양이 나타나는 것을 특징으로 한다.
- [0024] 그리고 구조적 비대칭이 작을수록 파노(Fano) 공명이 더 선명 해지고, 브라이트 모드(bright mode)와 다크 모드(dark mode) 사이의 결합 강도가 감소하여 공명 강도가 동시에 감소하는 것을 특징으로 한다.
- [0025] 그리고 비대칭이 증가함에 따라 파노 공명 강도는 강해지고 동시에 스펙트럼은 넓어지고, 비대칭 파라미터 d가 증가함에 따라 전송 최소값은 0에 가까워지는 것을 특징으로 한다.
- [0026] 그리고 라인 단위 절단에서 수직 절단에 대한 전송 스펙트럼에서 Fano 공명은 스텝 높이가 증가함에 따라 점진적인 적색 편이를 나타내고, 수평 절단의 전체 공명 이동은 수직 절단의 공명 이동보다 훨씬 작고, 스텝 높이가 증가하면 처음에는 약간의 청색 편이가 있고 그 다음에는 적색 편이가 있는 것을 특징으로 한다.
- [0027] 그리고 수직 및 수평 절단에 관한 쌍극자 커플링은, 두 경우 모두 자기 쌍극자가 횡 방향으로 연결되고, 전기 쌍극자는 x 방향에서 횡방향으로 연결되는 반면, y 방향에서 길이 방향으로 연결되고, 수직 절단에서, x 방향에서 횡방향으로 결합된 전기 쌍극자는 공간에서 분리되고, 수평 절단에서, y 방향에서 길이 방향으로 결합된 전기 쌍극자는 공간에서 분리되는 것을 특징으로 한다.

[0028] 그리고 Fano 공명 주파수에서의 비대칭 분할 링 공진기는 자기 쌍극자 모멘트 M_z 와 전기 쌍극자 모멘트 P_y 를 모두 유지하고, 인접 단위 셀에서 쌍극자 사이의 횡방향 및 종방향 커플링은 스펙트럼 적색 편이 또는 청색 편이를 초래하는 것을 특징으로 한다.

[0029] 그리고 이웃하는 셀들 사이의 쌍극 커플링의 차이 때문에 수직 및 수평 절단을 위해 다른 라그랑지안을 갖고, 각 경우에 대해 Lagrange 방정식을 풀면 공명 주파수는,

$$w_V = w_0 \sqrt{\frac{1 + \frac{2k_e}{(P^2 + H^2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{4k_e}{P^3}}{1 - 2k_h \left[\frac{1 - 3\sin^2 \theta_0}{(P^2 + H^2)^{\frac{3}{2}}} \right] - \frac{2k_h}{P^3}}}$$

(for vertical cut)

[0030]

$$w_H = w_0 \sqrt{\frac{1 + \frac{2k_e}{P^3} - \frac{2k_e(3\cos^2 \theta_0 - 1)}{(P^2 + H^2)^{\frac{3}{2}}}}{1 - 2k_h \left[\frac{1 - 3\sin^2 \theta_0}{(P^2 + H^2)^{\frac{3}{2}}} \right] - \frac{2k_h}{P^3}}}$$

(for horizontal cut)

[0031] 으로 정의되고,

[0032] 여기서, P는 x와 y 방향 모두에 대한 단위 셀 사이의 주기이고, H는 키리가미 스텝 높이, w_0 는 단일 공진기의 공진 주파수, θ_0 는 키리가미 각도이고, k_e 및 k_h 는 각각 전기 및 자기 쌍극자에 대한 결합 강도인 것을 특징으로 한다.

[0033] 다른 목적을 달성하기 위한 본 발명에 따른 키리가미 구조 기반 가변형 전자기 메타물질 구조체의 제조 방법은 금속 나노 입자 잉크를 사용하여 금속 나노 입자를 인쇄지에 인쇄하는 단계;인쇄 후 어닐링을 하여 전도성을 증가시키고 잔류 유기물질 제거하는 단계;어닐링 후, 인쇄된 종이를 라인 단위로 수직 또는 수평 방향으로 절단하고 접어서 인접한 단위 셀 사이에 스텝 높이를 생성하는 단계;를 포함하여, 금속 나노 입자 잉크층이 비대칭 분할 링 공진 특성을 갖도록 구조적으로 상이한 길이를 갖고 분리되어 대향되는 단위 셀 제 1 라인 및 단위 셀 제 2 라인을 구성하여 한 쌍의 금속 라인 형태로 주기를 갖고 배치되는 단위 셀을 제조하는 것을 특징으로 한다.

[0034] 그리고 단위 셀에서의 구조적 비대칭성은, 단위 셀의 전체 중심과 단위 셀 제 1 라인 및 단위 셀 제 2 라인의 분리 영역의 중심까지의 거리(d)에 의해 정의되는 것을 특징으로 한다.

[0035] 그리고 거리(d)에 의해 정의되는 대칭 차단(symmetry breaking)으로 인해 다크 모드가 여기될 수 있고, 느리게 변화하는 브라이트 모드(bright mode) 단계에서 다크 모드(dark mode)의 빠른 위상 변화로 인해 투과 및 반사 스펙트럼 모두에서 매우 비대칭적인 선 모양이 나타나는 것을 특징으로 한다.

[0036] 그리고 구조적 비대칭이 작을수록 파노(Fano) 공명이 더 선명 해지고, 브라이트 모드(bright mode)와 다크 모드(dark mode) 사이의 결합 강도가 감소하여 공명 강도가 동시에 감소하는 것을 특징으로 한다.

[0037] 그리고 비대칭이 증가함에 따라 파노 공명 강도는 강해지고 동시에 스펙트럼은 넓어지고, 비대칭 파라미터 d가 증가함에 따라 전송 최소값은 0에 가까워지는 것을 특징으로 한다.

[0038] 그리고 라인 단위 절단에서 수직 절단에 대한 전송 스펙트럼에서 Fano 공명은 스텝 높이가 증가함에 따라 점진적인 적색 편이를 나타내고, 수평 절단의 전체 공명 이동은 수직 절단의 공명 이동보다 훨씬 작고, 스텝 높이가 증가하면 처음에는 약간의 청색 편이가 있고 그 다음에는 적색 편이가 있는 것을 특징으로 한다.

