



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2013년04월02일
(11) 등록번호 10-1250059
(24) 등록일자 2013년03월27일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G02B 3/00 (2006.01)
(21) 출원번호 10-2007-7004455
(22) 출원일자(국제) 2005년07월22일
심사청구일자 2010년07월08일
(85) 번역문제출일자 2007년02월23일
(65) 공개번호 10-2007-0050051
(43) 공개일자 2007년05월14일
(86) 국제출원번호 PCT/US2005/026052
(87) 국제공개번호 WO 2006/023195
국제공개일자 2006년03월02일
(30) 우선권주장
60/590,702 2004년07월23일 미국(US)
(56) 선행기술조사문헌
Shelby, R. A. et al. Science. April 2001,
Vol. 292, pp. 77-79..
US20010038325 A1

(73) 특허권자
더 리첸트스 오브 더 유니버시티 오브 캘리포니아
미합중국 캘리포니아주 94607-5200 오클랜드 프랭클린 스트리트 1111

(72) 발명자
스미스 데이비드 알.
미국 노스캐롤리나주 27707 더햄 이비 메도우 레인 706
슈리그 데이비드
미국 노스캐롤리나주 27705 더햄 네웰 스트리트 108
(뒷면에 계속)

(74) 대리인
강승욱, 김성기

전체 청구항 수 : 총 6 항

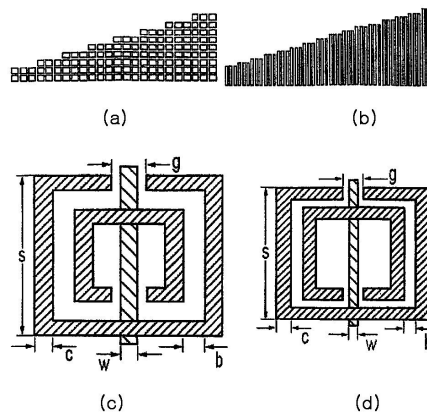
심사관 : 김기현

(54) 발명의 명칭 메타물질

(57) 요약

예시적인 일 메타물질은 복수개의 개별 단위 셀들로부터 형성되는데, 그것의 적어도 일부는 다른 것들과는 상이한 투자율을 가진다. 복수개의 개별 단위 셀들은, 하나 이상의 축을 따라 구배 인덱스를 갖는 메타물질을 제공하도록 정렬된다. 그러한 메타물질들은, 예를 들어, 렌즈들을 형성하는데 사용될 수 있다.

대표도 - 도1



(72) 발명자

스타르 안토니 에프.

미국 캘리포니아주 92130 샌 디에고 코르테 페이버
4271

목크 잭 제이.

미국 노스캐롤리나주 27705 더햄 네웰 스트리트
108

특허청구의 범위

청구항 1

구배 인덱스(n)를 가진 메타물질 렌즈로서,

소자들의 하나 이상의 격자를 지지하며 메타물질을 형성하도록 구성된 유전체 호스트를 포함하고, 상기 유전체 호스트 및 상기 소자들의 격자는 하나 이상의 축을 따라 변화하는 유효 인덱스를 제공하도록 그리고 상기 메타물질에 입사하는 전자기 방사선을 포커싱하도록 정렬되어 있는 것인 메타물질 렌즈.

청구항 2

삭제

청구항 3

삭제

청구항 4

삭제

청구항 5

삭제

청구항 6

삭제

청구항 7

삭제

청구항 8

삭제

청구항 9

삭제

청구항 10

삭제

청구항 11

제 1 항에 있어서,

상기 메타물질은 대향하는 2개의 평평한 표면들을 포함하고, 상기 유전체 호스트는 유전체 기관을 포함하며, 상기 소자들의 격자는 복수개의 분할 링 공진기들을 포함하고, 상기 복수개의 분할 링 공진기들 중 적어도 일부는 상기 복수개의 분할 링 공진기들 중 다른 것들과는 상이하게 치수화되어 있는 것인 메타물질 렌즈.

청구항 12

제 1 항에 있어서,

상기 유전체 호스트는 기관을 포함하고, 상기 소자들의 격자는 복수개의 도체들을 포함하며, 상기 메타물질은 대향하는 2개의 평평한 표면들을 더 포함하고,

상기 유전체 기관 및 복수개의 도체들은 상기 대향하는 표면들의 중앙 부분에서 최대 인덱스(n)를 제공하도록 그리고 상기 중앙 부분으로부터 바깥쪽으로 방사상으로 이동하면서 점진적으로 감소하는 인덱스(n)를 제공하도록

록 정렬되어 있는 것인 메타물질 렌즈.

청구항 13

제 1 항에 있어서,

상기 유전체 호스트는 대향하는 2개의 평평한 표면들을 가진 하나 이상의 유전체 기관층을 포함하고,

상기 소자들의 격자는 상기 대향하는 2개의 평평한 표면들에 수직하게 상기 하나 이상의 유전체 기관층에 복수개의 통로들로 형성된 복수개의 제 1 도체들을 포함하는 것인 메타물질 렌즈.

청구항 14

삭제

청구항 15

삭제

청구항 16

삭제

청구항 17

삭제

청구항 18

삭제

청구항 19

삭제

청구항 20

삭제

청구항 21

삭제

청구항 22

삭제

청구항 23

삭제

청구항 24

삭제

청구항 25

제 1 항에 있어서,

상기 소자들의 격자가 매입된 하나 이상의 전기 부품으로서, 상기 부품은 커패시터, 다이오드, 증폭기, 트랜지스터, 인덕터, 레지스터, 또는 FET 중 하나 이상을 포함하는 것인 하나 이상의 전기 부품을 더 포함하는 것인 메타물질 렌즈.

청구항 26

제 25 항에 있어서,

상기 하나 이상의 격자는 갭을 가진 링 공진기를 포함하고, 상기 하나 이상의 전기 부품은 상기 갭에 커패시터를 포함하는 것인 메타물질 렌즈.

청구항 27

삭제

명세서

기술분야

[0001] 본 발명의 분야는 메타물질들이다. 본 발명의 다른 분야는 복합 메타물질들이다. 본 발명의 또 다른 분야는 렌즈들 및 광학이다. 본 발명의 또 다른 분야는 자기학이다.

배경기술

[0002] 본 발명자들 및 그들의 동료들에 의한 것들을 포함하여, 앞서 관찰되지 않았거나 전통적인 물질들로는 실현하기 어려운 전자기 물질 응답(electromagnetic material response)이 여기에서 메타물질들(metamaterials)이라고 칭하는 인공적으로 구조화된 물질들(artificially structured materials)로 획득되었다는 증명들이 있어 왔다. 이례적인 메타물질 응답의 일례는, 유한 주파수 대역에 걸쳐 동시에 음의 유전율(ϵ)(permittivity) 및 투자율(μ)(permeability)을 소유하는 음의 인덱스 메타물질들에서 찾아볼 수 있다. 음의 인덱스는 기존 물질들에서는 이용 불가능한 물질 특성이므로, 음 굴절의 기본적인 특징이, 메타물질들이 재료 물리학에서 수행할 수 있는 핵심 역할을 드러내어 왔다.

[0003] 물질 응답의 일반적인 설명은, ϵ 및 μ 를 위해 다음의 주파수 분산 형태들(frequency dispersive forms)들을 유도하는 드루드-로렌츠(Drude-Lorentz) 모델에서 찾아볼 수 있다:

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2 - \omega_{0e}^2 + i\Gamma_e \omega}$$

$$\mu(\omega) = 1 - \frac{\omega_{pm}^2}{\omega^2 - \omega_{0m}^2 + i\Gamma_m \omega}$$

[0006] 이 형태들 또는 아주 유사한 표현들이, 전통적인 물질 응답 뿐만 아니라 인공적으로 구조화된 메타물질들의 응답도 설명하는 것으로 알려져 있다. 공진 주파수(resonant frequency)(ω_{0e} 또는 ω_{0m})를 초과하는 주파수들에서, ϵ 이나 μ 중 어느 하나는 음의 값들을 가질 것이다.

[0007] 메타물질들은, 등가의 기존 물질들이 존재하지 않는 전기나 자기 공진들 중 하나를 갖도록 설계될 수 있다. 전기 및 자기 공진들은 임의 주파수에서 메타물질 구조들에 배치될 수 있다. 특히, 전기 및 자기 구조들을 조합하는 것에 의해, ϵ 및 μ 모두가 동시에 음인 주파수 대역을 가진 물질에 도달할 수 있다. 곱($\epsilon \mu$)의 제곱근을 취하는 것에 의해 판정되는, 그러한 물질을 위한 굴절 인덱스(n)는, 그 물질이 방사선(radiation)에 투명하다는 것을 지시하는 실수이다. 그러나, ϵ 및 μ 모두가 음일 경우, 제곱근의 부호를 위한 정확한 선택은 음이라고 알려져 있다. 따라서, ϵ 및 μ 모두가 음인 물질들 또한 음의 인덱스 물질들(NIMs: negative index materials)로서 특성화할 수 있다.

[0008] 종래 기술 메타물질들은 분할 링(split ring) 공진기들의 어레이를 구성하는 거시적 셀들의 집합을 포함한다. 이 일례들은 본 발명자들 및 그들의 동료들 중 일부에 의한 선행 작업에서 설명된다. "Left Handed Composite Media"라는 명칭으로 2001년 3월 16일에 출원된, 미국특허공개 US-2001-0038325-A1호 및 출원 연속 번호 09/811,376호 또한 여기에 참고 문헌으로써 포함되어 있다.

[0009] 음의 굴절 인덱스 물질의 증명은 음의 굴절 인덱스 물질들에 의해 소유될 특성들에 관한 다양한 이론들을 확인하여 왔다. 기본적인 물리 설명들로서 재고되어야 하는 다수의 기본적인 전자기 및 광학 원리들은 항상 오른손 자기 물질들(right handed magnetic materials) 및 양의 굴절 인덱스들을 고려하였다.

발명의 상세한 설명

- [0010] 발명의 개요
- [0011] 여기에서는 일부 발명 사양들의 요약이 제공되어 발명의 소정 태양들을 강조할 것이다. 여기에 첨부된 바람직한 실시예 설명에서, 추가적 발명 사양들이 발견될 수도 있다. 본 발명의 일부 실시예들에서, 메타물질들은 광학 효과들을 실현하도록 구성된다. 여기에서 사용되는 광학 및 광학 효과들은 가시 파장들 뿐만 아니라 전자기 파들의 조작을 포함한다. 본 발명의 실시예에서, 음의 인덱스 메타물질들은 음의 인덱스 렌즈들을 생산하도록 최적화된다. 본 발명의 다른 실시예에서, 메타물질들은 회절성 광학 장치들을 형성하도록 변경된다. 본 발명의 다른 실시예에서, 메타물질들은 구배 인덱스 광학 장치들(*gradient index optical devices*)을 형성하도록 변경된다.
- [0012] 본 발명의 실시예들에서, 광학 장치들은 스케일링될 수 있는 효과들을 가진다. 스케일링은, 음의 인덱스 렌즈들, 회절성 광학 장치들, 및 광범위한 주파수들에 걸친, 즉, 낮은 (RF, 마이크로파) 주파수들에서부터 높은 (mm, THz) 주파수들에 걸친 구배 인덱스 광학 장치들을 포함하는, 메타물질들을 가공하는데 사용될 수 있다. 본 발명의 음의 인덱스 메타물질 렌즈들은 양의 인덱스 렌즈들에 비해 감소된 수차들(*aberrations*)을 나타낸다. 본 발명의 예시적 실시예의 음의 인덱스 메타물질의 평요(*planoconcave*) 렌즈의 경우, -0.61 의 인덱스 값이 수차들을 최소화한다. 본 발명의 예시적 메타물질들은 거시적 셀들로부터 형성되므로 그리고 물리적 특징들(치수들, 유전체 물질의 유형, 상대적 위치들, 지오메트리 등)은 달라질 수 있기 때문에, 다른 음의 인덱스 렌즈들에서의 그리고 본 발명의 장치들에서의 광학 효과들을 일반적으로 최적화할 수 있다. 이 효과들은 THz 및 그 이하에서 좀더 쉽게 실현되지만, 메타물질들의 특징은 가시 파장들에서의 광학 효과들의 실현도 허용할 것이다.
- [0013] 본 발명의 예시적 메타물질들은 복수개의 거시적(*macroscopic*) 셀들에 의해 형성된다. 이는 광학 및 다른 장치들의 형성에 다수 이점들을 제시한다. 본 발명의 회절성 광학 장치들의 경우, 메타물질의 표면 프로파일은 좀더 넓은 주파수 대역폭(좀더 낮은 색수차) 및 다른 이점들을 발생시키는 회절성 표면으로써 조정된다. 메타물질의 특성들이 셀 단위로(*cell-by-cell*) 조정되어 구배 인덱스 렌즈를 발생시킬 수도 있다. 구배 인덱스 렌즈들은 다수의 광학 애플리케이션들에 사용된다. 메타물질들은, 인덱스 프로파일이 포커싱, 빔 조정, 빔 정형 또는 다른 광학 기능성을 제공하기 위한 필요에 따라 구체적으로 조정될 수 있다는 이점들을 제공한다. 메타물질들은 거시적 셀들에 기초하기 때문에, 물질의 셀 단위에 기초한 능동 제어 및 튜닝이 실현될 수도 있다. 능동 전자 장치들에 의해 또는 전기 기계 장치들에 의해 구현될 수 있는 이 제어를 구배 인덱스 개념과 조합하면, 적응적 광학 장치들이 실현될 수 있다.
- [0014] 도면의 간단한 설명
- [0015] 도 1은 본 발명의 예시적 메타물질의 다양한 관점들을 예시한다.
- [0016] 도 2는 본 발명의 예시적 메타물질의 특성들을 예시하는데 유용하다.
- [0017] 도 3은 본 발명의 예시적 메타물질의 특성들을 예시하는데 유용하다.
- [0018] 도 4는 본 발명의 예시적 메타물질의 특성들을 예시하는데 유용하다.
- [0019] 도 5는 본 발명의 예시적 메타물질의 특성들을 예시하는데 유용하다.
- [0020] 도 6은 본 발명의 예시적 메타물질의 특성들을 예시하는데 유용하다.
- [0021] 도 7은 본 발명의 예시적 메타물질의 특성들을 예시하는데 유용하다.
- [0022] 도 8은 본 발명의 예시적 메타물질의 특성들을 예시하는데 유용하다.
- [0023] 도 9는 본 발명의 예시적 메타물질의 특성들을 예시하는데 유용하다.
- [0024] 도 10은 본 발명의 예시적 메타물질의 특성들을 예시하는데 유용하다.
- [0025] 도 11은 본 발명의 예시적 메타물질의 특성들을 예시하는데 유용하다.
- [0026] 도 12는 본 발명의 예시적 메타물질의 특성들을 예시하는데 유용하다.
- [0027] 도 13은 본 발명의 예시적 메타물질의 특성들을 예시하는데 유용하다.
- [0028] 도 14는 본 발명의 예시적 메타물질의 특성들을 예시하는데 유용하다.
- [0029] 도 15는 본 발명의 예시적 메타물질을 예시한다.