[0039] 그리고 수직 및 수평 절단에 관한 쌍극자 커플링은, 두 경우 모두 자기 쌍극자가 횡 방향으로 연결되고, 전기 쌍극자는 x 방향에서 횡방향으로 연결되는 반면, y 방향에서 길이 방향으로 연결되고, 수직 절단에서, x 방향에서 횡방향으로 결합된 전기 쌍극자는 공간에서 분리되고, 수평 절단에서, y 방향에서 길이 방향으로 결합된 전기 쌍극자는 공간에서 분리되는 것을 특징으로 한다.

발명의 효과

- [0040] 이상에서 설명한 바와 같은 본 발명에 따른 키리가미 구조 기반 가변형 전자기 메타물질 구조체 및 그의 제조 방법은 다음과 같은 효과가 있다.
- [0041] 첫째, 종이에 금속 잉크 인쇄를 사용하여 재구성 가능한 마이크로파 메타물질을 만들 수 있도록 한다.
- [0042] 둘째, 용이하고 저렴한 제조 공정으로 조정 가능하고 재구성 가능한 메타물질을 구현할 수 있도록 한다.
- [0043] 셋째, 키리가미 기하학을 적용하여 조정 가능하고 재구성 가능하도록 하여 스펙트럼 공명 및 위상 특이성을 구현할 수 있다.
- [0044] 넷째, 금속 나노 입자 잉크층이 구조적으로 상이한 길이의 한 쌍의 금속 라인 형태로 주기를 갖고 배치되어 간단한 기하학적 구조에도 불구하고 상당한 스펙트럼 이동과 공명 튜닝 특성을 갖도록 한다.

도면의 간단한 설명

- [0045] 도 1의 (a)는 키리가미 메타물질 제조 공정의 개략도, (b)는 메타물질 단위 셀의 설계 파라미터, (c)는 상이한 어닐링 조건 하에서 인쇄된 은 나노 입자의 SEM 이미지, (d)는 인쇄된 구조 및 키리가미 구조의 이미지
- 도 2는 본 발명에 따른 키리가미 구조 기반 가변형 전자기 메타물질 구조체의 제조 공정을 나타낸 플로우 차트
- 도 3은 상이한 구조적 비대칭 파라미터에 대한 시뮬레이션 투과 스펙트럼
- 도 4의 (a)는 측정 설정 회로도, (b)는 측정을 위한 구성도, (c)는 편광이 다른 평평한 구조물의 측정 투과 스펙트럼, (d)는 평평한 구조의 시뮬레이션 스펙트럼
- 도 5의 (a)는 수직 절단 키리가미 메타물질, (b) 및 (c)는 수직 절단에 대한 측정 및 시뮬레이션 전송 스펙트럼, (d)는 수평 절단 키리가미 메타물질, (e) 및 (f) 수평 절단에 대한 측정 및 시뮬레이션 전송 스펙트럼
- 도 6은 자기 및 전기 쌍극자 커플링으로 인한 스펙트럼 편이 분석을 위한 구성도
- 도 7 및 도 8은 키리가미 메타물질의 상 소용돌이 및 특이성을 나타낸 시뮬레이션 구성 및 결과
- 도 9는 광학 감지를 위한 위상 특이성을 나타낸 그래프

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0046] 이하, 본 발명에 따른 키리가미 구조 기반 가변형 전자기 메타물질 구조체 및 그의 제조 방법의 바람직한 실시 예에 관하여 상세히 설명하면 다음과 같다.
- [0047] 본 발명에 따른 키리가미 구조 기반 가변형 전자기 메타물질 구조체 및 그의 제조 방법의 특징 및 이점들은 이하에서의 각 실시 예에 대한 상세한 설명을 통해 명백해질 것이다.
- [0048] 도 1의 (a)는 키리가미 메타물질 제조 공정의 개략도, (b)는 메타물질 단위 셀의 설계 파라미터, (c)는 상이한 어닐링 조건 하에서 인쇄된 은 나노 입자의 SEM 이미지, (d)는 인쇄된 구조 및 키리가미 구조의 이미지이다.
- [0049] 본 발명에 따른 키리가미 구조 기반 가변형 전자기 메타물질 구조체 및 그의 제조 방법은 종이에 금속 잉크 인쇄를 사용하여 용이하고 저렴한 제조 공정으로 조정 가능하고 재구성 가능한 메타물질을 구현할 수 있도록 하는 것이다.
- [0050] 이를 위하여, 본 발명은 키리가미(kirigami) 기하학을 적용하여 조정 가능하고 재구성 가능하도록 하여 스펙트럼 공명 및 위상 특이성을 구현하기 위한 구성을 포함할 수 있다.
- [0051] 본 발명은 단위 셀에서 금속 나노 입자 잉크층이 구조적으로 상이한 길이의 한 쌍의 금속 라인 형태로 주기를 갖고 배치되어 간단한 기하학적 구조에도 불구하고 상당한 스펙트럼 이동과 공명 튜닝 특성을 갖도록 하는 구성을 포함할 수 있다.
- [0052] 본 발명은 비대칭 분할 링 공진기 어레이가 마이크로파 영역(~ 10 GHz)에서 Fano 공명을 유도하기 위해 인화지에 인쇄되고, 인쇄된 종이는 라인 단위로 절단되고 접혀서, 인접한 단위 셀들 사이의 스텝 높이가 생성되고 조정될 수 있도록 하는 구성을 포함할 수 있다.