- [0030] 도 16은 본 발명의 예시적 메타물질질을 예시한다.
- [0031] 도 17은 본 발명의 예시적 메타물질질의 특성들을 예시하는데 유용하다.
- [0032] 도 18은 본 발명의 예시적 메타물질질의 특성들을 예시하는데 유용하다.
- [0033] 도 19는 본 발명의 예시적 메타물질질의 특성들을 예시하는데 유용하다.
- [0034] 도 20은 본 발명의 예시적 메타물질질을 예시한다.
- [0035] 도 21은 본 발명의 예시적 메타물질질의 태양을 개략적으로 예시한다.
- [0036] 도 22는 본 발명의 예시적 메타물질질의 태양을 개략적으로 예시한다.
- [0037] 도 23은 예시적 발명의 예시적인 모듈식 메타물질질을 예시한다.
- [0038] 도 24는 본 발명의 다양한 메타물질질들에서 유용한 도체 공진기들을 개략적으로 예시한다.
- [0039] 도 25는 본 발명의 메타물질질을 제조하는 예시적 방법을 개략적으로 예시한다.
- [0040] 도 26은 본 발명의 예시적 메타물질질을 예시하는데 유용하다.
- [0041] 도 27은 본 발명의 예시적 메타물질질을 예시하는데 유용하다.
- [0042] 도 28은 본 발명의 예시적 메타물질질의 특성들을 예시하는데 유용하다.
- [0043] 도 29는 본 발명의 예시적 메타물질질의 특성들을 예시하는데 유용하다.
- [0044] 도 30은 본 발명의 예시적 메타물질질의 특성들을 예시하는데 유용하다.
- [0045] 도 31은 본 발명의 예시적 메타물질질의 태양을 개략적으로 예시한다.
- [0046] 발명을 실시하기 위한 가장 바람직한 양태
- [0047] 본 발명의 실시예들은, 고유한 전자기 장치들 뿐만 아니라 새로운 물리적 및 광학적 거동을 가능하게 하는, 메타물질 특성들의 범위를 상당히 연장하는 다양하고 새로운 메타물질질들에 관한 것이다. 메타물질질은 하나 이상의 치수들로 패터닝되는 복수개의 소자들(elements)을 포함하는 인공적으로 구조화된 물질인데, 각 소자는 파 전파 방향의 입사 파장 미만의 또는 입사 파장 정도의 물리적 치수들을 갖고, 각 소자는 인가된 전자기 필드에 대한 응답에서 소정의 전기 및 자기 편광들을 나타내도록 구성된다. 다수의 (그러나 전부는 아닌) 메타물질질들에서, 소자들은 도체들로부터 제조되어 유전체 기판에 의해 지지된다. 소자들의 바람직한 일례들은 직선 와이어 도체들의 격자들과 및 분할 링 공진기들의 격자들을 포함한다.
- [0048] 여기에서 사용되는 바와 같이, "유전체 기판(또는 호스트)에 의해 지지되는"이라는 항목에서 사용되는 "지지되는"이라는 용어는 광범위하게 해석되어야 하고, 기판의 표면에 고정되는 것으로 제한되지 않는다. 도체는, 예를 들어, 유전체 기판내에 포함되거나 매입될 수 있고, 유전체 기판에 의해 "지지될" 수 있다. 여기에서 사용되는 "유전체(dielectric)" 및 "유전체 호스트(dielectric host)"라는 용어들은, 유전 상수가 약 +1 이상인 그리고 바람직하게는 +1보다 큰 전기 절연 물질을 광범위하게 언급하기 위한 것이다. 유전체 호스트는 공기와 같은 가스일 수 있거나, 유전 중합체, 유리, 석영 등과 같은 기판일 수 있다.
- [0049] 예시적인 메타물질질들은 도체들과 같은 동일 소자들의 반복되는 단위 셀들(즉, 주기적 구조)을 지지하는 유전체 호스트로 이루어진다. 예시적인 다른 메타물질질들은 유전율(permittivity), 투자율(permeability), 굴절 인덱스(refractive index) 또는 파 임피던스(wave impedance)의 유효 매체 파라미터들 중 하나 이상에서 구배(gradients)를 발생시키도록 설계된 소자들의 이중 집합으로부터 형성될 수도 있다.
- [0050] 본 발명은 특정 기능들을 실현하도록 설계된 메타물질질들에 관한 것이다. 예를 들어, 본 발명의 실시예들은 인덱스에서 공간적 변화를 나타내도록 설계된 메타물질질들에 관한 것이다. 본 발명의 다른 실시예들은 메타물질질들을 가공하기 위한 방법들에 관한 것이다. 본 발명의 실시예들은, 다른 것들 중에서도, 광학 및 렌즈들의 분야들에서 유용한 애플리케이션들을 발견할 수 있다. 여기에서 사용되는 바와 같이, "광학" 및 "렌즈들"이라는 용어는 광범위하게 해석되어야 하고 광 파장들에서만 동작 가능한 장치들로 제한되지 않는다는 것을 알 수 있을 것이다. "렌즈"는, 예를 들어, 가시적 주파수에 해당되지 않는 전자기파들을 조작하는데 유용한 장치를 포함할 수도 있다. 메타물질 렌즈들을 포함하는, 본 발명의 예시적 메타물질질들은 전파 중인 자유 공간파들과 상호 작용하고, 임의의 치수로 제한되지 않는다.

- [0051] 본 발명은 다음에서 논의되는 예시적 실시예들을 통해 추가적으로 논의되고 설명될 수 있다.
- [0052] A. 음의 인덱스 메타물질 표면상의 격자로부터 향상된 회절
- [0053] 본 발명의 일 태양은 굴절 및 회절을 튜닝하도록 최적화된 표면 특징들을 가진 음의 인덱스 물질들에 관한 것이다. 회절된 빔들의 커플링은 양 및 음의 인덱스 물질 사이의 인터페이스에서 향상된다는 것이 밝혀졌다. 회절성 광학 장치들은 본질적으로 패터닝된 격자들이기 때문에, 본 발명의 실시예들은 음의 인덱스 물질의 특정 격자를 렌즈 소자로 이용한다. 격자의 설계는 다음의 수학적 1에 기초할 수 있다. 이 관계를 사용하면, 음의 인덱스 격자 렌즈들은 전통적인 광학 방법들을 사용해 최적화될 수 있다. 본 발명의 이 실시예의 중요한 한 가지 이점은, 메타물질들을 사용하면, 효율성이 훨씬 더 크므로, 종래 기술에서 이용 가능한 것보다 훨씬 더 컴팩트한 렌즈들이 실현될 수 있다는 것이다.
- [0054] 예시적 실시예는 임의 주파수에서 적합하도록 형성된 그리고 광 또는 다른 전자기파들을 포커싱하거나 조작하도록 설계된 격자 구조(grating structure)로 고안된 음의 인덱스 물질을 포함한다.
- [0055] 음의 인덱스 메타물질 웨지(wedge) 샘플들에 대한 측정들에 의해서 뿐만 아니라 수치적 시뮬레이션도, 메타물질들에 본질적인 유한 단위-셀 사이즈(finite unit-cell size)로 인한 굴절 인터페이스의 피할 수 없는 단계화(steping)가 음으로 굴절된 빔 이외에 잘 정의된 회절 빔을 발생시킬 수도 있다는 것을 나타낸다. 회절 빔의 방향은 기본적인 회절 이론과 일치하지만, 이처럼 높은 차수 빔으로의 커플링은 양의 인덱스 물질을 위한 경우보다 훨씬 크다.
- [0056] 음의 굴절 인덱스(n)를 가진 인공 물질들의 최근 증명들은 새로운 물리적 특성을 연구하고 새로운 애플리케이션들을 개발하기 위한 이 물질들의 애플리케이션 조사를 개시하였다. 반전된 크렌코브(Cerenkov) 방사선 및 반전된 도플러(Doppler) 시프트들과 같은, 아주 색다르고 눈에 띄는 다수의 전자기 현상들이 음의 인덱스 물질들에서 발생할 것이 예상되어 왔으므로, 가장 기본적인 전자기 및 광학 현상들조차 음의 인덱스 매체들의 맥락에서 조심스럽게 재조망되어야 한다. 예를 들어, $n=-1$ 의 평면 슬랩의 상화 특성들(imaging properties)의 분석에서, 임의의 양의 인덱스 광학 부품의 해상도를 초과하는 해상도가 실현될 수 있다는 것이 예상되어 왔다.
- [0057] 전도 소자들의 2개의 산재형 격자들(interspersed lattices)로 이루어진 인공 매체가 가공되었고 음의 굴절 인덱스를 갖는 것으로 보고되었다. 도 1에 도시된 바와 같이, 이 물질로 이루어진 웨지 샘플은 음의 굴절 인덱스를 가진 물질과 동일한 방식으로 마이크로파들을 굴절시키는 것으로 증명되었다. 본 매체는, ~ 11.0 GHz에서 11.5 GHz까지의 주파수 대역에 걸쳐 동일한 음의 투자율을 제공한 전도성 분할 링 공진기들(SRRs: split ring resonators) 및 좀더 큰 중첩 주파수 범위에 걸쳐 음의 유전율의 주파수 대역을 제공한 와이어 스트립들의 2차원 배열로 이루어졌다. SRR들과 와이어 스트립들 모두는 유전체 기판에 의해 지지된다.
- [0058] 사용되는 샘플에서, 5mm의 단위 셀 사이즈는 자유 공간 파장보다 대략 6배 작았고, 그에 따라, 이 물질은 유효 매체 이론에 의해 합리적으로 특성화될 것이 예상될 수 있었다. 그러나, 유한 단위 셀 사이즈는 표면의 피할 수 없는 단계화를 초래하였고: 18.4° 의 굴절 표면을 실현하기 위해, 메타물질 표면은, 도 1(a)에서 지시되는 바와 같이, 3개 단위 셀들 \times 1개 단위 셀의 단계들로 절단되었다. 그에 따라, 결과적 표면(C) 단계화는 $\lambda/2$ 정도였다.
- [0059] 도 1(a)는 음 굴절을 증명하는데 사용되는 메타물질 웨지의 개략도이다. 이 구조는, 도면의 흰색 선들에 의해 지시되는 바와 같이, 2가지 치수들로 패터닝된다. 도 1(b)는 본 발명의 메타물질 웨지의 1개 단위 셀을 나타내는 개략도이다. 이러한 예시적 웨지는 2.5 mm의 치수를 가진 단위 셀들로 이루어지고, 지시되는 바와 같이 하나의 치수만으로 (즉, 컬럼들로서) 패터닝된다. 도 1(c)는 도 1(a)에서 사용되는, $s = 2.63$ mm, $c = 0.25$ mm, $b = 0.3$ mm, $g = 0.46$ mm, $w = 0.25$ mm의 치수들을 가진, SRR의 개략도이고; 도 1(d)는 도 1(b)의 메타물질에서 사용되는, $s = 2.2$ mm, $c = 0.2$ mm, $b = 0.15$ mm, $g = 0.3$ mm, $w = 0.14$ mm의 치수들을 가진, 본 발명의 한 단위 SRR의 개략도이다. 사용되는 유전체 기판은, 약 0.014 mm의 구리 두께를 가진, 0.25 mm 두께의 FR4 회로 보드($\epsilon = 3.8$)이다.
- [0060] 메타물질 샘플상의 표면 단계화는, 영차 회절 빔 이외에 회절 빔을 발생시킬 것이 예상될 수 있는 격자를 구성한다. 영차 및 좀더 높은 차수 빔들의 발생을 위한 조건은, 다음의 수학적 1과 같은, 주지의 격자 공식으로부터 판정될 수 있는데,

수학식 1

$$\sin \theta = \frac{m\lambda}{d} + n \sin \theta_{in}$$

[0061]

[0062]

여기에서, θ_{in} 은, 인터페이스에 수직인, 매체 면으로부터의 입사각이고, θ 는 굴절각이다. 수학식 1은 회절(제 1 항) 뿐만 아니라 굴절(제 2 항) 모두를 설명한다.

[0063]

수학식 1에 이르게 하는 기본적인 인수들로는, 입사 빔의 가능한 여러 출력 빔들의 상대적 커플링을 판정할 수 없다. 양과 음의 인텍스 물질들 사이의 격자로부터의 평면파 회절에 대한 이론적 분석은 회절 차수들로의 향상된 커플링을 예상한다. 이러한 향상된 커플링은 다음의 인수에 의해 이해될 수 있다. 주기적으로 패터닝된 표면으로의 입사파는, 인터페이스에 따른 파 벡터들이 역 격자 벡터내에서 입력파의 파 벡터(k_x)와 정합하는(즉, $k_x + m\pi/d$, 여기에서, m 은 정수) 모든 전달 및 반사파들에 커플링할 것이다. 모드들의 이 세트는 $(k_x + m\pi/d) > \omega/c$ 를 위한 지수감쇠적 성분들(evanescent components) 이외에 전파 성분들 - 영차의 반사파 및 좀더 높은 회절 차수들 - 모두를 포함한다. 양과 음의 인텍스 매체 사이의 표면에서 발생된 지수감쇠파들을 위한 반사 및 전달 계수들은 동일한 인텍스 부호의 2개 매체들 사이의 표면에서 발생된 것들보다 훨씬 큰 크기를 가진다. 섭동의 의미에서, 격자 변조는 입사 빔과, 지수감쇠적 성분들에 의해 조정되는, 모든 회절 빔들 사이의 커플링을 초래한다. 이 성분들은 양과 음의 매체들 사이에서 아주 큰 크기를 가질 수 있으므로, 입사 빔과 높은 차수들 사이의 커플링 또한 그에 따라 훨씬 더 크다.

[0064]

음의 인텍스 샘플에서의 회절 빔들의 특성들을 조사하기 위해, 도 3에 도시된 바와 같이, 음의 인텍스 웨지와 자유 공간 사이의 인터페이스로 입사되는 파를 시뮬레이션한다. 시뮬레이션은 유한-소자 기반 전자기 모드 솔버에서 유도된 솔루션을 사용해 수행된다. 시뮬레이션된 지오메트리는, 웨지가 SRR들 및 와이어들의 어레이가 아니라 음의 ϵ 및 μ 를 가진 이중 물질로서 취급된다는 것을 제외하면, 실험들에서 사용되는 지오메트리와 유사하다. 흡수기와 일렬로 정렬된 1 cm 높이, 6 cm 폭 채널의 일단(one end)을 구동하는 것에 의해, 유한-폭 입사 빔이 확립된다. 흡수기는 파를 샘플 웨지의 평탄한 표면으로 도파한다. 완전한 굴절 표면을 가진 웨지 샘플의 경우, 굴절 인텍스가 양인지 음인지에 상관없이, 스넬의 법칙에 의해 판정되는 각도에서 항상 단일 굴절 빔이 관찰된다(즉, 회절 빔들은 없다).

[0065]

양의 인텍스 웨지에 추가된 표면 단계화는 완전한 웨지의 그것과 동일한 단일 굴절 빔을 발생시키지만, 도 2에 도시된 음의 인텍스 웨지에 추가된 표면 단계화는 제 2 빔의 형상을 초래한다.

[0066]

도 2는 음의 인텍스 웨지의 단계화된 인터페이스에서의 굴절 및 회절 빔들을 나타내는 필드 플롯이다. 이 시뮬레이션에서의 웨지의 경우, $\epsilon = -5.09$ 및 $\mu = -1.41$ 이므로, $n = -2.68$ 이다. 시뮬레이션을 위한 주파수는 11.5 GHz이다. 웨지의 굴절 표면상의 단계들은 $15 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 의 치수들을 가진다. 실험들과 유사하게, (페이지에 평행한) 전기 경계 조건들에 의해 경계가 정해진, (페이지에 수직인 방향의) 1 cm 높이 및 6 cm 폭의 도파 영역이 시뮬레이션된다. 굴절 및 회절 빔들은, 수학식 1에 따라서, 각각, -58° 및 $+30^\circ$ 각도들에서 슬랩을 벗어난다.

[0067]

도 2에서 제시된 시뮬레이션의 지오메트리를 위한 파라미터들은, 수학식 1에서 사용되는 경우, 표면 법선으로부터 -58° 에서 영차의 굴절 빔을 그리고 겉보기 격자 길이(apparent grating length)에 의존하는 각도에서 1차 회절 빔을 제시한다. 수학식 1은, 웨지의 인텍스가 상수로 고정된 입사 빔의 파장 변화는, 영차 빔의 편향 각도가 아니라, 1차 빔의 편향 각도를 이동시킨다는 것을 지시한다. 이것은, 도 3에 제시된 각 전력(angular power) 스펙트럼들에서 알 수 있다. 도 3은 도 1의 단계화된 음의 인텍스 웨지 표면으로부터 40 mm 벗어난 반경에서 시뮬레이션된 각 전력 스펙트럼들을 예시한다. 각각의 곡선은 상이한 입사 파장(주파수)에 대응된다. 모든 각도들은 굴절 표면 법선에 관한 것이다.

[0068]

도 3의 상이한 곡선들은, 다른 모든 파라미터들은 상수로 유지되는 상태에서, 9.0 GHz에서 11.75 GHz까지 변경된 입사 여기 주파수(incident excitation frequency)의 상이한 값들에 대응된다. 주파수(또는 파장)의 함수로서의 1차 피크의 피크 각도는, 수학식 1에 파장에 대한 계수로서 입력되는 값의 역수인, d 의 값을 경험적으로 판정하는데 사용될 수 있다. 물리적 표면의 단계 사이즈는, $d \sim 16 \text{ mm}$ 를 제시하는, $15 \times 5 \text{ mm}$ 이지만, 도 3으로부터의 데이터를 위해 적합한 값은 $d = 19 \text{ mm}$ 의 겉보기 격자 단계 사이즈를 지시한다. 이렇게 추출된 d 의 값은 11.75 GHz에서 약 10 GHz에 이르는 주파수들에 걸쳐 관찰된 시뮬레이션 데이터에 잘 들어 맞는다.

[0069]

8.5 GHz 미만에서, 수학식 1의 오른쪽 부분은 1을 초과하고, 회절 빔은 더 이상 불가능하다. 그에 따라, 회절

빔의 커플링 강도는 이 주파수 부근에서 0에 접근할 것이 예상되고, 이것은 시뮬레이션 결과들과 일치한다. 도 3의 수치 연구는 영차 및 1차 빔들로의 입사파의 상대적 커플링에 대한 지시를 제공한다. 회절 피크 대 굴절 피크의 상대적 크기는, 파장이 작아짐에 따라, 회절 빔이 산란 스펙트럼을 좌우할 수 있는 시점까지 증가한다. 표면 단계 사이즈가 변경되는 동안 주파수는 상수로 고정된 유사한 수치 연구가, 도 3에 도시된 것들과 유사한 결과들을 드러내었다.

[0070] 여기에서 제시된 시뮬레이션들은 연속적인 이중 물질들에 기초하지만, 인공적으로 구조화된 음의 인덱스 메타물질들도 연속 물질들로 근사될 수 있다. 따라서, 그러한 메타물질들에서의 표면 단계화는 단계화된 이중 웨지 샘플들에 대해 상술된 시뮬레이션들에서 발견되는 동일한 회절 현상을 초래할 것으로 생각되고 예상된다.

[0071] 상기 시뮬레이션들은, 도 1(a)에서 사용된 샘플에 대해, 굴절 인덱스가 음인 주파수 상황에서 2차 빔이 관찰되어야 한다는 것을 지시한다. 2차 빔이 초기 실험들에서는 보고되지 않았지만, 유사한 실험에서 관찰되었다. 샘플의 설계 세부 사항들 때문에, 플레이트들은, 실험들에서의 가변성 소스에 이르는 10 mm(0.4 인치) 표준 X-밴드 간격보다 대략 2 mm 더 크게 분리되었다.

[0072] 고차 빔들의 쟁점을 추가적으로 연구하고 실험적으로 명료하게 하기 위해, 주파수의 함수로서 2개의 상이한 메타물질 웨지 샘플들 각각에 의해 전달되는 필드들의 각도-분해형 매핑을 수행한다. 샘플들 중 하나는 도 1(c)에서 지시되는 치수들을 가진, 도 1(a)에서 사용된 샘플이다. 나머지 웨지 샘플은 도 1(d)에 도시된 새로운 단위 셀 설계를 이용하였다.

[0073] 실험들에 사용되는 장치는 공지된 바와 같이 평행 플레이트 도파관에 기초한다. HP X281A(X-band coax-to-waveguide adapter)로부터의 마이크로파들을 평행 플레이트 도파관의 채널로 커플링하는 것에 의해, 최소의 횡위상 변화를 가진 입사 빔이 발생된다. 흡수기(Microsorb Technologies Inc. MTL-73)는, 약 15 cm(6")의 탈출 구경을 형성하면서, 어댑터의 0.9" 폭으로부터 빔의 경로를 따라 완만하게 넓어지도록 패터닝된다. 채널은, 중심에 메타물질 샘플이 배치되는, 평행 플레이트의 반원형 중앙 챔버에 접속된다. 채널의 길이(탈출 구경까지의 동축 어댑터)는 40 cm이다. 도파관 검출기는, 샘플로부터 40 cm 거리의, 반원형 플레이트들의 반경에 배치되고, 거의 180° 각도 범위에 걸쳐 스윕핑될 수 있다.

[0074] 제어로서, 도 1(a)의 샘플과 동일한 치수들 및 표면 단계 사이즈를 가진 Teflon 샘플로부터 굴절된 전력의 각도 분포가 측정된다. 도 3에 도시된 결과는, 예상되는 바와 같이, 빔이 양의 각도로 굴절되었음을 드러낸다. 도 3에 도시된 주파수 범위에 대해서는 다른 회절 빔이 검출되지 않지만, 수학적 1은 (예를 들어, 11.5 GHz, -63° 에서) 1차 모드가 발생할 수 있다고 예상한다.

[0075] 양의 인덱스 매체들과 달리, 음의 인덱스 매체들은 본질적으로 주파수 분산적이다. 도 1(a)에서 사용된 샘플을 위한 음 굴절의 예상된 주파수 영역은 10.5 GHz에서 11.1 GHz였지만, 이 제한들은 샘플과 관련한 상위 및 하위 플레이트들의 배치로 인해 다수 불분명하다. 현재의 연구에서, 챔버 플레이트들은 1.27 cm(0.5")의 거리에 고정된다.

[0076] 도 4는 (상단) 15 mm × 5mm 단계들을 가진 Teflon 웨지를 위한, (중상) 도 1(a)의 웨지를 위한, 그리고 (하단) 본 발명의 2.5 mm 단계형 표면의 웨지 메타물질을 위한 주파수(수직 축) 및 직접 입사로부터 벗어난 각도(수평 축) 함수로서의 전달 전력의 맵이다. 도 4(중상)로부터 알 수 있는 바와 같이, 예상되는 음의 인덱스 주파수 대역과 일치하는 주파수들에서, 입사 빔은 실제로 음의 각도를 쪽으로 굽는다. 또한, 수학적 1이 제시하는 바와 같이, 1차 회절 빔에 대응되는 양의 각도들에 2차 빔도 존재한다. 회절 빔의 위치 및 분산은, 도 3의 시뮬레이션 분석으로부터 유도된 d의 값을 가정하면, 수학적 1과 일치한다.

[0077] 이 일치하는 연속적인 매체를 가정하는 이론의 간략함을 아주 양호하게 고려한다. 이 결과들은, 벌크 메타물질이 음의 굴절 인덱스를 가진 연속 물질로서 거동할 뿐만 아니라 표면 단계화가 특성들에 기여하며 다른 연속 물질에서의 단계들로 모델링될 수 있다는 것을 제시한다.

[0078] 단위 셀의 사이즈를 굴절 표면 격자 길이를 효과적으로 감소시키는 적당한 양만큼 감소시키는 것에 의해, 회절 빔이 제거될 수 있다는 것이 수학적 1 및 시뮬레이션들 모두에 의해 발견되고 확인되었다. 본 발명의 실시예는, 전파 평면에서의 도 1(a)의 단위 셀에 사용된 사이즈의 1/2인 2.5 mm의 단위 단계 사이즈를 가진 단계화된 표면의 새로운 메타물질 샘플을 포함한다. "단계 사이즈"는 3-단위 셀 단계의 길이에 따른 단위 셀 각각의 길이 뿐만 아니라 각각의 단계를 서로 분리하는 수직 거리를 의미한다. 웨지 샘플의 개략도는 도 1(b)에서 개략적으로 지시되는 한편, 메타물질 단위 셀의 상세한 치수들은 도 1(d)에 도시되고 앞서 상세하게 논의되었다. 굴절 표면 각도는 이번에도 18.4° 이고, 3 단위 셀들 × 1 단위 셀로 단계화된다.

- [0079] 2.5 mm 샘플을 위한 주파수 및 각도 함수로서의 전달 전력 맵이 도 4(c)에 도시되어 있다. 새로운 단위 셀에 대한 시뮬레이션들로부터 관정되는 예상되는 윈손 대역은 11.3 GHz에서 12.2 GHz까지 발생한다. 기대되는 측정 스펙트럼은 주파수들의 이 대역에 대해 음으로 굴절된 전력을 나타내고, 가장 중요하게, 회절 대역은 나타나지 않는다.
- [0080] 여기에서 제시된 시뮬레이션들 뿐만 아니라 도 4의 실험 데이터는 음의 인덱스 매체들에 대한 굴절 실험들에서 표면 불균등성의 역할을 예시하는 기능을 한다. 메타물질 샘플들이 다소 복잡한 시스템들을 표현하지만, 우리의 결과들 및 분석은, 수학적 1이 영차 및 더 높은 차수 빔들의 존재를 정확하게 설명한다는 것을 나타낸다. 더 나아가, 결과들은 음의 인덱스 샘플들을 위한 회절 차수들의 향상된 커플링을 확인한다. 이렇게 증가된 커플링은 양의 그리고 음의 인덱스 매체들에 대한 거동 사이의 중요한 차이를 표현하고, 표면 주기성이 후자의 경우에서 훨씬 더 중요한 역할을 수행한다는 것을 제시한다.
- [0081] B. 음의 인덱스 렌즈 수차들
- [0082] 본 발명의 다른 태양은 음의 인덱스 렌즈들에 관한 것이다. 최근, 음의 인덱스 인공 물질들("NIM")에 큰 관심을 가져 왔다. 일 관심 분야는 완전 렌즈(perfect lens) 개념을 포함한다. 완전 렌즈는, 양의 인덱스 광학 장치로써 가능한 것을 초과하는 해상도로써 상들을 포커싱할 수 있는, 인덱스 - 1의 플랫폼 슬랩(flat slab)이다. 곡선형 표면에 의해 음의 인덱스 매체들상에 포커싱할 수 있다. 음의 인덱스 매체들로 이루어진 전통적인 구형 프로파일 렌즈들은 그들의 양의 인덱스 등가물들에 비해 몇가지 이점들을 갖는데: 그들은 좀더 컴팩트하고, 그들은 자유 공간에 완벽하게 정합될 수 있다. 더 나아가, 그들은 우수한 포커싱 성능을 갖는다는 것도 밝혀졌다.
- [0083] 본 발명의 예시적인 메타물질 렌즈들은, 그것의 전자기파 특성들이 복합구조 전체에 걸쳐 공간적으로 변화하게 하는 복합 구조들로서 구성된다. 중요하게, 유전율 및 투자율 모두가, 앞서 실현되지 않은 광학 장치들에 이르면서, 본 발명의 구조 전체에 걸쳐 독립적으로 변화될 수 있다. 예시적 실시예는, 각각이 전자기 필드에 응답하여 소정의 전기 및 자기 편광들을 나타내도록 설계된 복수개의 전도 소자들을 지지하는 유전체 기판 또는 호스트 물질로 이루어진 인공적으로 구조화된 복합 메타물질이고, 복합 구조는, 하나 이상의 소자가 나머지 소자들과는 그것의 전기 또는 자기 편광이 상이하도록, 하나 이상의 축들을 따라 유전율 및/또는 투자율에서 소정의 공간적 변화를 나타낸다. 여기에서 사용되는 바와 같이, "공간적 변화"라는 용어는 공간 위치에서의 변화를 의미하는 것으로 광범위하게 해석되어야 한다. 예를 들어, 공간적 변화를 나타내는 투자율을 가진 메타물질은 메타물질에서의 X, Y 및 Z 축 중 하나 이상을 따라 위치에 의해 달라지는 투자율을 가질 수도 있다.
- [0084] 중요하게, 자기 투자율에서의 공간적 변화는 상기 전기 유전율과는 무관하고, 투자율 및 유전율은 본 발명의 메타물질들에서 서로 별도로 "튜닝"될 수 있다. 그러한 메타물질들은 다수의 유용하고 유익한 애플리케이션들을 가진다. 예를 들어, 본 발명의 예시적인 일부 메타물질들에서, 전기 유전율에 대한 자기 투자율의 비는 사실상 상수로 유지되고 (자유 공간 또는 복합 메타물질이 매입된 제 2 물질을 포함하는 일레들의 경우) 메타물질에 인접하거나 메타물질을 둘러싸고 있는 물질을 위한 동일 비와 사실상 동등하게 유지됨으로써, 임피던스 정합이 실현된다. 또한, 메타물질 투자율 및 유전율의 부호가 제어될 수 있는데, 예시적인 일부 메타물질들에서는 모두가 음으로 제어되어 음의 인덱스 메타물질을 제공할 수 있다. 이들 및 다른 장점들과 이점들은, 다음의 예시적 실시예들에 대한 상세한 논의를 고려할 때, 당업자들에게 명백할 것이다.
- [0085] 렌즈의 단색 상화 품질(monochromatic imaging quality)은 5가지 세이델(Seidel) 수차들: 구면 수차, 코마 수차, 비점(astigmatism) 수차, 상면 만곡(field curvature) 수차 및 왜곡 수차에 의해 특성화될 수 있다. 간단한 가우시안 광학 공식들을 위한 주지의 이 정정들은 구면(spherical)으로부터의 파면(wave front) 편이의 4차 전개로부터 계산된다. (구면 파면은 광선 광학에서의 이상적인 점 초점으로 수렴한다.) 이 전개의 계수들은 소정 물체 및 상 위치를 위한 광학 소자의 비이상적인 포커싱 특성들을 정량화한다. 0 주위의 인덱스와 관련하여 Seidel 수차들 중 몇가지의 비대칭이 존재한다는 것을 발견한다. +1의 상대적 인덱스와 인터페이스는 비활성이고 상대적 인덱스 - 1의 인터페이스는 굴절성이 강하다고 생각하면, 이러한 비대칭은 당연하다. 그러나, 비대칭이 음의 인덱스 렌즈들을 위해 우수한 포커싱 특성들을 산출할 수 있다는 본 발견은 놀랍고 예상치 못한 결과이다.
- [0086] 음의 인덱스 매체들은 필연적으로 주파수 분산적인데, 이는, 증가된 색수차 및 감소된 대역폭을 의미한다. 그러나, 유사한 제한을 가진 회절성 광학 장치는 현대적 애플리케이션들에 유용할 수 있다. 분석 수차 결과들을 확인하기 위해, 인덱스의 부호에 의존해 광선의 경로를 판정하는 것이 아니라, 유전율(ϵ), 투자율(μ), 맥스웰 방정식들 및 에너지 보존에 의존하는 맞춤형 광선 추적 코드가 개발되었다. 동종 매체들의 인터페이스들 사이

에서, 광선은 포인팅 벡터의 방향을 따라 직선으로 전파한다. 1로 레이블링된 영역으로부터 2로 레이블링된 영역으로의 인터페이스를 가로지르는 굴절은 다음과 같이 핸들링된다. 영역 2에서 (맥스웰 방정식들로부터 획득된) 분산 관계를 충족시키는 파 솔루션들은 다음의 수학적 2와 같이 추구되는데,

수학적 2

$$\frac{\epsilon^2}{\omega^2} \mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{k}_2 = \epsilon_2 \mu_2$$

여기에서, \mathbf{k}_2 는 영역 2에서의 파 벡터이다. 솔루션들은, 다음의 수학적 3을 충족시킬 것을 필요로 하는, 입사 파로의 경계 정합도 충족시켜야 하는데,

수학적 3

$$\mathbf{n} \times (\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1) = 0$$

여기에서, \mathbf{n} 은 인터페이스로의 단위 법선이다. 출력되는 굴절파는, 입사파가 다음의 수학적 4와 같이 에너지를 전달했다면, 표면으로부터 에너지를 전달해야 하는데,

수학적 4

$$(\mathbf{P}_2 \cdot \mathbf{n})(\mathbf{P}_1 \cdot \mathbf{n}) \geq 0$$

여기에서, $\mathbf{P} = \frac{1}{2} \text{Re}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*)$ 는 시간 평균된 포인팅 벡터이다. 마지막으로, 매체들은 수동 및 무손실인 것으로 가정되므로, 파가 지수적으로 증가 또는 감쇠해서는 안된다($I_{\text{im}}(\mathbf{k}_2) = 0$). 상기 참조들 모두를 충족시키는 솔루션이 존재한다면, 광선은 새롭게 발견된 파 벡터 및 포인팅 벡터로써 계속된다. 더 나아가, 등방성 매체들만을 고려하므로, 솔루션은 고유할 것이다.

광학 문헌에서 발견된 얇은 구면 렌즈들의 Seidel 수차들을 위한 표현들의 형태가 음의 인덱스 매체들에 대한 고려에 의해 변경되지 않는다는 것이 밝혀졌다. 이 결론은, 광 경로 길이의 정의 및 페르마 원리만을 사용해, 제 1 원리들로부터, 이 표현들을 재유도하는 것에 의해 확인된다. \mathbf{C} 가 포인팅 벡터와 평행한 방향이라면, 광 경로 길이($\text{OPL} = \int_C \mathbf{n}(\mathbf{s}) d\mathbf{s}$)는, 파가 경로(\mathbf{C})를 따라 진행할 (자유 공간 파장의 단위인) 위상 변화인 것으로 해석된다. 광 경로는, 포인팅 벡터 및 파 벡터가 평행이 아닐 경우, 즉, 인덱스가 음일 경우, 음인 기여들을 가질 수도 있다. 이 수차 공식들은 우리의 광선 추적 결과들과의 일치에 의해 추가적으로 뒷받침된다. 파 수차(ΔOPL)는 일반 광선(general ray)과 참조 광선(reference ray)의 광 경로 길이의 차이인데, 여기에서, 참조 광선은, 도 5로써 도시된 바와 같이, 구경 제한판(aperture stop)에서 광축을 통과하고 일반 광선은 구경 제한판에서의 그것의 좌표(\mathbf{r}) 및 상 평면에서의 그것의 좌표(\mathbf{h})에 의해 파라미터화된다.