- [0053] 인접한 셀들 사이의 다양한 스텝 높이로, 간단한 기하학적 구조에도 불구하고 상당한 스펙트럼 이동과 공명 튜닝 특성을 나타내고, 절단 방향에 따라 물체가 내는 빛의 파장이 늘어나 보이는 적색 편이(redshift) 또는 빛의 파장이 줄어들어 보이는 청색 편이(blueshift)가 관찰될 수 있다.
- [0054] 또한, 본 발명에 따른 키리가미 메타물질은 Fano 공명 스펙트럼의 제로 진폭 위치에서 위상 특이성을 나타내고, 스펙트럼 위상은 이 특이점에서 급격한 변화를 나타내며, 위상 스펙트럼은 형상 변화에 따라 크게 조정할 수 있다.
- [0055] 이와 같은 위상의 급격한 변화는 광학 감지 및 빔 스티어링과 같은 다양한 응용 분야에서 매우 유용하게 적용될 수 있다.
- [0056] 도 1의 (a)는 키리가미 메타물질 제조 공정의 개략도이고, (b)는 메타물질 단위 셀의 설계 파라미터를 나타낸 것으로, 본 발명에 따른 키리가미 구조를 기반으로 한 재구성 가능한 전자기 메타물질 구조체는 종이에 금속 나노 입자 잉크 물질층이 인쇄되고, 금속 나노 입자 잉크층이 비대칭 분할 링 공진 특성을 갖도록 구조적으로 상이한 길이의 단위 셀 제 1 라인(20) 및 단위 셀 제 2 라인(30)의 한 쌍의 금속 라인 형태로 주기를 갖고 배치되어 단위 셀(10)이 구성되고, 키리가미 기하학을 적용하여 조정 가능하고 재구성 가능한 스펙트럼 공명 및 위상 특이성을 구현하는 것이다.
- [0057] 단일층 Fano 공명 메타물질은 잉크젯 프린터를 사용하여 인쇄지에 인쇄되고, 은 나노 입자 잉크를 사용하여 금속 라인을 정의한다.
- [0058] 여기서, 인쇄지는 다공성이며 금속 나노 입자 잉크는 다공성 영역에 잘 흡수되고, 본 발명의 일 실시 예에서 단위 셀 크기는 $7.5 \text{ mm} \times 7.5 \text{ mm}$, 주기는 10 mm 로 고정될 수 있다.
- [0059] 단위 셀에서의 구조적 비대칭성은 도 1의 (b)와 같이 비대칭 파라미터 d (즉, 중심 대 간격 거리)에 의해 정의된다.
- [0060] 즉, 단위 셀에서의 구조적 비대칭성은 단위 셀의 전체 중심과 단위 셀 제 1 라인 및 단위 셀 제 2 라인의 분리 영역(gap)의 중심까지의 거리(d)에 의해 정의되는 것이다.
- [0061] 이와 같은 대칭 차단(symmetry breaking)으로 인해 다크 모드(자기 쌍극자 공명)가 여기 될 수 있으며, 이는 넓은 백그라운드 전기 쌍극자 공명(background electric dipole resonance)과 간섭할 수 있다.
- [0062] 느리게 변화하는 브라이트 모드(bright mode) 단계에서 다크 모드(dark mode)의 빠른 위상 변화로 인해 투과 및 반사 스펙트럼 모두에서 매우 비대칭적인 선 모양이 나타난다.
- [0063] 이와 같은 구조적 비대칭이 작을수록 파노(Fano) 공명이 더 선명 해지지만, 브라이트 모드(bright mode)와 다크 모드(dark mode) 사이의 결합 강도가 감소하여 공명 강도가 동시에 감소한다.
- [0064] 도 3은 상이한 구조적 비대칭 파라미터에 대한 시뮬레이션 투과 스펙트럼이다.
- [0065] 비대칭이 증가함에 따라 파노 공명 강도는 강해지지만 동시에 스펙트럼은 넓어지고, 비대칭 파라미터 d 가 증가함에 따라 전송 최소값은 0에 가까워진다.
- [0066] 본 발명의 일 실시 예에서는 종이 위에 단위 셀 제 1 라인 및 단위 셀 제 2 라인을 정의하기 위한 금속 나노 입자 잉크 인쇄 후에 메타물질 구조체를 핫 플레이트 상에서 어닐링하여 잉크 패턴의 전도성을 증가시킨다.
- [0067] 도 1의 (c)는 상이한 어닐링 조건 하에서 인쇄된 패턴의 주사 전자 현미경 (SEM) 이미지를 나타낸 것이다.
- [0068] 온도가 상승함에 따라 은 나노 입자는 더 커지고 응집되고, 어닐링 중에 나노 입자 사이의 잔류 유기 물질도 제거된다.
- [0069] 어닐링 후, 종이는 라인 단위(수직 또는 수평)로 절단되어, 인접한 단위 셀 사이에 스텝 높이가 생성될 수 있고, 도 1의 (d)는 인쇄된 키리가미 절단 후의 샘플 사진을 나타낸 것이다.
- [0070] z 방향을 따른 스텝 높이는 키리가미 메타물질을 쉽게 제조하고 정확하게 제어할 수 있도록 한다.
- [0071] 본 발명에 따른 키리가미 구조 기반 가변형 전자기 메타물질 구조체의 제조 방법은 도 2에서와 같이, 잉크젯 프린터 및 은 나노 입자 잉크를 사용하여 은 나노 입자를 인쇄지에 인쇄하는 단계(S201)와, 인쇄 후, 열 오븐에서 180°C 에서 3 분 동안 열 소결을 하여 전도성을 증가시키고 잔류 유기물질 제거하는 단계(S202)와, 어닐링 후, 인쇄된 종이를 라인 단위(수직 또는 수평)로 절단하고 접어서 인접한 단위 셀 사이에 스텝 높이를 생성하는 단

계(S203)를 포함한다.