도 5는 수차 계산에 사용되는 구성을 예시한다. AS로 레이블링된 구경 제한판이 (도시된 렌즈는 두껍지만) 얇은 렌즈의 장소에 위치한다. 가우시안 상 평면은 IP로 레이블링된다. 구경 제한판 좌표 벡터(\mathbf{r}) 및 상 평면 좌표 벡터(\mathbf{h})가 도시된 바와 같이 반드시 평행일 필요는 없다.

구면 인터페이스들이 완전한 상을 산출하는 가우시안 광학 제한을 충족시키기 위해, \mathbf{r} 및 \mathbf{h} 는 0에 근접해야 한다. 다음의 수학적 5와 같은, 이 파라미터들의 파 수차의 급수 전개(series expansion)는,

수학적 5

$$\Delta \text{OPL} = \sum_{l,m,n=0}^{\infty} C_{lmn} (\mathbf{r} \cdot \mathbf{r})^l (\mathbf{r} \cdot \mathbf{h})^m (\mathbf{h} \cdot \mathbf{h})^n$$

임의의 소정 차수의 가우시안(Gaussian) 광학에 대한 정정들을 산출한다. 렌즈의 평면에 구경 제한판을 갖춘 얇은 구면 렌즈를 위한 최저 차수 정정들은 다음의 수학적 6으로써 주어진다:

수학식 6a

$$C_{200} = -\frac{1}{32f'^3 n(n-1)^2} \times [n^3 - (n-1)^2(3n+2)p^3 - 4(n-1)pq + (n-2)q^2]$$

수학식 6b

$$C_{110} = -\frac{1-p}{8f'^3 n(n-1)} [(2n-1)(n-1)p + (n+1)q]$$

수학식 6c

$$C_{c20} = -\frac{(1-p)^2}{8f'^3}$$

수학식 6d

$$C_{101} = -\frac{(1-p)^2}{16f'^3 n} (n+1)$$

수학식 6e

$$C_{011} = 0$$

이 계수들은, 각각, 세이델(Seidel) 수차들: 구면, 코마, 비점, 상면 만곡 및 왜곡 수차들이다. 이 표현들에도 위치 팩터(p) 및 형태 팩터(q)가 등장한다. 위치 팩터는 다음의 수학식 7로써 주어지는데,

수학식 7

$$p \equiv 1 - \frac{2f'}{S'}$$

여기에서, f'은 상쪽에 속한 초점 길이이고, S'은 상 위치이다. 다음의 수학식 8과 같은, S가 물체 위치이고 R₁ 및 R₂가 렌즈의 곡률 반경들인 얇은 구면 렌즈 상화 방정식(imaging equation)을 통해,

수학식 8

$$\frac{1}{S'} - \frac{1}{S} = \frac{1}{f'} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

위치 팩터는 다음의 수학식 9와 같이 배율에 직접 관련된다.

수학식 9

$$M = \frac{S'}{S} = \frac{p-1}{p+1}$$

형태 팩터는 다음의 수학식 10으로써 주어진다.

수학식 10

$$q \equiv \frac{R_2 + R_1}{R_2 - R_1}$$

0의 형태 팩터를 가진 렌즈는 대칭이고, ±1은 평면-곡선형(plano-curved) 렌즈이다. 형태 및 위치 팩터를 사용하면, 얇은 구면 렌즈 구성들 모두가 설명된다.

[0112] 무한 거리의 소스 물체에 대한 중요한 경우가 처음으로 조사된다. 이것은 -1의 위치 팩터이다. 수차들을 감소 시키는데 사용될 수 있는 2가지 파라미터들(n 및 q)이 남겨진다. q 의 값을 수차들 중 하나를 제거하도록 설정 할 것이고, 나머지 수차들을 인텍스의 함수로서 비교할 것이다. 인텍스의 적당한 값들에 관심을 집중할 것이다. 인텍스의 큰 절대값들에서, 수차들은 부호와 무관한 동일 값에 접근하지만, 높은 인텍스를 가진 유전 체 렌즈들은 자유 공간으로의 임피던스 부정합으로 인해 상당한 반사 계수들을 가진다. 수차들의 일반적인 순서는 구경 좌표(r)의 순서로 최고에서 최저까지이다. 상당한 렌즈 구경으로써 상들을 형성하는 경우라면, 이것이, 상 열화가 최소인 순서겠지만, 애플리케이션들에서 흔히 발생하는 적당한 상 사이즈에 대해서는 상 열화가 작은 순서이다. 따라서, 구면 수차는 제거를 위한 명백한 타겟이다. 그러나, 1보다 큰 인텍스 값들을 위한 C200의 근들은 존재하지 않는데, 구면 렌즈들에게는 이것이 본질적인 것처럼 보이므로, 이 수차를 구면 수차라고 한다. 바람직한 실시는 (다음 줄의) 코마를 제거하는 것이고, 결과적인 렌즈가, 구면 수차를 위해 획득 가능한 최소값에 아주 근접한 값을 가질 경우 그렇게 된다. 형태 팩터(q)를 조정하는 것을 흔히 렌즈 벤딩(lens bending)이라고 한다. 0 코마를 위해 렌즈를 벤딩한다면, 그것은 다음의 수학적 식 11으로써 획득하는 q 와 관련하여 C110의 근들을 찾는 것이다.

수학적 식 11

$$q_c = \frac{(2n+1)(n-1)}{n+1}$$

[0113]

[0114] q 를 위한 이 값 및 $p = -1$ 을 수학적 식 6에 대입하고 q_c 뿐만 아니라 나머지 3개의 0이 아닌 수차 계수들을 도 6에서 플로팅한다.

[0115]

도 6에서, 상단 플롯은 무한대에 물체를 포커싱하는 그리고 0 코마를 위해 벤딩된 렌즈를 위한 인텍스의 함수로서 구면 수차(A), 비점(하단의 수평 플롯 라인), 상면 만곡(B), 및 형태 팩터(C)를 나타낸다. 얇은 수직선들은 광선 추적 도면들(하단), 자오선 프로파일(왼쪽) 및 상 스팟(오른쪽)으로 도시된 렌즈들을 위한 특성들을 지시한다. 입사각은 0.2 라디안이고 렌즈들은 $f/2$ 이다. rms 스팟 사이즈에 관한 인텍스 형태 팩터 및 스팟 도면 좁은 평판 모양으로 도시된다. 자오선 프로파일에서, 렌즈 원리 평면들은 얇은 검은색 수직선들로서 도시되고, 광축 및 가우시안 상 평면은 회색선들로서 도시된다. 스팟 도면에서, 가우시안 초점은 교차하는 선들의 중심에 위치한다.

[0116]

평 오목/볼록 렌즈를 표현하는, $q = 1$ 인 인텍스의 2개 값들이 존재한다는 것에 주의한다. 수학적 식 11을 1로 설정하면, 다음의 수학적 식 12를 얻는데,

수학적 식 12

$$n^2 - n - 1 = 0$$

[0117]

[0118] 이것의 근들은 편재적인 "황금(golden)" 또는 가장 바람직한 비들, $n = \phi = \text{약 } 1.62$; 및 $n = 1 - \phi' = \text{약 } -0.62$ 이다. 구면 수차 및 상면 만곡 모두가 작은 $n = -0.7$ 부근에는 인텍스 값들의 차이가 존재한다는 것에도 주의한다. 양의 인텍스에는 등가 차이가 존재하지 않는다. 따라서, 본 발명의 일 실시예는 약 -0.6 내지 약 -0.7의 인텍스(n)를 가진 NIM으로 이루어진 렌즈인데, 바람직한 렌즈는 약 -0.6의 인텍스를 가진다.

[0119]

자오선 광선들 및 광선 스팟 도면들 모두를 갖춘 몇가지 광선 추적 도면들이 인텍스의 특정 값들을 위해 도 6에 도시되어 있다. 참조 렌즈는, 가시 광 렌즈들에서 사용되는 통상적인 값들에 근접하고 적당히 낮은 반사를 위해 $n = 1$ 에 충분히 근접한 인텍스(ϕ)를 가진다. 도시된 음의 인텍스 렌즈들은 사실상 $n = -1$ 에 근접한데, 이것은, 완전 전달을 허용하는 또 하나의 인텍스이므로, 이것은 공정한 비교이다. 음의 인텍스 렌즈들 모두는 양의 인텍스 렌즈보다 훨씬 더 촘촘한 초점들을 나타낸다. $p = -1$ 인 렌즈를 벤딩하여 0의 구면 수차를 획득하려 한다면, 다음의 수학적 식 13과 같은 2가지 솔루션들을 획득한다.

수학적 식 13

$$q_s = \frac{2(n^2 - 1) \pm n\sqrt{1 - 4n}}{n - 2}$$

[0120]

[0121] 이 표현들은 $n \leq 1/4$ 에 대해서만 실수 값들을 가지므로, 보통의 물질들로는 (자유 공간에 매입된) 그러한 렌즈

의 구현이 불가능하다.

[0122] 음의 인덱스가, 도 7로써 예시된 바와 같이, 멀리 떨어진 물체를 실초점(real focus)으로 포커싱할 수 있는 무구면 수차 구면 렌즈들의 전체 계열을 허용한다는 것은 놀랍고 중요한 결과이다. 도 7은, 렌즈가 0 구면 수차를 위해 벤딩되고 코마가 (D)로써 도시되어 있는 것을 제외하면, 도 6과 동일하다. 실선들 및 점선들은 상이한 솔루션들을 지시한다. 스팟 사이즈(r_{rms})는 도 7의 하단 렌즈 스팟에 관한 것이다. 모든 스팟 도면들은 동일 스케일이다.

[0123] q_s (실선의 곡선들)를 위한 표현에서 음의 부호를 가진 솔루션은 인덱스의 적합한 음의 값들을 위해 좀더 작은 코마를 가지므로, 광선 추적 도면들이 그 솔루션을 위해 도시된다. $n = -1$ 에서는, 상면 만곡 또한 0이므로, 이 렌즈는 5개의 Seidel 수차들 중 2개, 코마 및 비점만을 가진다는 것에 주의한다. 양의 인덱스 참조를 위해, 상기한 내용으로부터 0 코마, $n = \infty$ 렌즈를 사용한다. 여기에서도, 음의 인덱스 렌즈들은 비교 가능한 양의 인덱스 렌즈보다 좀더 촘촘한 초점을 실현한다.

[0124] 이제, 실제 물체 실상(real image) 모두가 무한대에 위치하는 $|p| < 1$ 인 경우를 조사한다. p 및 q 모두가 자유 파라미터들이므로, 2개 파라미터들을 제거할 수 있다. 구면 수차 및 코마를 제거한다면, 결과적 렌즈는 무수차라고 한다. 정확하지는 않지만, 구면 렌즈는 가상의 무수차 초점 쌍들만을 가질 수 있다는 결과가 널리 공지되어 있다. 좀더 정확한 진술은, 음의 인덱스 구면 렌즈들만이 실수의 무수차 초점 쌍들을 가질 수 있다는 것이다. C200 및 C110을 0으로 설정하고 p 및 q 를 풀어낸다면, 4개의 솔루션들을 획득하는데, 2개의 중요한 솔루션들은 다음의 수학적 식 13으로써 주어진다.

수학적 식 14a

$$p_{sc} = \frac{n-1}{n+1}$$

[0125]

수학적 식 14b

$$q_{sc} = (2n+1);$$

[0126]

[0127] p 를 위해 음의 부호를 그리고 q 를 위해 양의 부호를 가진 솔루션에 초점을 맞출 것이다. 이 솔루션은 상을 확대하는 렌즈 구성들을 위해 좀더 작은 수차들을 가진다. 또 하나의 솔루션은 상 축소에 좀더 양호하다. 수학적 식 14의 표현들을 수학적 식 6에 삽입하여, 도 8에, p_{sc} 및 q_{sc} 의 값들 뿐만 아니라 0이 아닌 나머지 2개 계수들을 플로팅하였다.

[0128] 도 8은, 물체 및 상이 무한 위치들이고 0의 구면 수차 및 코마를 위해 벤딩된 렌즈 구성이라는 것을 제외하면, 도 7과 일치한다. 위치 팩터는 (D)로서 도시된다. (앞서 수평 플랫 라인이었던) 비점은 (E)로서 도시된다. 실상 물체 쌍들은, 위치 팩터가 $|p| < 1$ 의 음영 영역에 존재할 경우에만 발생한다. 렌즈 쌍들은 $f/1.23$, $f/1.08$, $f/0.90$ 이고, -1, -2, -3의 배율들을 가진다. 두번째 내지 마지막 스팟 도면들에서, 수평(10x) 및 수직(100x) 줌은 동일하지 않다.

[0129] 광선 도면들은 -1, -2 및 -3의 배율들을 가진 렌즈들을 위해 도시된다. 각각을 위해 양의 인덱스 참조 렌즈도 도시된다. (무수차일 수 없는) 참조 렌즈들은, 그들이 비교될 렌즈들과 동일한 배율 및 $f/\#$ 를 가진, 적합한 인덱스(∞)의 렌즈들이다. 이들은 0 코마를 위해 벤딩되지만, 여전히 그 구성을 위해 가능한 최소값에 근접한 구면 수차를 가진다. 이번에도, 음의 인덱스 렌즈들이 우수한 초점들을 발생시킨다.

[0130] -1의 인덱스 및 -1의 배율 렌즈가 특히 흥미롭다. 이 인덱스 값에서는, 상면 만곡 또한 0이다. 두드러진 이 렌즈 구성은 5가지 세이델 수차들 중 하나, 비점만을 가진다. 이것은, 상 평면에서 일차원 "스팟"을 나타내는 광선 추적에 의해 확인된다. 이것은 구결면(sagittal plane)에서의 완전 포커싱이다. 완전 포커싱은, 구결 초점 앞쪽의, 자오면(meridional plane)에서도 발생한다. 이러한 비대칭 렌즈($q = -1$)가 대칭 구성($p = 0$)에서도 양호하게 동작하는 이유가 궁금할 수 있다. 이 렌즈는 등가적으로 하나의 부품을 갖춘 양옉 이중렌즈로 보여질 수 있다. $\pm n$ 의 임의 인덱스들을 가진 양옉 이중렌즈들 모두가 동일한 포커싱 특성들을 가진다는 것을 발견하였다. 플레이너 인터페이스(planer interface) 주위에서는 항상 대칭이지만 좀더 높은 인덱스 크기에서는 좀더 날카로운 각도들을 형성하는 내부 광선들에 관찰 가능한 유일한 차이점이 존재한다.

[0131] 이러한 음의 인덱스 렌즈들 중 어떤 것의 가공은 주기적으로 구성된 인공 물질들을 사용해 수행될 수 있다. 인공 물질 설계들은, 다수의 통신 및 상 애플리케이션들이 존재하는 MHz 내지 THz의 주파수들에서 작용할 수 있다. 예를 들어, 렌즈 안테나들은 증가된 이득으로 직접적으로 변환되는 수차들의 감소 및 저밀도 인공 물질들에 의해 제공되는 질량 감소 모두에 의해 이점을 취할 수 있다. 더 나아가, 이 렌즈들은, 매 파장당 그것의 상당한 성장 기간 요구 사항들이 결여되어 있고 손실들에 좀더 내성이 강하므로, 완전 렌즈보다 구현이 훨씬 더 용이하다. 가시 광 주파수들에서의 음의 인덱스 렌즈들은, 음 굴절을 위한 가능성을 나타낸 광결정들(photonic crystals)을 사용하는 것에 의해서도 가능할 수 있다. 현재의 광학 시스템 설계 패러다임을 사용하면, 수차들은 반대 부호의 계수들을 가진 소자들을 조합하는 것에 의해 최소화된다. 그러나, 더 많은 소자들은 복잡도 및 비용의 증가를 의미한다. 음의 인덱스를 포함하는 전개된 파라미터 공간을 이용하면, 필요한 소자들의 수를 감소시킬 수 있고, 단 하나의 소자를 가진 렌즈들도 가능할 것으로 생각된다.

[0132] 추가적인 예시로서, 본 발명의 추가적인 예시적 렌즈들이 설명된다. 본 발명의 예시적인 일 메타물질 렌즈는, 렌즈의 두께가 그것의 반경 및 그것의 의도된 초점들까지의 거리들에 비해 얇도록, 동축 구상 표면들에 의해 정의된 2개의 대향면들을 가진 동종의 등방성 굴절 매체들로 이루어진다. 지오메트릭 제한에서, 렌즈는 평행광(아주 먼 거리 또는 평행 소스로부터의 광)을 0 구면 수차를 가진 실상 점에 포커싱한다. 이를 실현하기 위해,

형태 팩터는 $q = \frac{R_2 + R_1}{R_2 - R_1}$ 이도록(여기에서, R_1 및 R_2 는 2개 렌즈 표면들의 곡률 반경들임) 그리고 굴절 인덱스(n)는 $q = [2(n^2 - 1) \pm n\sqrt{1 - 4n}]/(n + 2)$ (여기에서, n은 1/4보다 작아야 함)이도록 조정된다. 이것이 전통적인 물질들로서 공기 또는 진공 배경에서 실현될 수는 없다. 이 구현은 메타물질들로 실현될 수 있다.

[0133] 추가적인 예시적 메타물질 렌즈는 상기한 바와 같지만, $n = -1$ 인 특정 경우를 위해 구성된다. 렌즈는 평행광을 0 구면 수차 및 0 상면 만곡 수차를 가진 실상 점에 포커싱한다.

[0134] 본 발명의 추가적인 예시적 메타물질 렌즈는, 렌즈의 두께가 그것의 반경 및 그것의 의도된 초점들까지의 거리들에 비해 얇도록, 동축 구면들에 의해 정의된 2개의 대향면들을 가진 동종의 등방성 굴절 매체들을 구비한다. 지오메트릭 제한에서, 렌즈는 유한 위치의 점원으로부터의 광을, 0 구면 수차 및 0 코마 수차를 갖춘 점인 실수의 무수차 점으로 포커싱한다. 이를 실현하기 위해, 형태 팩터(q), 위치 팩터(p; $p = 1 - (2f/S')$ 여기에서, f는 초점 길이이고 S'은 렌즈로부터 상까지의 거리임), 및 굴절 인덱스(n)는, $q = \pm 2(n+1)$ 및 $p = \mp [(n+1)/(n-1)]$ 이도록 조정된다. 무수차 실상들은 $n < 0$ 인 경우에만 가능하다는 것에 주의한다. 그러한 렌즈가 $n = -1$ 인 특정 경우를 위해서도 구성될 수 있다. 이 경우, 상면 만곡 수차 또한 0이다.

[0135] 본 발명의 추가적인 예시적 메타물질 렌즈는 그들의 평평한 면들에서 밀접하게 결합된 2개의 평 오목 부품 렌즈들(plano-concave component lenses)로 이루어진 양 오목 이중렌즈(bi-concave doublet lens)를 구비한다. 2가지 부품 렌즈들은 동일한 두께이고, 동일한 곡률의 구면들을 가진다. 부품 렌즈들을 구비하는 굴절 매체들은 $n_1 = -n_2$ 에 의해 관련된다. 이러한 이중렌즈는 상기 렌즈의 특성들 모두를 갖는데 - 다시 말해, 그것은 0 구면 수차, 0 코마 수차 및 0 상면 만곡 수차를 가진 실상을 포커싱할 수 있다. 구현은 $n < 0$ 일 것을 요구하지만, 메타물질들로서 실현될 수 있다.

[0136] 여기에서는 음의 인덱스들을 가진 메타물질 렌즈들이 논의되고 예시되었지만, 메타물질들로 이루어진 양의 인덱스 렌즈들도 마찬가지로 유용하고 유익하리라는 것을 알 수 있을 것이다.

[0137] C. 구배 인덱스 메타물질

[0138] 본 발명의 추가 태양은 구배 인덱스를 가진 메타물질에 관한 것이다. 본 발명의 이 태양에 대한 일 실시예는 일정한 공간 구배의 효과적 굴절 인덱스를 가진 전도성 분할 링 공진기들(SRR들)에 기초해 구성된 메타물질을 포함한다. 구배는, 주파수들의 광범위한 범위에 걸쳐 복합 메타물질의 평면 슬랩에 의해 마이크로파 빔의 편향을 측정하는 것에 의해 실험적으로 확인된다. 본 발명의 구배 인덱스 메타물질은 특히 고주파수들에서 유용할 수 있는 구배 인덱스 렌즈들 및 유사한 광학 장치의 개발을 위한 다른 접근 방법을 표현한다. 특히, 본 발명의 구배 인덱스 물질은, SRR들의 자기 공명 응답이 최근에 증명된 THz 애플리케이션들에 적합할 수 있다.

[0139] 이례적인 메타물질 응답의 일례는, 유한한 주파수 대역에 걸쳐 동시에 음의 유전율(ϵ) 및 투자율(μ)을 소유하는 음의 인덱스 메타물질들에서 찾아볼 수 있다. 지금까지 증명된 음의 인덱스 메타물질들은, 사이즈 및 간격이 관심 파장들보다 훨씬 작은 전도성 소자들의 주기적 어레이들로부터 형성되었다. 반복되는 전도성 소자의

형태가, 전기 또는 자기 공진을 갖는 것으로 근사될 수 있는 집합체의 전자기 응답을 판정한다. 주기적으로 패터닝된 전반적인 복합 구조에 효과적 매체 이론을 적용하면, 벌크 등방성 또는 이방성 ϵ 및 μ 의 맥락에서 설명할 수 있다.

- [0140] 도 9에 삽입한 그림들에서 도시된 분할 링 공진기(SRR)는, 자기 특성들을 나타내는 메타물질들의 반복되는 소자로서 유용한 예시적인 일 도체이다. 단일 SRR은 쌍극성의 자기 공명 응답을 나타내는 자성 "원자"와 유사한 방식으로 전자기 필드들에 응답한다. 주기적으로 배치된 SRR들로 이루어진 매체는 대략적으로, 다음의 수학적 식 15와 같은 주파수 의존적 투자율(μ)에 의해 특성화될 수 있는데,

수학적 식 15

$$\mu(\omega) = 1 - \frac{F\omega^2}{(\omega^2 - \omega_r^2) + i\omega\gamma}$$

- [0141] 여기에서, ω_r 은 SRR 지오메트리에 의해 판정되는 공진 주파수이고, γ 는 댐핑이며, F는 충전 팩터이다. SRR 매체는, 주파수의 함수로서 이 또한 분산적이라는 것이 밝혀진 효과적 유전율(ϵ)도 나타낸다. 그러나, 이러한 주파수 의존적 거동은 공진으로부터 멀리 떨어진 주파수들에서는 약소하고, 작은 셀 사이즈의 제한에서는 상수에 근접하므로, 여기에서는 유전율을 주파수에 대해 상수로서 근사한다. 또한, 사용되는 필드 편광에 대한 SRR의 방향은, 전기 및 자기 응답들이 분리된다는 것을 의미한다.

- [0143] 도 9는 SRR들을 위해 시뮬레이션된 분산 곡선들을 나타낸다. (상위 및 하위 분기를 포함하는) 좀더 두꺼운 검은색 곡선 쌍은 (하위 삽입 그림의) 평평한 기판상의 SRR들에 대응된다. 개방 원들(open circles)은 시뮬레이션된 위상 전진들을 지시한다. 곡선들의 후속 쌍들은, (위쪽 삽입 그림의) SRR 주위에서 기판이 제거된 경우들에 대응된다. 절단 깊이는 곡선들의 각 세트 사이에서 6 μm 만큼 증가한다.

- [0144] 종래 기술에서, 메타물질들은, 평균된 전자기 응답이 구조에 걸쳐 달라지지 않는다는 점에서, 결과적 매체가 동종인 것으로 간주될 수 있도록, 동일 소자들을 포함하는 반복되는 단위 셀들로부터 구성되었다. 한편, 본 발명의 실시예는, 평균화된 전자기 특성들이 위치의 함수로서 변화하는 메타물질들을 포함한다. 그러한 공간 분산 물질들은, 예를 들어, 그들이, 렌싱(lensing) 및 필터링을 포함하는, 다양한 애플리케이션들에 이용될 수 있으므로, 관심을 끈다. 본 발명의 실시예는, 전파 방향에 수직인 방향을 따라 연속적인 각 소자의 특성들에서의 약한 변화에 의해 공간 분산의 패턴이 도입되는 SRR 기반의 메타물질이다. 결과적 메타물질은 메타물질의 이축을 따라, 빔 편향 실험들에 의해 확인될 수 있는 일정한 구배 인덱스를 가진다.

- [0145] SRR 매체는 주로 자기 응답(magnetic response)을 갖는 것으로 공지되어 있지만, 여기에서의 직접적인 관심은 그것이 아니라, $n(\omega) = \sqrt{\epsilon(\omega)\mu(\omega)}$ 으로부터 발견되는, SRR 매체의 굴절 인덱스($n(\omega)$)인데, 여기에서, $\mu(\omega)$ 는 수학적 식 1로써 주어지고 $\epsilon(\omega)$ 는 상수로 근사된다. 분산의 이 형태($\omega = ck/n(\omega)$)는 단일 단위 셀을 위한 맥스웰 방정식들의 솔루션으로부터 획득되는 형태와 비교될 수 있다. 수치적 분산 도면을 획득하기 위해, 전파 방향에 수직인 방향들에서 0 위상 전진을 가진 주기적 경계 조건들 및 전파 방향에서 다양한 위상 전진들을 가진 주기적 경계 조건들을 적용하여, 단일 단위 셀(도 9, 삽입 그림)을 위한 아이젠 주파수들(eigen frequencies)을 계산한다. 시뮬레이션들은 HFSS(Ansoft), 유한-소자 기반 전자기 솔버를 사용해 수행된다. 단위 셀을 가로지르는 주파수 대 위상 전진(Φ)으로서 도시된 결과적 분산 도면(검은색 곡선)은 예상된 공진 형태를 드러낸다. 구체적으로, 주파수 대역 갭만큼 분리된 전파 모드들의 2개 분기들이 존재한다. 하위 분기는 0 주파수에서 시작해 180° 의 위상 전진으로써 ω_r 에서 종료한다. 다음 분기는 $\omega_{\text{gap}} = \omega_r + \sqrt{1-F}$ 의 주파수에서 시작한다. 전파 상수(k)는 $k = \Phi/d$ 로부터 발견될 수 있는데, 여기에서, d는 단위 셀의 크기이다.

- [0146] SRR의 공진 주파수(ω_r)은 SRR을 위한 지오메트릭 파라미터들 및 국지적 유전체 환경에 다소 민감하게 의존한다. $\mu(\omega)$ 는 ω_r (수학적 식 15)에 강하게 의존하므로, 기본적인 반복 단위 셀에 대한 비교적 작은 변화들은, 특히 공진 부근에서, 복합 구조의 투자율에 대한 상당한 변화들을 초래할 수 있다. 공진 주파수 변화에 의한 인덱스 변화($n(\omega) = \sqrt{\epsilon(\omega)\mu(\omega)}$)는 수학적 식 15를 사용해 계산될 수 있다. 편의를 위해, 관심있는 주파수 대역에 대한 유전율의 주된 역할은 분산 곡선들을 리스케일링하는 것일 것이므로, 댐핑은 무시하고 $\epsilon(\omega) = 1$ 로

설정한다. 저주파수들($\omega \ll \omega_r$)에서, 인덱스가 공진 주파수의 작은 변화들에 의해서는 다음의 수학적 식 16과 같이 선형적으로 변화하는 한편,

수학적 식 16

$$\Delta n \sim -\frac{\omega^2}{\omega_r^3} \Delta \omega_r$$

[0147]

[0148] 고주파수 제한($\omega \gg \omega_r$)에서는, 다음의 수학적 식 17과 같다는 것을 알 수 있다.

수학적 식 17

$$\Delta n \sim -\frac{\omega_r}{\omega^3} \Delta \omega_r$$

[0149]

[0150] $\Delta \omega_r / \omega_r \ll 1$ 이라고 가정하고 좀더 높은 차수 항목들을 무시하면, 수학적 식 15로써 설명된 모델 시스템의 경우, 구배가 $\omega \ll \omega_r$ 에 대해서는 주파수의 제곱으로서 증가하고 $\omega \gg \omega_r$ 에 대해서는 주파수의 제곱의 역수로서 감소한다.

[0151] 당업자라면, ω_r 에 변화를 도입하는데 사용될 수 있는 SRR 또는 그것의 환경에 대한 다양한 변경들이 존재한다는 것을 알 수 있을 것이다. 예를 들어, 도체 어레이들의 사이즈, 양, 간격 또는 지오메트리에 대한 또는 유전체에 대한 조정들이 이루어질 수 있다. 예시적인 일 방법은 SRR을 둘러싸고 있는 유전체 기관 물질의 절단 깊이(depth of cut)를 조정하는 것이다. 이 방법은, SRR들이 수치적으로 제어되는 마이크로밀링 머신을 사용해 구리 피복 회로 보드상에 패터닝되는 예시적인 샘플 가공과 비교 가능하다. SRR 부근 영역으로부터의 유전 물질 제거(FR4 회로 보드를 위한 $\epsilon \sim 3.8$)는 SRR의 국지적 유전 환경을 변화시켜, 공진 주파수를 변화시킨다.

[0152] 도 9에서, 몇가지 분산 곡선들은 SRR 주위의 기관 물질의 다양한 깊이들을 위한 SRR 복합 구조들에 대응된다. 기관의 깊이는 연속적인 분산 곡선들 사이에서 6 μm 만큼 상이하다. 도 9는, ω_r 이, 절단 깊이가 36 μm 깊이까지 증가함에 따라, 대략 선형적으로 그리고 단조적으로 변한다는 것을 나타낸다. 추가적 시뮬레이션들은, 대략적인 선형성이 240 μm 까지 유효하다는 것을 나타낸다.

[0153] SRR은 기관의 절단 깊이 함수로서 선형적으로 증가하는 공진 주파수(ω_r)를 나타내기 때문에, SRR은 구배 인덱스 메타물질을 설계하기에 편리한 소자이다. 특히, 본 발명의 메타물질은, ω_r 이 셀 번호의 함수로서 변화하는 SRR들의 선형 어레이의 메타물질을 포함한다. 예를 들어, 셀 번호의 함수로서 선형적으로 전진하는 기관 절단 깊이를 가진 메타물질이라면, ω_r 또한 셀 번호의 함수로서 선형적으로 전진할 것인데, 다시 말해, ω_r 은 거리에 선형적으로 비례하게 된다. 수학적 식 16 및 수학적 식 17에 이 관계를 사용하면, 인덱스의 구배가, 적어도 ω_r 로부터 충분히 떨어진 주파수들에 대해서는 거리의 함수로서 대체적으로 일정할 것이라는 것을 알 수 있다.

[0154] 일정한 구배의 메타물질은, 인덱스가 (입사 방향에 수직인 방향으로) 선형적으로 달라지는 평면 메타물질 슬랩으로 입사하는 빔의 편향을 관찰하는 것에 의해 실험적으로 확인되었다. 이 편향을 계산하기 위해, 도 10에 도시된 바와 같이, 두께(t)의 구배 인덱스 평면 슬랩으로 진입하는 2개의 수직으로 입사하지만 상쇄하는 광선들을 고려한다. 도 10의 도면은, 굴절 인덱스가 상수의 구배를 갖는 구조에 의한 파의 편향을 나타낸다.

[0155] 광선들은, 그들이 슬랩을 통해 전파함에 따라, 상이한 위상 전진들을 획득할 것이다. 2개의 광선들이 슬랩면을 따라 x 및 x+ Δx 의 위치들에서 진입한다고 가정하면, 다음의 수학적 식 18과 같은, 슬랩을 가로지르는 2개 빔들의 획득되는 위상차는,

수학적 식 18

$$\Phi(x+\Delta x) - \Phi(x) \sim kx \frac{dn}{dx} \Delta x$$

[0156]

[0157] 도 10에서 L로 마킹된 경로 길이를 가로지르는 위상 전진과 동일해야 한다. 그에 따라, 일정한 공간 구배 인덱스를 가진 물질의 경우, 빔이 균일하게 편향된다는 것을 나타내는 다음의 수학적 식 19를 얻는다.

수학식 19

$$\sin(\theta) \sim r \frac{dn}{dx} = r \frac{dn}{d\omega_r} \frac{d\omega_r}{d\delta} \frac{d\delta}{dx}$$

[0158]

[0159]

여기에서, $\delta(x)$ 는, 슬랩에 따른 거리의 함수로서의 절단 깊이이다. 동위상 파면들은 물질내에서 균일하지 않을 수도 있으므로, 이렇게 간략화된 분석은 얇은 샘플들에 적용하는 것이 바람직스럽다. $\Phi(x)$ 는 임의 두께의 슬랩을 가로지르는 위상 시프트이다. 슬랩이 하나의 단위 셀 두께라면, SRR 셀의 경우, 위상 시프트는 앞서 정의된 바와 같은 Φ 일 것이다.