- [0072] 이와 같은 본 발명에 따른 키리가미 구조를 기반으로 한 재구성 가능한 전자기 메타물질 구조체가 갖는 특성을 설명하면 다음과 같다.
- [0073] 도 4의 (a)는 측정 설정 회로도, (b)는 측정을 위한 구성도, (c)는 편광이 다른 평평한 구조물의 측정 투과 스펙트럼, (d)는 평평한 구조의 시뮬레이션 스펙트럼이다.
- [0074] 제조된 샘플 전자기 메타물질 구조체를 4 프로브 시스템(AIT, CMT2000N)을 사용하여 시트 저항을 측정하면, 소결 후, 측정된 시트 저항은 약 $200 \text{ m}\Omega/\square$ 였다.
- [0075] 그리고 인쇄된 패턴의 높이는 표면 프로파일러(KLA Tencor, P6)를 사용하여 측정되었으며 약 $1\mu\text{m}$ 이다.
- [0076] 제조된 샘플 전자기 메타물질 구조체는 도 4의 (b)에서와 같이 맞춤형 샘플 홀더에 장착되고, 키리가미 샘플의 끝에 3D 인쇄된 높이 컨트롤러를 삽입하고 정확한 높이 제어를 위해 양단에 장력을 가한다.
- [0077] 도 4의 (a)는 측정 설정 회로 구성을 나타낸 것으로, 샘플 전자기 메타물질 구조체에 원하지 않는 간접 신호를 차단하기 위해 마이크로파 흡수벽으로 둘러싸고 2개의 혼 안테나의 중간에 위치시키고, 투과 스펙트럼은 벡터 네트워크 분석기를 사용하여 측정한다.
- [0078] 도 4의 (b)의 (왼쪽)은 스티로폼에 장착된 마이크로파 흡수벽 및 혼 안테나를 나타낸 것이고, (오른쪽)은 마이크로파 흡수벽의 후면과 장착된 샘플 전자기 메타물질 구조체를 나타낸 것이다.
- [0079] 도 4의 (c)는 편광이 다른 평평한 구조물의 측정된 투과 스펙트럼을 나타낸 것으로, 매우 비대칭적인 Fano 공진 스펙트럼은 y 편광 입사(파란색 곡선)에 대해서만 표시되는 반면, x 편광 입사는 그러한 특성(빨간색 곡선)을 표시하지 않는다.
- [0080] 비교를 위해 대칭 단위 셀($d = 0 \text{ mm}$)의 스펙트럼을 (노란색 곡선)으로 표시하였다.
- [0081] Fano 공진 구조는 실험과 시뮬레이션에서 y 편광 입사(파란색 곡선)에 대한 명확한 비대칭 선 모양을 보여준다. 두 경우 모두, Fano 공명에 대해 예상되는 것처럼 스펙트럼은 전송 최소값에서 최대값으로 큰 스윙을 보여주는 것을 확인할 수 있고, 9.2GHz의 전송 최소값은 0에 가까우며 최대값은 약 0.8이다.
- [0082] 도 4의 (d)는 평평한 구조의 해당 시뮬레이션 스펙트럼으로, Fano 공명 주파수에서의 전류 분포를 보여준다.
- [0083] 도 4의 (d)의 삽입은 순환 전류 루프가 생성되고 자기 공명이 여기되는 전송 최소에서의 시뮬레이션 된 전류 흐름을 보여준다.
- [0084] 그러나 다른 편광(x 편광 입사)의 경우에서의 구조는 측정된 스펙트럼 범위 (빨간색 곡선)에서 공명을 나타내지 않는다.
- [0085] 비교를 위해, 대칭 단위 셀을 갖는 샘플을 제조하고 측정하였다.
- [0086] Fano 공명을 나타내지 않고(노란색 곡선) 더 높은 주파수($\sim 13\text{GHz}$)에서 매우 넓은 쌍극자 응답만 나타내는 것을 알 수 있다.
- [0087] 시뮬레이션된 전류 분포의 다중 극 확장은 또한 넓은 전기 쌍극자 응답과 함께 Fano 공명 주파수에서 강한 자기 쌍극자 성분을 보여주는 것이다.
- [0088] 도 5는 키리가미 메타물질의 스펙트럼 반응이 다양한 스텝 높이에 따라 어떻게 변화하는지 보여주는 것이다.
- [0089] 도 5의 (a)는 수직 절단 키리가미 메타물질 구조체를 나타낸 것으로, 점선 부분이 절단 방향이다.
- [0090] 도 5의 (b) 및 (c)는 수직 절단에 대한 측정 및 시뮬레이션 전송 스펙트럼으로, 키리가미 계단 높이 H는 0(평평한)에서 10mm까지 다양하고, (c)에서 점선과 작은 글자 a 및 b는 추가 Fano 유형 공명을 나타낸 것이다.
- [0091] 예를 들어, (b)의 점선에서와 같이, 고도로 비대칭적인 Fano lineshape의 큰 스펙트럼 이동은 또한 방사선 방향의 상당한 제어를 가능하게 한다.
- [0092] 도 5의 (d)는 수평 절단 키리가미 메타물질, (e) 및 (f) 수평 절단에 대한 측정 및 시뮬레이션 전송 스펙트럼이다.
- [0093] 도 5의 (b)(c)는 수직 절단에 대해 측정된 시뮬레이션된 전송 스펙트럼을 나타낸 것으로, Fano 공명은 실험과

시뮬레이션 모두에서 스텝 높이가 증가함에 따라 점진적인 적색 편이를 나타낸다.

- [0094] 그러나 도 5의 (e)(f)에서와 같이, 수평 절단은 현저히 다른 움직임을 나타낸다. 수평 절단의 전체 공명 이동은 수직 절단의 공명 이동보다 훨씬 작고, 스텝 높이가 증가하면 처음에는 약간의 청색 편이가 있고 그 다음에는 적색 편이가 있다. 수평 절단의 경우 선폭 변화도 명확하게 나타나고 처음에는 감소한 다음 증가한다.
- [0095] 도 6은 자기 및 전기 쌍극자 커플링(dipolar coupling)으로 인한 스펙트럼 편이 분석을 위한 구성도이다.
- [0096] 도 6의 (a)는 수직 및 수평 절단에 관한 쌍극자 커플링의 비교를 나타낸 것으로, 두 경우 모두, 자기 쌍극자가 횡 방향으로 연결된다.
- [0097] 그러나 전기 쌍극자는 x 방향에서 횡방향으로 연결되는 반면, y 방향에서 길이 방향으로 연결된다.
- [0098] 그리고 수직 절단에서, x 방향에서 횡방향으로 결합된 전기 쌍극자는 공간에서 분리된다. 수평 절단에서, y 방향에서 길이 방향으로 결합된 전기 쌍극자는 공간에서 분리된다.
- [0099] 도 6의 (b)는 분석 모델로부터의 스텝 높이의 함수로서의 공진 주파수를 나타낸 것으로, 수직 및 수평 절단에 대한 공명 주파수를 나타낸다(H : 수평 절단, V : 수직 절단).
- [0100] 시뮬레이션(원)과 실험(교차) 결과도 함께 표시되고, 분석 방정식에 더 잘 맞도록, 음영 영역에서 더 많은 시뮬레이션 데이터 포인트를 얻는다.(작은 스텝 높이, $H = 0 \sim 2\text{mm}$)
- [0101] 도 5의 스펙트럼 특성을 이해하기 위해 쌍극자 커플링을 기반으로 하는 분석 모델을 고려한다.
- [0102] Fano 공명 주파수에서의 비대칭 분할 링 공진기는 자기 쌍극자 모멘트 M_z 와 전기 쌍극자 모멘트 P_y 를 모두 유지한다.
- [0103] 인접 단위 셀에서 이러한 쌍극자 사이의 횡방향 및 종방향 커플링은 스펙트럼 적색 편이 또는 청색 편이를 초래할 수 있음을 보여준다.
- [0104] 본 발명에서는 준 정적 근사(quasi static approximation)에서 가장 가까운 이웃 커플링을 고려한다.
- [0105] 인접한 쌍극자 사이의 상호 작용 에너지를 계산함으로써, 수직 및 수평 절단을 위한 라그랑지안 L 은 전하 Q 를 일반화된 좌표로 사용하여 얻을 수 있다.
- [0106] 키리가미 기하학에 의해 유도된 상호 작용 에너지의 변화를 고려하기 위해 기하학적 요소가 도입된다.
- [0107] 도 6의 (a)에서와 같이, 키리가미 메타물질의 수직 및 수평 절단은 이웃하는 유닛 셀 사이의 쌍극자 결합을 위한 상이한 구성을 생성한다.
- [0108] 두 경우 모두, 모든 자기 쌍극자가 평면(즉, z 방향)을 향하지 않기 때문에 자기 쌍극자는 횡방향으로 결합된다.
- [0109] 그러나 전기 쌍극자는 평면에 있고, 그것들은 x 방향에서 횡방향으로 연결되고 y 방향에서 종방향으로 연결된다.
- [0110] 수직 절단(즉, y 방향으로 절단하고 x 방향에서 스텝 높이를 생성)에서, x 방향으로 횡방향으로 결합된 전기 쌍극자는 공간에서 분리된다.
- [0111] 수평 절단에서, y 방향에서 종방향으로 결합된 전기 쌍극자는 공간에서 분리된다.
- [0112] 이웃하는 셀들 사이의 쌍극자 커플링의 차이 때문에, 본 발명에서는 수직 및 수평 절단을 위해 다른 라그랑지안을 갖는다.
- [0113] 각 경우에 대해 Lagrange 방정식을 풀면 다음과 같은 공명 주파수를 얻는다.

수학식 1

$$w_V = w_0 \frac{\sqrt{1 + \frac{2k_e}{(P^2 + H^2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{4k_e}{P^3}}}{\sqrt{1 - 2k_h \left[\frac{1 - 3 \sin^2 \theta_0}{(P^2 + H^2)^{\frac{3}{2}}} \right] - \frac{2k_h}{P^3}}}$$

(for vertical cut)

[0114]

수학식 2

$$w_H = w_0 \frac{\sqrt{1 + \frac{2k_e}{P^3} - \frac{2k_e(3 \cos^2 \theta_0 - 1)}{(P^2 + H^2)^{\frac{3}{2}}}}}{\sqrt{1 - 2k_h \left[\frac{1 - 3 \sin^2 \theta_0}{(P^2 + H^2)^{\frac{3}{2}}} \right] - \frac{2k_h}{P^3}}}$$

(for horizontal cut)

[0115]

[0116] 여기서, P는 x와 y 방향 모두에 대한 단위 셀 사이의 주기이고, H는 키리가미 스텝 높이, w_0 는 단일 공진기의 공진 주파수, θ_0 는 키리가미 각도이고, k_e 및 k_h 는 각각 전기 및 자기 쌍극자에 대한 결합 강도이다.

[0117] 메인 Fano 스펙트럼의 적색 편이 이외에도 도 5(b)와 도 5(c)에 나타난 것과 같이 8GHz와 11.5GHz의 수직 절단에 대해 비대칭 선 모양을 가진 추가 공명이 나타난다.

[0118] 이러한 Fano 유형 공명에서, 작은 스텝 높이(예 : H = 2mm)에서 급격한 공명이 갑자기 나타나고 스텝 높이가 증가함에 따라 점차 넓어지고, 공명이 넓어 지지만 공진 강도는 오히려 증가한다.

[0119] 공명 선명도와 강도의 이러한 절충은 다양한 Fano 공명 구조에서 널리 관찰된다.

[0120] 이러한 추가 공진에서 시뮬레이션된 전류 분포는 이러한 추가 피크의 원점을 설명한다. 8GHz 및 11.5 GHz에서, 비대칭 전류 분포는 인접한 단위 셀들 사이에 나타난다.

[0121] 8GHz에서 반대 방향의 전류 루프는 z 방향의 위쪽 및 아래쪽 단위 셀에 대해 시계 반대 방향 및 시계 방향 루프로 나타난다.

[0122] 11.5 GHz에서는 전류 루프 대신 2 개의 쌍극자 전류가 각 단위 셀에 나타나지만, 인접한 상부 및 하부 단위 셀의 전류는 위상이 다르다.

[0123] 8GHz 및 11.5 GHz의 전류 분포는 모두 평평한 구조로 존재할 수 없지만 유한 키리가미 스텝 높이를 사용하여 만들 수 있다.