[0160]

본 발명의 예시적인 구배 인덱스 메타물질은 유전체 기관 및, 서로 산재되어 유전체 기관에 의해 지지되는 2 이상의 도체 격자들을 포함한다. 2 이상의 도체 격자들 및 유전체는 하나 이상의 축을 따라 유효 투자율에 구배를 제공하도록 치수화되어 있다. 여기에서 사용되는 바와 같이, "치수화되어 있다"라는 용어는 광범위하게 해석되어야 하고, 특정 치수들을 가진 부품들을 형성하는 단계를 포함한다. 예를 들어, 유전체 및 도체 격자의 치수를 결정하는 단계는 도체들의 사이즈, 도체들의 간격, 사용되는 유전체 유형, 사용되는 유전체의 양, 도체들 중 하나의 커패시턴스 등을 설정하는 단계를 포함할 수 있다. 예시적인 메타물질에서, 유전체의 절단 깊이는 구배 인덱스를 초래하도록 단위 셀들의 치수를 정하는데 사용되지만, 치수를 정하는 다른 방법들이 수행될 수 있다는 것을 이해할 수 있을 것이다.

[0161]

하나의 예시적인 일정한 구배 인덱스 메타물질은, 기관 깊이가, 전파에 수직인 방향으로 셀 번호의 함수로서 선형적으로 증가하는 SRR들의 선형 어레이를 포함한다. 결과적 어레이는, 도 9의 분산 도면들에 의해 예상될 수 있는 각도만큼 입사 빔을 편향할 것이다. 이 편향각을 추정하기 위해, 도 9의 곡선들 중 임의의 2개 사이의 차를 취하여 매 단위 셀당 위상 시프트의 구배를 찾아낼 수 있다. 매 단위 셀당 위상 시프트는, 일 단위 셀 두께의 구배 인덱스 메타물질에 의해 전파 방향으로 발생될 빔 편향과 등가이다. 도 1의 분산 곡선들로부터 획득되는, 주파수의 함수로서의 편향각의 결과적 플롯이 도 11에 도시되어 있다. 도 11은, 각각의 연속 셀이 $6\mu\text{m}$ 의 절단 깊이만큼 상이한, 도 1에 도시된 SRR 물질을 위한 매 단위 셀당 위상차 대 주파수를 나타낸다.

[0162]

도 11의 곡선들은, 예를 들어, 도 10의 분산 곡선들 중 몇개 사이의 차들을 분석하는 것에 의해 판정될 수 있는, 구배가 일정한 주파수들에 대한 편향각들을 계산하는데만 유용하다. 더 나아가, 낮은 쪽의 공진 주파수 부근에서, 흡수 공진은, (손실들을 고려하지 않는) 시뮬레이션 결과들이 유효하지 않은 이례적인 분산 영역을 초래한다. 복잡한 추가 팩터는, 분석된 구조가 주기적이므로, 수학식 15에 의해 설명되지 않은, ω_r 보다 큰 주파수들에 더 높은 차수 대역들이 존재한다는 것이다. 그럼에도 불구하고, 도 11은, 밴드 갭을 초과하는 주파수들에서, 1° 이상의 매 단위 셀 위상 시프트들이, 각각의 연속 셀이 선행 셀과 관련하여 제거되는 추가적인 $6\mu\text{m}$ 의 유전체 기관을 가진 일 단위 셀 두께의 SRR 슬랩으로부터 획득 가능해야 한다는 지시를 제공한다.

[0163]

예시적인 구배 인덱스 메타물질 샘플들을 가공하기 위해, LPKF 마이크로밀링 머신이 사용되어 구리 피복 (단층) FR4 회로 보드 기관들로부터 (다수 셀들의) SRR들의 가변 길이 스트립들을 밀링하였다. (전파 방향으로) 1, 3, 또는 5개 단위 셀들의 두께들을 가진 몇가지 샘플들이 가공되었다. 복합 메타물질들은 일 단위 셀만큼 간격이 떨어져 있는 약 40개의 스트립들로 이루어지는데, 각각의 스트립은 상이한 깊이로 밀링된 기관을 가진다. SRR 스트립 각각의 공진 주파수는 ARMS(angular resolved microwave spectrometer)에서 측정된다. 스트립 각각의 측정된 공진 주파수들 대 절단 깊이가 도 12에 플로팅되어 있는데, 여기에서, 가공 프로세스의 선형성이 확인된다. 도 12는 기계로 가공된 SRR 샘플들을 위한 공진 주파수 대 기관 깊이를 예시한다. 후속 밀링 통과들 사이의 기관 두께의 공칭 차는 $6\mu\text{m}$ 였다. 2개 깊이들에서, 선형성이 파괴되는데, 선형성으로부터의 이 편이들은, 밀을 공칭 0 절단 깊이 위치에 재배치함에 있어서 재생성이 약간 부족하다는 것을 지시하는, 밀링 머신에서의 도구 비트 변화들과 일치한다는 것에 주의한다. 그러나, 결과적 선형성이 편향 실험을 위해서는 충분한 것으로 입증되었다.

[0164]

구배 인덱스 복합 샘플들은 ARMS 장치에서 측정된다. 샘플에서의 구배를 확인하기 위해, 마이크로파 빔은 (도 10에서와 같이) 샘플 면에 수직으로 유도되었고, 전력은 40 cm 벗어난 반경에서 각도의 함수로서 검출되었다. 실험은, 전계가 2개의 도체 (알루미늄) 플레이트들 사이에서 편광되는 효과적인 2차원 지오메트리의 평면 도파관에서 수행된다.

[0165]

도 13은 전달 전력 대 검출 각도의 맵을 마이크로파 입사 빔의 주파수 함수로서 제시한다. 2개 샘플들이 도면

에서 비교되는데: 도 13(상단)은, 각각의 SRR 스트립이 동일한 (구배가 없는) 5개 셀 깊이의 SRR 메타물질로 이루어진 제어 샘플을 나타낸다. 도 13(상단)의 플롯은 통과 대역들에 대응되는 주파수들 및 투사율이 음인 위치에 대응되는 감쇠 주파수 영역에서의 전달을 나타낸다. 도 13에 의해 도시된 바와 같이, 마이크로파 빔은 약 0도를 중심으로 편향없이 샘플을 벗어난다.

[0166] 도 13(하단)은, 3개 및 5개 셀 샘플들을 함께 조합하는 것에 의해 형성되는, 본 발명의 (전파 방향으로) 8개 셀 두께의 구배 인덱스 샘플에 대한 측정 결과들을 제시한다. 도 11에서 예상된 것과 일치하는 특징적인 꼬리를 볼 수 있는 도면에서는, 특히 갭 영역의 고주파수쪽에서, 각도 편이가 명백하다. 곡선의 정성적 태양들은, 갭의 저주파수쪽에 대한 편향의 증거가 좀더 약하다는 것을 제외하면, 상기 이론 및 시뮬레이션들과 일치한다. 그러나, 저주파수쪽이 (분산 도면들에서는 무시된) 흡수가 가장 강한 공진에 대응되므로, 이러한 대칭성 부족은 예상 가능하다.

[0167] 편향의 측정 및 계산 각도 대 주파수의 상세한 비교는 4개 및 8개 셀 두께의 구배 인덱스 메타물질들을 위한 도 14에 도시되어 있다. 곡선들은 도 11로부터 판정된 구배에 대응되는 한편, 개방 원들 및 검은 원들은 측정점들이다. 분산 곡선에 주파수 변환이 적용되어, 계산된 밴드 갭을 실제 구조에서 측정된 밴드 갭과 일치시키는데, 다른 피팅 또는 조정들은 수행되지 않았다. 도 14는 8개 단위 셀 두께의 구배 인덱스 SRR 슬랩의 측정된 편향 각(검은 원들)을 나타낸다. 회색 곡선들은 도 11에 도시된 것들로부터 취해지지만, 계산된 밴드 갭 영역과 측정된 밴드 갭 영역이 중첩하도록 주파수 변환된 상태이다. 도 14에 도시된 뛰어난 일치는, 도 12에서 예시된 바와 같이, 가공 프로세스의 정확도를 증명한다. 또한, 이러한 일치는 단일 단위 셀조차도 잘 정의된 굴절 인덱스를 갖는 것으로 설명될 수 있다는 중요한 증거를 제시하는데, 이 효과의 해석은 구조내에서 셀에 따라 제어 가능하게 변화하는 굴절 인덱스에 의존하기 때문이다.

[0168] 도 13 및 도 14는, 본 발명의 설계된 공간 분산 구조들의 실용성을 나타낸다. 이 경우, 설계에 의해 조정 가능한 각도만큼 빔을 균일하게 편향시키는 효과를 가진 선형 구배가 도입되었다. 예를 들어, DSRR들, 분할 원형 공진기들, 및 다른 것들을 포함하는, 다른 메타물질 구성들도 사용될 수 있지만, SRR들의 특성들이 잘 확립되어 있으므로, SRR 시스템으로 작업하는 것이 편리하다. 특히, SRR의 공진 주파수는 비교적 식별이 용이하고, (기판의 절단 깊이를 포함하지만, 그것으로 한정되는 것은 아닌) 단위 셀의 파라미터들을 약간 변경하는 것에 의해 쉽게 튜닝될 수 있으며, SRR의 전반적인 주파수 의존도를 대략적으로 파라미터화하는데 사용될 수 있다. 구배를 도입하기 위한 유일한 방법은 아니지만, 구배 인덱스 SRR 구조는 거시적 소자들을 조합하는 것에 의해 메타물질의 또 다른 고유 유형을 생성할 수 있는 가능성을 보여준다.

[0169] 본 발명의 구배 메타물질의 다른 실시예는 구배 인덱스 렌즈들을 포함한다. 파 전파 방향에 수직인 축에 따른 인덱스의 (선형에 대비되는) 포물선 분포는 그것을 편향시키는 것이 아니라 방사선을 포커싱하는 구조를 초래한다. 그러한 구배 인덱스 렌즈들의 일례들로는 광 주파수들에서 사용되는 방사형 구조의 구배 인덱스 로드 렌즈들(radial gradient index rod lenses) 및 마이크로파 주파수들에서 사용되는 Luneberg 렌즈들을 포함한다.

[0170] 구배 인덱스 로드 렌즈들은 열 확산을 통해 이온 도핑된 광 유리 물질들을 사용한다. 이 프로세스는 (0.2 미만의) 굴절 인덱스의 작은 변화들만을 발생시킬 수 있고, (1 cm 미만의) 상당히 작은 반경의 로드들로만 한정된다. $n=1$ 내지 $n=2$ 의 상당히 넓은 인덱스 범위를 요하는 Luneberg 구면 또는 반구면 렌즈들이, 특정한 사이즈 제한없이, 단계화된 인덱스 장치들로서 구현될 수 있다. 양자의 장치들 모두 유전체 유전율의 구배들만을 이용하므로, 주변 매체들에 대해 제한된 임피던스 정합을 가진다. 구배 인덱스 메타물질들은 광학 장치의 개발에 유용한 다른 접근 방법을 제공할 수 있다. 이제, 음의 굴절 인덱스를 포함하여, 메타물질들에서 식별된 물질 응답의 증가된 범위로서, 인공적으로 패터닝된 매체들로부터 형성된 전통적인 평면 렌즈들로부터 상당한 호환성 및 향상된 성능이 가능할 것이다. 예를 들어, 자기 투자율 구배들을 포함하는 본 발명의 구배 인덱스 메타물질들은, 인덱스가 공간적으로 변화하지만 자유 공간과의 정합 상태를 유지하는 물질들을 개발하는데 사용될 수 있다. 더 나아가, 본 발명의 구배 인덱스 메타물질들은 THz를 포함하는 고주파수들에서 실현 가능할 것으로 생각된다.

[0171] 구배 인덱스를 가진 메타물질들이 다수의 추가적 애플리케이션들에 유용하다는 것이 입증될 수 있다. 본 발명의 메타물질은, 예를 들어, 구배 인덱스를 가진 메타물질로부터 형성된 렌즈를 포함한다. 구배 인덱스는 다양하고 광범위한 포커싱 효과들을 제공하도록 구성될 수 있다. 평평한 표면들을 가지며 복수개의 단위 셀들로부터 형성되는 원형 메타물질은, 예를 들어, 중앙 영역의 제 1 인덱스 및 밖을 향하여 반지름 방향으로 이동하며 점진적으로 감소(또는 증가)하는 인덱스를 갖도록 구성될 수 있다. 이것은, 사실상 평탄한 메타물질로부터 다양한 포커싱 효과들을 초래할 수 있다. 비평탄 표면들 및 원이 아닌 주변 형태들을 포함하는, 다른 지오메트리

들이 유사하게 사용될 수 있다. 또한, 구배 인텍스들을 가진 복수개의 메타물질들이, 원하는 바에 따라 광선들을 유도하기 위해, 서로 적층된 구성으로 정렬될 수도 있다. 광선들은, 예를 들어, 물체 "주위"를 통과함으로써, 그것을 사실상 "비가시적"인 것으로 렌더링하도록 유도될 수 있다.

[0172] D. 음의 굴절 인텍스 복합 메타물질의 가공 및 특성화

[0173] 본 발명의 다른 태양은 복합 메타물질들에 관한 것이다. 예시적인 음의 인텍스는 8.4와 9.2 GHz 사이에서 음의 굴절 인텍스를 갖는 2.7 mm 두께의 복합 패널들을 포함한다. 예시적인 복합 메타물질은 기존의 시판용 다층 회로-보드 리소그래피를 사용해 가공되는데, 회로 보드 표면들에 수직인 방향으로 산란 소자들의 섹션들을 형성하기 위한 비아들의 사용에 의해 (전자기에 대비되는) 3차원 물리 구조가 도입된다. 산란 파라미터 측정들로부터, 복합 구조의 복소 유전율, 투자율, 인텍스, 및 임피던스가 명료하게 판정된다. 이 측정들은 음의 인텍스 대역 및 연관된 손실들에 대한 정량적 판정을 가능하게 한다. 추출된 물질 파라미터들은 시뮬레이션 결과들과 우수하게 일치하는 것으로 나타난다.

[0174] 종래 기술의 메타물질들이 구성되어 마이크로파 주파수들에서의 음 굴절을 실험적으로 증명하는데 사용되었다. 이 물질은, 음의 ϵ 를 제공한 와이어들의 어레이와 산재된, 음의 μ 를 제공한 이중 SRR들의 어레이를 이용하였다. 음의 ϵ 영역이 SRR들과 연관된 음의 μ 영역과 중첩되었기 때문에, 복합 구조는 음의 인텍스 주파수 대역을 가졌다. 이 물질에서, SRR들 및 와이어들은 회로 보드 기판의 어느 한 면상에 광 리소그래피에 의해 패터닝되었다. SRR/와이어 구조들은 가공하기 어렵다는 것이 입증되었다. 예를 들어, SRR 소자들은 가공에 대해, 현재의 음의 인텍스 메타물질 설계들에 복잡한 층을 추가하는 특정 부담을 부여한다. 직선 와이어들과 달리, SRR 소자들은 통상적으로, 강한 자기 응답을 제공하기 위해, 파 전파 방향으로 상당한 길이를 요한다. 이 제한 사항을 충족시키기 위해, 선행의 회로-보드 기반 SRR 설계들은, 평평한 SRR 회로 보드를 스트립들로 섹션화하거나 입사파 방향이 입사파의 전파 방향에 수직인 평면 및 SRR 축들에 위치하도록 배향된 평평한 회로 보드들의 시트들을 사용할 것을 요구하였다.

[0175] 본 발명의 예시적인 일 메타물질은 다층 회로 보드 기술들을 이용해, 추가적인 조립 단계가 불필요한, 도 15(a) 및 도 15(b)로써 도시된 바와 같은, 음의 인텍스 메타물질 구조를 가공한다. 본 발명의 예시적 설계는 선행 메타물질들에 본질적인 "와인-크레이트(wine-crate)" 조립 단계가 불필요하고, 대량 생산에 아주 적합하다. 예시적인 일 설계에서는, 이중 SRR들이 아니라 단일 SRR들이 사용되어 음의 μ 를 실현한다. 종래 기술의 메타물질 구조들에서는, 내포형 이중 SRR들이, 공진기 소자의 용량을 증가시키는 편리한 수단으로서 이용되었고, 여기에서는, 비아 패드들의 직경 및 매개층의 좀더 높은 유전 상수 조합이, 제 2 링의 추가 용량이 불필요할 정도로 충분한 용량을 도입한다.

[0176] 예시적인 일 복합 메타물질이 3개의 적층된 유전체층들(50, 52 및 54)로부터 조립된다. 상단(50) 및 하단(54) 층들은, 사이에 고어 스피드 보드(Gore Speed Board)($\epsilon=2.56$, $\tan \delta=0.004$)의 수지 침투 가공재층(prepreg layer; 52)이 샌드위치되어 있는 로저스(Rogers) 4003 회로 보드 적층재들($\epsilon=3.38$, $\tan \delta=0.003$)로 이루어진다. 예시적인 층(52)은 0.0015" 두께의 고어 스피드 보드 층이다. 따라서, 구조(층들; 50, 52, 및 54)의 총 두께는 약 0.065 인치이다. 더 나아가, 예시적 치수들이 다음의 표 1에서 지시된다. 층들은, 예를 들어, 고어 및 로저스 회로 사이의 인터페이스들에 접착제를 사용해 다같이 경계 적층된다.

표 1

[0177] 음의 인텍스 복합 구조의 측정 파라미터들과 시뮬레이션 파라미터들(밀리미터)

치수	측정	시뮬레이션
단위 셀		
X	3.01±0.01	3.00
Y	3.01±0.01	3.00
Z	2.62±0.01	2.616
쓰루 비아		
외경	0.131±0.006	0.1305813
내경	0.090±0.009	0.0896786
높이	2.41±0.05	2.4245
블라인드 비아		
높이	1.07±0.03	1.052376

적층재 두께		
Gore	0.078=0.003	0.077831
Rogers 4003	0.92=0.03	0.894081
SRR 치수들		
비아-비아 거리	2.51=0.02	2.5121047
갭	0.320=0.006	0.3197473
바깥층, 두께	0.094=0.009	0.093967
바깥층들, 폭	0.176=0.009	0.1761885
바깥층들, 길이	2.90=0.06	2.899336
와이어 치수들		
두께	0.0249=0.0004	0.024906
폭	0.500=0.005	0.50

[0178] 로저스 회로 보드들(50, 54) 모두는 처음에, 소자들이 전통적인 광 리소그래피를 사용해 패터닝되는 양쪽 면들 상에 증착된 (1/2-온스 또는 12 μm 두께의) 얇은 구리 도체층들을 가진다. 와이어 소자들은, 도 15(a)에 도시된 바와 같이, 고어 스피드 보드를 대향하는 로저스 보드들의 면들에 스트립들(56)로서 패터닝된다. 사용되는 특정한 이중 와이어 지오메트리는, 구조가 파 전파 방향에서 반사 대칭성을 보유하도록 선택되었다. 다른 지오메트리들도 본 발명내에서 유용할 것이다. 대칭 구조들은, 후술되는 산란(S-) 파라미터들로부터 물질 파라미터들의 검색을 수행하는 경우에 편리하다. 예를 들어, 구조의 중앙에 배치된 단일 와이어가 거의 동일한 결과들을 초래하겠지만, 그러한 배치는 현재의 다층 설계에서 실행 불가능하다.

[0179] 공칭 직사각형 SRR 소자의 2개 면들은 구리로 이루어진 얇은 도체 스트립들(58)로써 Rogers 회로 보드의 바깥 면들에 패터닝된다. 도체의 나머지 2개의 수직 면들 또는 레그들은, 회로 보드의 적층재층들(50, 52 및 54)을 통해 연장하는 비아들 - 도금된 쓰루 홀들 - 로부터 형성된다. 일 면(60)은 회로 보드의 3개 층들 모두를 통해 연속적으로 연장하는 쓰루 비아에 의해 형성된다. SRR의 마지막 면은, 각각이 원형 플레이트들(66)의 중앙 적층재층(54)의 개개 면들에서 종료하는 2개의 블라인드 비아들(62 및 64)에 의해 형성된다. 유전체층(54)은 플레이트들(66)간의 갭을 정의한다. 추가적인 유전체층들(68)이 제공되어 적층재의 최상단 및 최하단 표면들을 커버할 수도 있다. 작은 고리 링들이 용량성 갭을 도입한다. 도 15(b)는 어레이로 정렬된 다수의 도 15(a)의 개개 셀들을 포함하는 제조된 예시적 복합 구조의 상이다. 도시된 패터닝된 구리 스트립들은 매입된 링 공진기의 일 면이다. 결과적 SRR의 측면도가 도 15(c)에 도시되어 있다.

[0180] 도 15로써 예시된 것 이외에, 본 발명의 실시내에서 다수의 등가 구조들이 가능하리라는 것을 알 수 있을 것이다. 다른 지오메트리들 및 구성들이 가능하다. 예를 들어, 도체 링들에 수직인 상단면과 하단면 사이의 비아들에서의 사실상 직선 도체들로써, 층(50)의 상단면 및 층(52)의 하단면에 도체의 링 공진기들이 형성될 수 있다. 또는, 사실상 직선 비아들이 중간층(52)에 배치될 수도 있다. 추가적인 일례로써, 중간층 및 층들(50 및 54)의 표면들상에 형성된 직선 도체들상에 도체 링 공진기가 형성될 수도 있다. 더 나아가, 단일 링 공진기들이 아닌 도체들이 사용될 수도 있다.

[0181] 다수의 다른 특정 실시예들이 가능하다. 실제로, 당업자들은, 도 15의 일례로써, 본 발명의 성분 메타물질들의 중요한 이점들 중 하나가 시판용 회로 보드 가공 방법들을 사용할 수 있는 가공 호환성과 관련이 있다는 것을 알 수 있을 것이다. 이 호환성이, 회로 보드 유전체들을 사용해 효율적으로 실현될 수 있는 광범위하고 상이한 도체 및 유전체 구성들을 초래한다.

[0182] 더 나아가, 도 15의 실시예 자체가 변경되어 단위 셀들 사이의 변경된 유전율 또는 투자율을 제공한다. 이런 식으로, 구매 인텍스를 가진 메타물질들이 형성될 수 있다. (도 15에 의해 예시된 것과 같은) 일부 메타물질 단위 셀들의 치수들을 변경하고 이들을 다른 단위 셀들과 조합하여 메타물질을 형성하는 것에 의해, 구매 인텍스를 가진 메타물질이 형성될 수 있다. 도 16은, 유전체의 제거를 통해 그것의 용량을 변경하도록 치수 조정된 예시적인 적합한 일 실시예를 예시한다. 내부 적층재층(52)에 홀들을 사용해 공기 갭 커패시터들을 생성하는 것은, 예를 들어, 유전체 손실들을 감소시키는데 유용할 수 있다. 공기 갭 공동들(air gap cavities)은, 일 면으로의 내부 적층 이후에 (Microline Cut 350, LPKF와 같은) CNC 레이저 박리 도구를 사용해 스카이빙(skiving)하는 것에 의해 형성될 수도 있다.

[0183] 도 15의 단위 셀과 같은 단위 셀로의 추가적인 치수 조정은 유전율 또는 투자율을 변경하게 할 수도 있다. 일

레로써, 변경될 수 있는 예시적 일 치수는 플레이트들(68)의 사이즈이다. 변경될 수 있는 다른 예시적 치수들은 플레이트들(68)과 도체들(56) 사이의 거리, 도체들(56)의 사이즈, 유전체의 양, 층(52)의 두께 등을 들 수 있다. 다른 도체 구성들이 사용된다면, 다른 치수 조정이 수행되어 유전율을 변경할 수 있다는 것을 알 수 있을 것이다. 이들 모두는, 리소그래피, MEM, 또는 회로 보드 가공 방법들을 사용하는 시판용 가공 방법들에 아주 적합한 치수들이다.

[0184] 맥스웰의 방정식들을 풀어내는 유한 소자 기관 소프트웨어 패키지, (HFSS)(Ansoft)에서 유도된 솔루션을 사용해, S-파라미터들이 도 15에 도시된 단위 셀의 변경들을 위해 시뮬레이션되었고, 물질 파라미터들이 표준 방법들에 의해 검색되었다. 이 분석을 통해, x-대역 주파수들에 걸쳐 거의 정합된 음의 인텍스 대역을 제공하는 적당한 구조가 발견되었다. 그 다음, 최적화된 구조가 가공되었다. 샘플에 대해 산란 측정들을 수행하기 전에, 수치 시뮬레이션들과의 최선 비교가 획득될 수 있도록 하기 위해, 상세한 물리 측정들이 수행되었다. 샘플 시트들 중 하나에서, 상이한 평면들에서의 수개 절단들이 이루어졌다. 그 다음, 획득되는 면들 각각은 현미경하에서 연마되고 촬영되었다. 대응되는 디지털 이미지의 픽셀들을 카운팅하는 것에 의해, 구조의 임계 소자들 각각의 치수들이 판정되었다. 길이가 0.1 mm인 것으로 공지된 강도 테스트 디봇(divot)을 사용해 캘리브레이션이 실현되었다. 그 다음, 표 1에서 요약된 물리 측정들이, 다음에 도시된 비교 시뮬레이션들에 사용되었다.

[0185] 음의 인텍스 복합 구조의 예상되는 특성들을 확인하기 위해, S-파라미터들(S₁₁ 및 S₂₁)의 크기 및 위상이 측정되었다. 실험들은 자유 공간에서 수행되었다. 이 실험에서는, Agilent 8510B 벡터 네트워크 분석기가 사용되어 주파수 범위(7-13 GHz)에 걸쳐 마이크로파들을 스위칭하는데 사용되었다. 2개의 마이크로파 혼들(horns)(Rozendal Associates Inc., Santee, CA)이 소스 및 검출기로서 사용되었다. 혼들에 탑재된 렌즈 어셈블리들은 약 30.5 cm(12 인치)의 거리에 포커싱된 스팟을 발생시켰다. 초점에 샘플이 배치되었다. 전달 실험들을 위해, 소스 및 검출기 혼들 모두가 샘플로부터의 일 초점 길이에 배치되는 공초점(confocal) 설정이 사용되었다. 캘리브레이션은, 어떤 물질도 없을 때에 전달 전력이 측정되는 "관통(through)" 측정을 사용해 수행되었다. 반사 측정을 위해, 혼들은 샘플과 동일한 쪽으로 이동되었다. 혼/렌즈 어셈블리들의 유한 사이즈 때문에, 2개 혼들은, 전력이 샘플의 수직 표면으로부터 16°의 각도에서 입사하도록, 보완되었다. 반사는, 이 측정을 위한 (180° 위상 시프트를 갖춘) 완벽한 반사기로 가정되는 알루미늄 플레이트로부터의 반사 전력을 측정하는 것에 의해 캘리브레이션되었다.

[0186] 음의 인텍스 복합 구조의 단일층을 위한 S-파라미터들의 크기 및 위상이 도 17에서 제시된다. 도 17은, 음의 인텍스 복합 구조의 단일층을 위한 S-파라미터들: S₂₁의 위상(검은색 곡선) 및 S₁₁(회색 곡선)을 나타낸다.

[0187] 과거 작업의 음의 인텍스를 증명하는 방법은, $\mu < 0$ 인 중단 대역의 주파수 범위를 식별하면서, 먼저 SRR들의 샘플만을 통해 전달 전력을 측정한 다음, 와이어 구조만을 통해 전달되는 전력을 측정하고, 마지막으로 복합 구조를 통해 전달되는 전력을 측정하는 것이었다. 이 방법은, 위상 데이터가 이용 불가능할 때 그리고 음의 인텍스 주파수가 잘 정의된 통과 대역(well-defined pass band)을 형성할 때, 편리하다. 그러나, 도 17로부터 알 수 있는 바와 같이, 명백하게 음의 인텍스를 지시하는, 도 17(b)의 단일층 전달 전력으로부터 용이하게 식별 가능한 사양들이 존재하지 않는다. 그러나, 도 17(a)의 측정된 위상 데이터의 잡음 레벨은 상당히 낮은데, 이는, 완전한 S-파라미터들의 검색 절차가 안정적인 결과들을 제공할 것을 함축한다.

[0188] 메타물질을 위한 물질 파라미터들의 완전한 검색은, 유한 두께의 슬랩으로부터 전달 및 반사 진폭들과 위상들을 측정하는 것에 의해 진행된다. 연속적인 등방성 물질들의 경우, 전달 및 반사 계수들은 쉽게 반전될 수 있는 분석 형태들을 가진다. 예를 들어, 산란 방정식들의 반전은, 굴절 인텍스의 판정을 허용하는 다음의 수학적 20과 같은 형태를 초래하는데,

수학식 20

$$\cos(nka) = \text{Re}\left(\frac{1}{S_{21}}\right) - \frac{1}{2|S_{21}|^2}(A_1 S_{11} + A_2 S_{21})$$

[0189]

[0190] 여기에서, A₁ 및 A₂는 손실들의 부재시에 0이 되는 실수값 함수들이다. 수학식 20은, 무손실 샘플의 경우, 단지 S₂₁의 위상 및 진폭으로부터 인텍스가 판정될 수 있다는 것을 나타낸다. 더 나아가, 대략적으로 정합된 샘플들의 경우, 수학식 20은 S₂₁의 위상과 인텍스 사이의 강한 상관 관계를 지시한다. 따라서, 도 17(상단)에 도시된,

S_{21} 의 위상에서의 딥(dip)은, 본 발명의 예시적 샘플이 8-9 GHz 사이의 주파수 영역 어딘가에서 음의 굴절 인덱스를 가진다는 지표이다. 그러나, 측정들로부터 이용 가능한 모든 성분들을 가진다면, 이러한 근사에 의존할 필요없이, 다음의 수학적 식 21로써 주어지는 복소 임피던스 뿐만 아니라 복소 인덱스를 위한 정확한 함수들을 복구할 수 있다.

수학적 식 21

$$z = \pm \sqrt{\frac{(1+S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1-S_{11})^2 - S_{21}^2}}$$

[0191]

[0192]

임피던스(z) 및 인덱스(n)를 판정하기 위한 검색 절차가 HFSS에서 시뮬레이션된 S-파라미터들 뿐만 아니라 측정된 S-파라미터들 모두에 대해 수행되었다. n 의 검색은 일반적으로, 수학적 식 20에서의 아크 코사인 함수로 인한 다수 분기들로 인해 복잡해지지만, 분기들은 복잡한 검색 알고리즘이 불필요한 (일 단위 셀 두께의) 얇은 측정 샘플을 위해 충분히 분리된다. 그러나, 원인 물질을 위해 필요한 요구 사항들인 $\text{Re}(z) > 0$, $\text{Im}(n) > 0$ 및 $\text{Im}(n) > 0$ 을 부여하는 것에 의해 제거될 수 있는, n 및 z 에서의 불명료한 부호 표현이 존재한다. 측정된 S-파라미터 데이터에 31 포인트 평탄화(31 point smoothing)를 적용하여 본 설정에 본질적인 VSWR(voltage standing-wave ratio) 공진들의 영향을 감소시키는 것이 아닌, 다른 조작은 데이터에 대해 수행되지 않았다. 수학적 식 20 및 수학적 식 21은 손대칭성(chirality) 또는 쌍이방성(bianisotropy)으로 인한 가능한 모든 효과들을 무시한다는 것에 주의한다. 본 발명의 음의 인덱스 복합 구조들은 임의의 자기-유전 커플링을 제거하거나 적어도 최소화하도록 설계되었으므로, 간단한 이 공식들이 검색 절차를 위해 대체적으로 유효할 것이다.

[0193]

검색된 z 및 n 은, 각각, 도 18(상단) 및 도 18(하단)에 도시된다. 도 18(상단)은 본 구조의 일 단위 셀을 위한 시뮬레이션 데이터(점선 곡선들)로부터 그리고 측정된 S-파라미터들(실선 곡선들)로부터 복구된 임피던스(z)를 나타낸다. 도 18(하단)은 시뮬레이션 데이터(점선 곡선들)로부터 그리고 측정된 S-파라미터들(실선 곡선들)로부터 복구된 굴절 인덱스(n)를 나타낸다. 검은색 곡선들은 실수 부분들이고, 회색 곡선들은 허수 부분들이다.

[0194]

음의 인덱스 주파수 대역은 측정 샘플에서 8.4와 9.2 GHz 사이에서 발생한다. 음의 인덱스 영역에 걸친 시뮬레이션 데이터와 측정 데이터 사이의 일치는 정량적으로도 그리고 정성적으로도 우수하다. 곡선들의 4개 세트들 사이의 임의의 기준 불일치는, 물질 파라미터들을 약간 변경하는 것에 의해, 예를 들어, 구리 소자들을 위해 사용되는 도전율을 조정하는 것에 의해 추가적으로 최소화될 수 있다. 불일치 중 일부는 S_{11} 측정에 사용되는 비-수직 입사에 의해서도 초래될 수 있다.