[0124] 도 7 및 도 8은 키리가미 메타물질의 상 소용돌이 및 특이성을 나타낸 시뮬레이션 구성 및 결과이고, 도 9는 광학 감지를 위한 위상 특이성을 나타낸 그래프이다.

[0125] 본 발명은 파노 공명 메타물질(Fano-resonant metamaterials)을 종이에 인쇄한 후 한 줄씩 자르고 키리가미 스타일로 접는다.

[0126] 이러한 키리가미 메타물질은 강력한 공명 튜닝 및 스위칭을 가능하게 한다.

[0127] 또한, Fano 공명 스펙트럼의 제로 진폭 위치에서 위상 특이점이 발견되고, 한 쌍의 위상 소용돌이(pair of phase vortices)가 파라미터 공간에 나타난다.

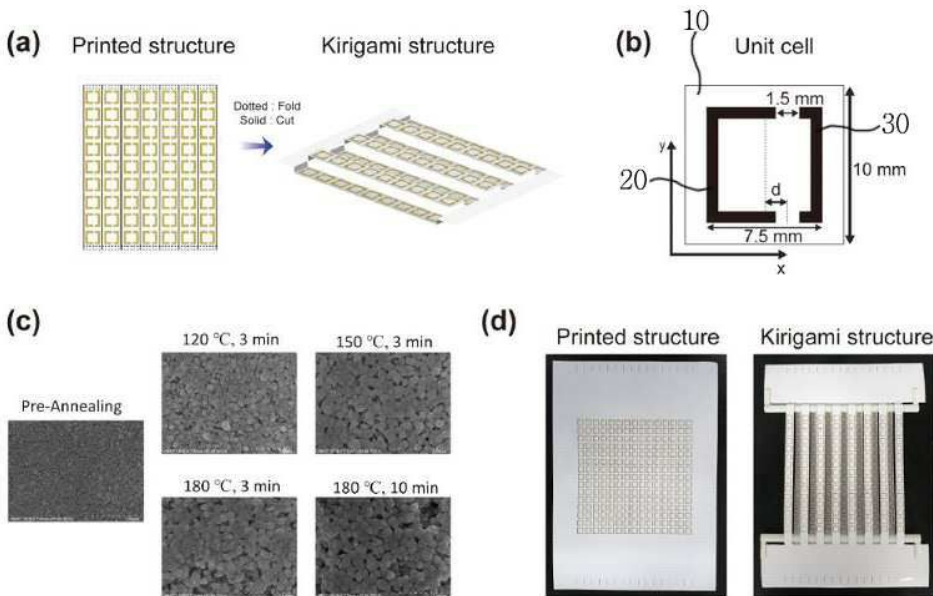
- [0128] 특이점 주위의 급격한 위상 변화는 광학 감지 및 다양한 파면 조작에 유용할 수 있다.
- [0129] Fano 공명은 파괴적인 간섭을 통해 반사 및 투과 스펙트럼에서 제로 진폭 위치를 생성할 수 있다.
- [0130] 본 발명에 따르면 실험(도 5)에서 단일 레이어 구조로 거의 제로 전송이 이루어졌다. 진폭이 0인 위상은 단일 값으로 정의되지 않으므로 이 진폭이 0인 포인트는 위상 특이성을 생성한다.
- [0131] 다양한 스텝 높이를 가진 본 발명에 따른 키리가미 메타물질은 이러한 특이점을 통한 위상 제어를 위한 추가 조정 기능을 제공한다.
- [0132] 본 발명에 따른 실험에서는 벡터 네트워크 분석기로 복잡한 S 파라미터를 직접 측정하였다. 따라서, 전송 위상도 크기와 함께 측정될 수 있다.
- [0133] 메타물질 공명 효과를 보다 명확하게 관찰하기 위해 원시 상 데이터(raw phase data)로부터 전파 상(propagation phase)을 차감하였다. 전파 상은 소스와 검출기 사이의 거리에 비례하며 메타물질 샘플과의 전자기 상호 작용과 관련이 없다.
- [0134] 도 8과 같이 음의($H = 0\text{mm}$) 기울기에서 양의($H = 4\text{mm}$) 기울기로 그리고 음의($H = 10\text{mm}$) 기울기로 다시 급격한 변화가 발생한다.
- [0135] 수평 절단에 대한 이 위상 거동은 파라미터 공간의 위상 소용돌이에서 이해할 수 있다.
- [0136] 도 7에서처럼 $H = 2\text{mm}$ 및 6mm 의 스텝 높이 근처에서 두 개의 투과 최소값이 명확하게 보인다. 해당 위상 맵은 한 쌍의 위상 소용돌이를 보여준다.
- [0137] 제로 전송 점 주위에서 위상은 0에서 2π 로 회전하고 소용돌이를 형성한다.
- [0138] 스텝 높이에 따라 전송 단계는 음 또는 양의 기울기를 나타낼 수 있다.
- [0139] 키리가미 스텝 높이 H 가 두 소용돌이 사이에 위치하면 위상은 양의 기울기로 매우 큰 변화 (2π 에 가까움)를 나타내고, 다른 경우에, 위상은 스펙트럼에서 음의 기울기를 나타낸다. 이 시뮬레이션 결과는 실험과 잘 일치하는 것을 알 수 있다.
- [0140] 이상에서 설명한 본 발명에 따른 키리가미 구조 기반 가변형 전자기 메타물질 구조체 및 그의 제조 방법은 종이에 금속 잉크 인쇄를 사용하여 용이하고 저렴한 제조 공정으로 조정 가능하고 재구성 가능한 메타물질을 구현할 수 있도록 한 것이다.
- [0141] 이상에서의 설명에서와 같이 본 발명의 본질적인 특성에서 벗어나지 않는 범위에서 변형된 형태로 본 발명이 구현되어 있음을 이해할 수 있을 것이다.
- [0142] 그러므로 명시된 실시 예들은 한정적인 관점이 아니라 설명적인 관점에서 고려되어야 하고, 본 발명의 범위는 전술한 설명이 아니라 특허청구 범위에 나타나 있으며, 그와 동등한 범위 내에 있는 모든 차이점은 본 발명에 포함된 것으로 해석되어야 할 것이다.

부호의 설명

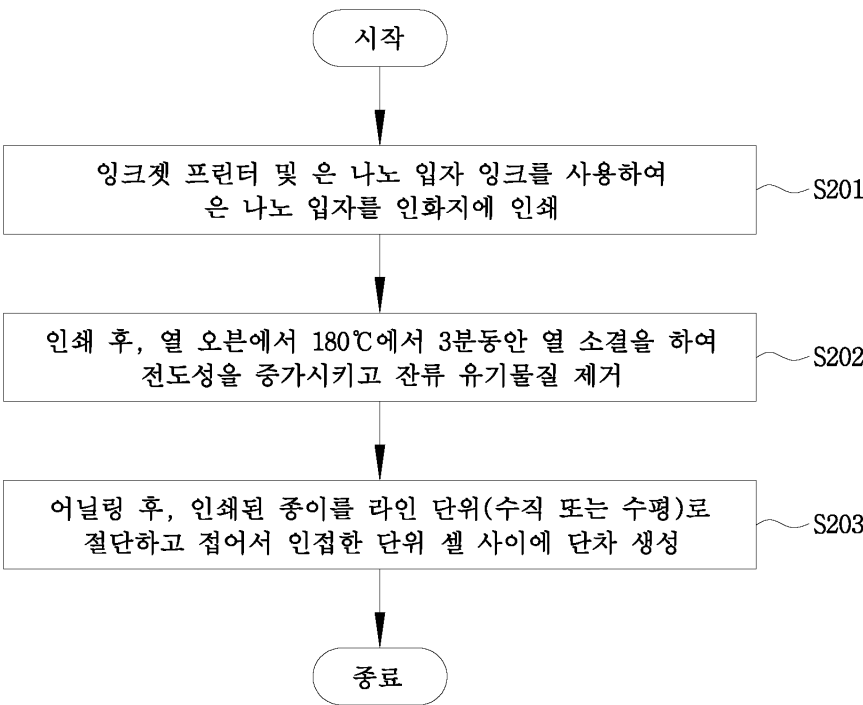
- [0143] 10. 단위 셀
20. 단위 셀 제 1 라인
30. 단위 셀 제 2 라인

도면

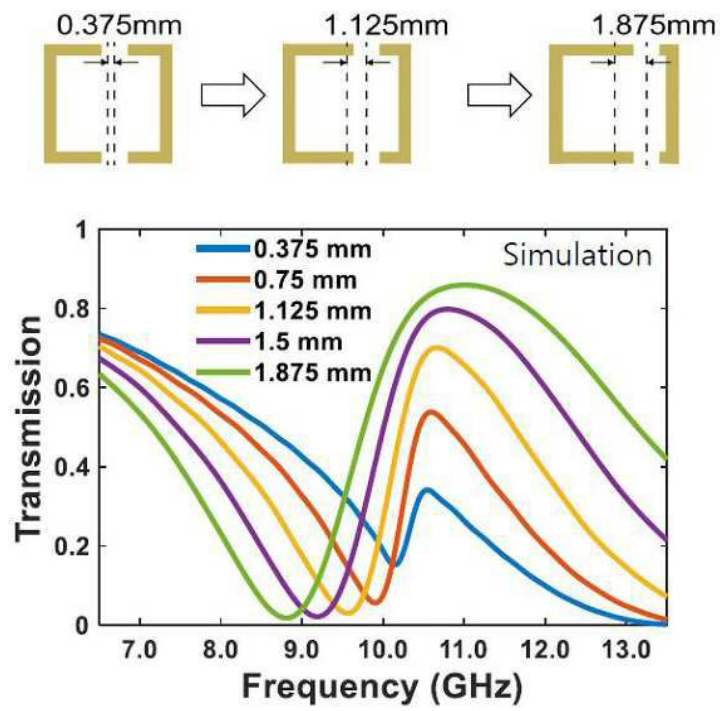
도면1



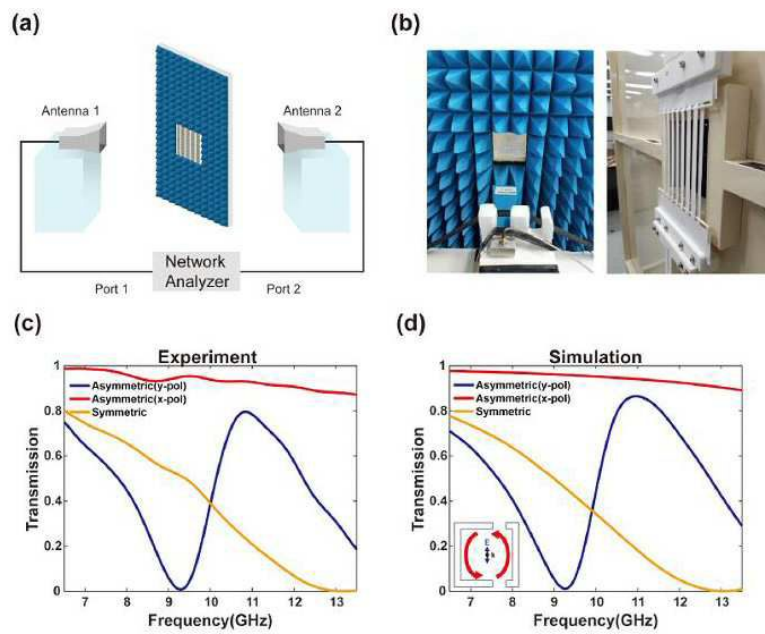
도면2



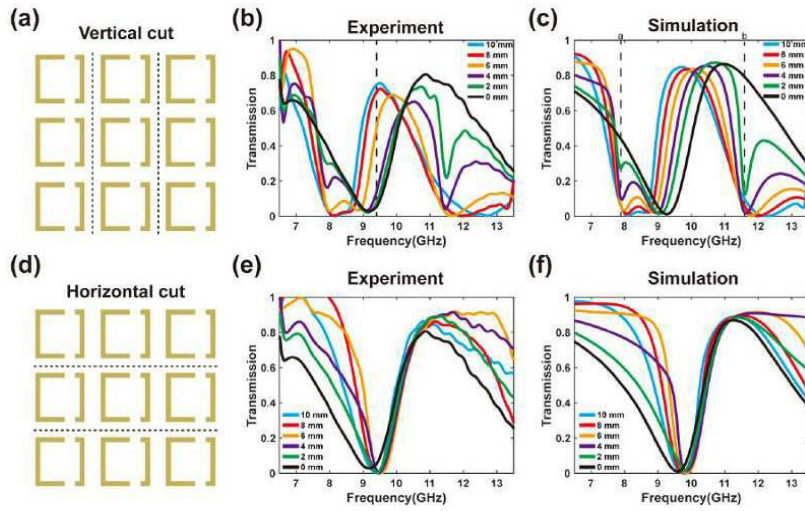
도면3



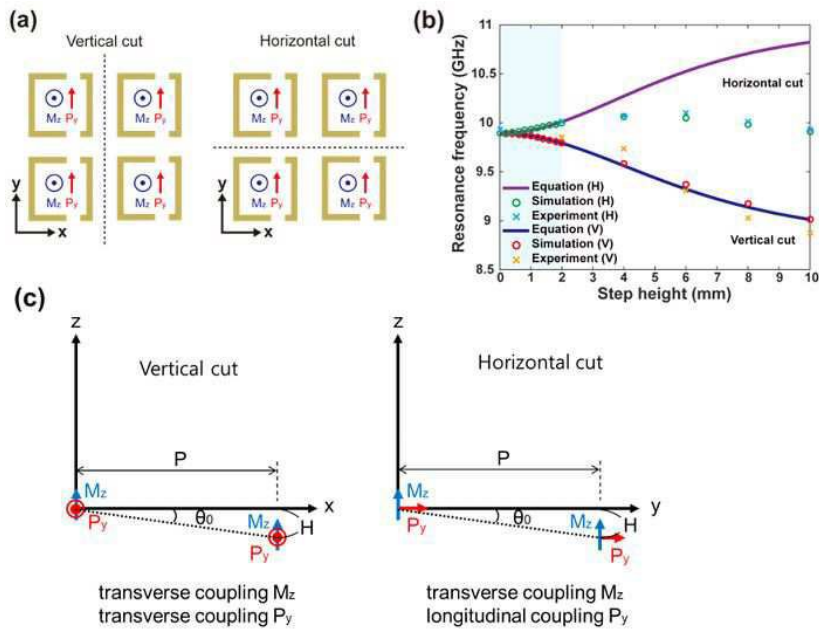
도면4



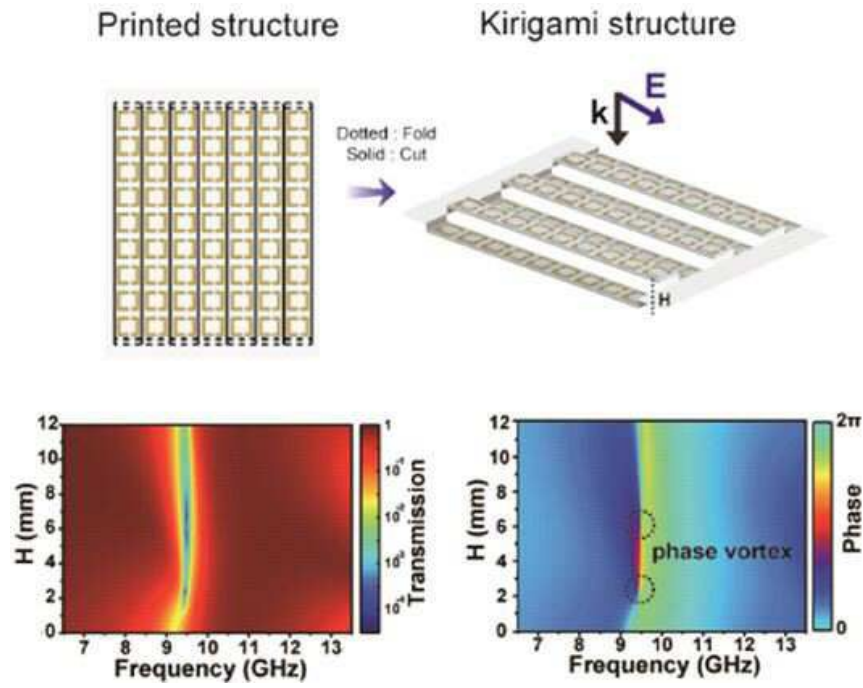
도면5



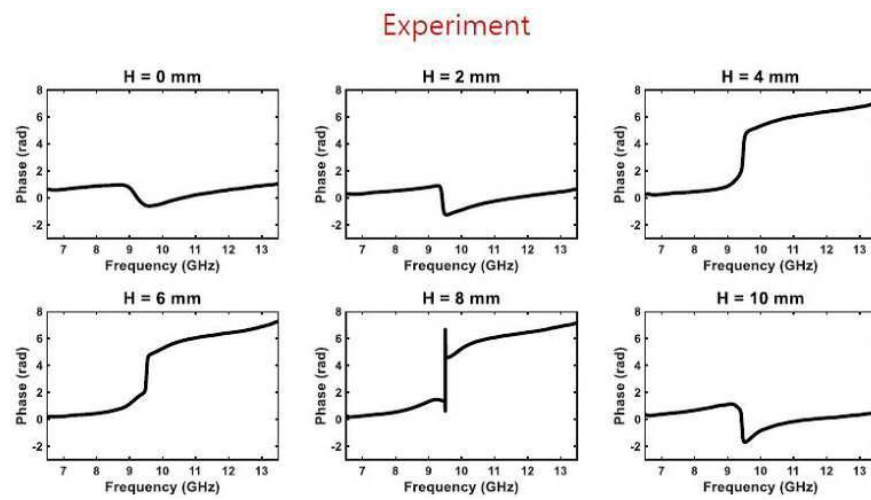
도면6



도면7



도면8



도면9