[0195]

유전율(ϵ) 및 투자율(μ)은 $\epsilon = n/z$ 및 $\mu = n/z$ 에 따라 간단하게 n 및 z 에 관련된다. 도 18에 플로팅된 n 및 z 의 값들로부터 획득된, ϵ 및 μ 에 의존하는 검색 주파수가 도 19에서 제시된다.

[0196]

도 19(상단)는 본 구조의 일 단위 셀을 위한 시뮬레이션 데이터(점선 곡선들)로부터 그리고 측정 데이터(실선 곡선들)로부터 복구된 유전율(ϵ)을 나타낸다. 도 19(하단)는 시뮬레이션 데이터(점선 곡선들)로부터 그리고 측정 데이터(실선 곡선들)로부터 복구된 투자율(μ)을 나타낸다. 검은색 곡선들은 실수 부분들이고, 회색 곡선들은 허수 부분들이다.

[0197]

ϵ 의 실수부는, 그 아래가 음인 0을 나타낸다. 또한, 복합 구조의 μ 는 주로 SRR들의 응답으로 인한 특징적 공진 형태를 나타내는데, SRR들의 응답은 μ 의 실수부가 음인 영역을 가진다. ϵ 및 μ 의 실수부들 모두가 음인 주파수 대역은 도 18(b)에서 발견된 음의 인덱스 대역과 일치한다.

[0198]

요약하면, 본 발명의 예시적 일 태양은, 굴절 인덱스가 음인 주파수 대역을 가진 복합 메타물질에 관한 것이다. 예시적 구조는, 그것이 절단 및 추가적인 어셈블리 단계들을 위한 필요를 미연에 방지하는 전통적인 다층 회로 보드 기술을 사용해 전체적으로 조립될 수 있으므로, 예를 들어, 가공의 맥락에서 다수 이점들 및 이익들을 가진다. 예시적 구조는, 측정 구조들과의 우수한 일치를 나타내는 수치 시뮬레이션들에 따른다.

[0199]

S-파라미터들의 완전 검색은 예시적 샘플의 물질 파라미터들에 대한 완전한 정보를 직접적인 방식으로 제공한다. 스넬의 법칙 측정들과 같은, 간접적인 방법들이 중요한 보완 정보를 제공할 수 있지만, S-파라미터들의 측정 및 검색은 반-자동 메타물질 특성화 절차의 기초를 형성할 수 있다.

[0200]

E. 본 발명의 추가적 메타물질 실시예들

[0201]

메타물질들은 표면 플라즈몬 광학(surface plasmon optics)의 맥락에서, 음의 인덱스 메타물질들의 맥락에서,

다른 맥락들에서도 상당한 관심을 받아 왔다. 그러나, 음의 인덱스 메타물질들에서, 음의 응답은 그것을 본질적인 제한들과 연관시켜 왔다. 공진 주파수 부근의 주파수 영역은, (어떤 것이 공진인지에 따라) ϵ 이나 μ 중 어느 하나의 허수부가 비교적 커지는 증가된 흡수를 디스플레이한다. 이 거동은 공진 거동과 일치하는 동시에 공진 거동에 본질적이고, 궁극적으로 음의 물질들에 주된 제약들을 가한다. 수동적인 음의 물질들의 경우:

[0202] 1. 음의 물질 응답은 물질 공진들과 연관된다.

[0203] 2. 음의 물질들은 주파수에 따라 분산될 것이다.

[0204] 3. 음의 물질들은 유한한 대역폭을 가질 것이다.

[0205] 4. 음의 물질들은 대체로 더 큰 손실들을 나타낼 것이다.

[0206] 수동 물질들의 경우, 드루드-로렌츠 형태들을 초래하는 인과 관계가 상기 문장들을 함축한다는 것이 강조되어야 한다. 음의 물질들의 물리적 특성을 추구하고 음의 물질들을 사용해 경쟁적인 애플리케이션들을 개발하기 위해, 본 발명은 이러한 기초적 제한 사항들 중 하나 이상을 최소화하는 공학적 물질들(engineered materials)을 포함한다.

[0207] 이러한 제한들을 이해하는 다른 방법은 저장 에너지 밀도의 맥락에서 이해하는 것이다. 물질의 필드 에너지 밀도를 위한 익숙한 표현은 다음의 수학적 식 22와 같다.

수학적 식 22

$$\langle U_{medium} \rangle = \frac{1}{2} \epsilon E^2 + \frac{1}{2} \mu H^2$$

[0208] 그러나, 시간에 걸쳐 포인팅 벡터를 평균하는 것에 의해 도출된 이 표현이, ϵ 및 μ 가 시간적으로 전역화함에 따라, 분산 물질의 존재시에는 유효하지 않다. 물질내에 충돌 전하들과 연관된 관성이 존재하기 때문에, 주파수 도메인에 쉽게 수반되는 거대한 양의 또는 음의 물질 응답이 대가를 치르며 발생한다. 시간 도메인에는, 정상 상태 (단색) 솔루션이 실현될 때까지 사실상 지연이 존재한다. 음의 물질들과 연관된 물리적 특성들 중 다수가 주파수 도메인에서 발견된 솔루션들에 의존하므로, 이 동력들은 정상 상태 솔루션들의 실현 가능성 정도를 판정함에 있어서 아주 중요하다.

[0210] 드루드-로렌츠 매체의 세부 사항들이 고려될 때, 분산 매체의 에너지 밀도를 위한 좀더 일반적인 표현이 다음의 수학적 식 23으로서 발견될 수 있다.

수학적 식 23

$$\langle U_{medium} \rangle = \frac{1}{2} \frac{d(\omega \epsilon)}{d\omega} E^2 + \frac{1}{2} \frac{d(\omega \mu)}{d\omega} H^2$$

[0212] 이 표현은, 댐핑이 비교적 작은 경우에 유효하다. 이 표현은, ϵ 및 μ 가 소정 주파수에서 음일 수도 있지만, 양의 에너지 밀도가 유지되도록, 주파수 분산적이어야 한다는 것을 나타낸다.

[0213] ϵ 또는 μ 중 하나가 음인 물질들이 공진되어 있다. 자연스럽게 발생하는 물질들에서, 드루드-로렌츠 형태들을 발생시키는 공진들은 일반적으로 한정된 주파수 범위들내에서 발생한다. 예를 들어, 전기 공진들은 높은 THz 주파수들 또는 더 높은 주파수들에서 발생하는 경향이 있고, 포논(phonon) 모드들, 도체 전자들의 플라즈마형 발진들, 또는 다른 기초적 프로세스들로부터 발생한다. 자기 공진들은 일반적으로 그러한 프로세스들과 강자성 또는 비강자성 공진으로서 연관된 본질적인 자기 물질들(magnetic materials)에서 발생한다. 이 공진들은 좀더 높은 GHz 주파수들에서 쇠퇴하는 경향이 있고, 전부는 아닌 특화된 몇몇 시스템들에서는 THz 주파수들에서 사라진다.

[0214] 기존의 등가 물질들이 존재하지 않는 곳에서 전기 또는 자기 공진들 하나를 갖는 메타물질들이 설계될 수 있다. 전기 및 자기 공진들은 메타물질 구조들에서, THz 주파수들까지의 임의 주파수에 배치될 수 있다. 특히, 전기 및 자기 구조들을 조합하는 것에 의해, ϵ 및 μ 가 동시에 음인 주파수 대역을 가진 물질에 도달할 수 있다. ϵ μ 의 곱에 대한 제곱근을 취하는 것에 의해 판정되는, 그러한 물질을 위한 굴절 인덱스(n)는, 물질이 방사에 투명하다는 것을 지시하는 실수이다. 그러나, ϵ 및 μ 모두가 음일 경우, 제곱근의 부호를 위한 정확한 선택은 음이라는 것이 알려져 있다. 따라서, ϵ 및 μ 모두가 음인 물질들은 음의 인덱스 물질들(NIM들)로서 특정

지워질 수 있다.

- [0215] NIM들은, 다른 이유들 중에서도, 그들이 맥스웰 방정식들의 앞서 이용 불가능한 솔루션들을 허용하기 때문에, 관심을 끈다. 이와 같이, NIM들은 메타물질들의 효용에 대한 놀라운 일례를 표현한다. 그러나, 주목할만한 물리 현상들이 NIM들을 위해 예측되긴 하였지만, 음의 물질들에 대한 기본적인 제한들을 엄두에 두어야 한다. 예를 들어, $\epsilon = \mu = -1$ 의 표면은 무반사일 수 있다는 것일 제안되었다. 그러나, 이 문장은 정상 상태 조건으로 제한될 수도 있는데; 자유 공간으로부터의 파면이 그러한 표면에 충돌하면, 정상 상태 솔루션에 도달될 때까지, 일시적인 것들과 연관된 반사들이 발생할 수도 있다.
- [0216] 과거 몇년에 걸친 노력이, 음의 인덱스 메타물질들이 설계, 가공 및 캐리터리제이션될 수 있다는 것을 증명하여 왔다. 정상 상태 실험들의 음 굴절이 증명되어 왔다. 초기 작업의 축적이 음의 굴절 인덱스를 단단한 기초 위에 올려 놓았다면, 이제 우리는 전진하여 신규한 이 물질들을 유용하게 할 물질들 및 방법들을 추가적으로 개발할 위치에 있다. 본 발명의 예시적 실시예들은 신규하고 유용한 메타물질들에 관한 것이다. 몇가지 실시예들이 음의 인덱스 메타물질들에 관한 것이기는 하지만, 그것들은 양의 인덱스 메타물질들의 형태에서 유용성을 발견하는 것일 수도 있다.
- [0217] E(1). 이중 편광 NIM 개발
- [0218] 지금까지는, 임의적인 입사 편광을 가진 파들을 위해 음의 인덱스를 갖는 물질의 증명이 없었다. 본 발명은, 도 20에 예시된 실시예에서, 그러한 메타물질을 포함한다. 그러한 예시적 구조의 가공은, 단위 셀이 제 1 전기 편광 방향 뿐만 아니라 제 2 전기 편광 방향으로 정렬된 추가 와이어 소자에 대해서도 수직으로 배향된 추가적인 자기 루프를 포함할 것을 요구한다.
- [0219] 도 20에 예시된 예시적 메타물질은 4개 층(Cu) PCB 가공 기술을 사용하는 이중 편광 NIM 설계이다. 교차하는 단면 패턴의 직사각형 도체들은 각각의 편광을 위해 2개의 용량성 캡들을 갖는 SRR들이다. 음의 유전율은 2D의 등방성 거동을 제공하는 직교하게 교차하는 수직 와이어들에 의해 제공된다. 45° 회전은 소자들 사이의 커플링을 최소화하고, 평행층 접근 방법은, 쌍이방성 등의 복잡한 관계를 도입하지 않으면서, 커패시터 플레이트들을 형성하는 Cu의 동일층을 사용할 수 있게 한다.
- [0220] 도 20에 도시된 예시적 설계는 입사 전자기파의 편광들 모두를 위해 음의 굴절 인덱스를 나타낼 것이다. 이 설계는 셀 설계내에 추가적인 소자들을 포함하지만, 가공에 추가적 어려움들을 도입하지는 않는다.
- [0221] E(2) 부품-기반 NIM 구조들
- [0222] NIM들과 관련된 자기 응답을 실현하기 위해, 아래쪽의 단위 셀은, 입사 EM파의 자계 성분에 커플링하는 공진 회로 소자를 포함한다. 통상적인 종래 기술에서는, DSRR(double split ring resonator)이 이용되어 자기 응답을 제공하였지만, 적절하게 설계된 단일 링 공진기가 등가 자기 응답을 실현할 수 있고, 가공 관점에서도 좀더 용이하다.
- [0223] 본 발명은 소형화된 패키지형 전자 부품들을 단위 셀 내에 매입하는 것에 의해 기존 NIM들의 기능성을 마이크로파 주파수 범위에서 확장한다. 이 단계는, 전기 성능의 임계 소자를 필요에 따라 변경, 업그레이드 또는 변형될 수 있는 하나의 모듈식 패키지내에 집중시키는 것에 의해, 좀더 큰 설계 호환성을 허용한다. 기본적인 SRR은 도 21(a)에 도시된 간략화된 등가 회로를 가진다. 이것은 $\omega_0 = 1/\sqrt{L_s C_s}$ 로써 주어지는 공진 주파수를 가진 기본적인 LC 공진 회로이다. 이 회로의 전류는, 회로를 통과하는 시변 자속(time varying magnetic flux)으로부터 기인하는 유도 전자기력에 의해 구동된다. 직렬 저항(R_s)이 단위 셀의 가공에 사용되는 금속의 저항률로부터 기인하고, 작은 표피 깊이로 인해, R_s 는 표면 조건에 강하게 의존한다.
- [0224] 저주파수 구조들을 포함하는 (그러나 그것으로 한정되는 것은 아닌) 구조들의 경우, 지오메트리에 의해 SRR 회로의 용량을 설정하는 것이 아니라, (표준) 패키지형 커패시터가 대체될 수 있다는 것이 밝혀졌다. 그에 따라, SRR의 공진 주파수는 선택된 커패시터 값에 의해 설정될 수 있다. 그러나, 패키지형 커패시터들 또는 다른 부품들의 사용은 제시된 간략한 회로의 제한들을 확장한다. 다른 팩터들: 커패시터 유전체 물질 또는 커패시터 자체의 추가적인 기생 인덕턴스 또는 저항과 같은, 전계들이 높은 영역들에서의 손실 탄젠트로 인한 유전체 손실들이 중요해진다. 이러한 추가 효과들은, 도 21(b)에서 지시되는 바와 같이 회로를 변경하는 그러한 소자들의 모델링에 포함되어야 한다. 기생 소자들 때문에, 패키지형 커패시터의 완전한 임피던스는

$Z_{cap} = R_p + j\left(\omega L_p - \frac{1}{\omega C_s}\right)$ 의 형태를 가진다.

- [0225] 임피던스의 공진 형태는, 패키지형 커패시터 자체가 공진 주파수를 가질 것을 지시한다. 기생 인덕턴스로 인한 이러한 자기 공진이, 패키지형 부품들이 이용될 수 있는 주파수 범위를 제한할 수 있다. 더 나아가, 용량의 리액턴스 및 기생 인덕턴스의 리액턴스는 공진 주파수의 단일 측정에 의해 분리될 수 없는 대신, 유도성 기여로서의 고주파수 거동이 상대적 기여들을 판정하는데 필요하다. 게다가, 공진 전류는 이러한 상대적 기여들에 의존할 것이고, 손실들은 전류에 강하게 의존할 수 있으므로, 이것이 NIM의 성능에서 결정적일 수 있다.
- [0226] 도 22는 시판용 부품들의 매입 개념을 개략적으로 예시한다. 여기에서는 0201 SMT 패키지의 비스헤이(Vishay) HPC0201a 시리즈 RF 실리콘 커패시터인 것으로 제시된 단일층 커패시터가 필요한 용량을 제공하는데 사용된다. 도시된 바와 같이, 매 링마다 2개의 커패시터들이 사용되고, 총 용량은 보통의 직렬 가산 규칙에 의해 획득된다.
- [0227] 사용할 커패시터의 선택은 몇가지 고려들에 의존한다. 손실 탄젠트($\tan\delta$)에 의해 표현되는 유전체 손실이 중요하다. 최저 유전체 손실들은 공기 갭 유전체에 의해 제시되지만, 그러한 구조들의 구성은 대부분 어렵고, 자유 공간의 비교적 낮은 유전 상수는 높은 용량 실현을 어렵게 한다.
- [0228] 가장 전통적인 커패시터 구성들의 기생 인덕턴스는, 이 유형의 커패시터들을 본 출원에 사용할 수 없게 하는, 낮은 자체-공진 주파수들(self-resonant frequencies)을 초래한다. 커패시터들이 특수한 프로세스들 및 물질들을 사용해 회로 보드들의 레이업(layerup) 동안 실현되는 다수의 매입형 커패시터 접근 방법들의 경우에도 이것이 문제이다. 유전체 물질들에 대한 치수들 및 제한들의 제어는 일반적으로, 손실들 및 비제어 인덕턴스(uncontrolled inductance)가 어려움들에 기여하면서, 고속 커패시터들의 불량 성능을 초래한다.
- [0229] 다행스럽게도, 단일층 커패시터들(SLC들)의 최근 개발들은 매력적인 대안을 제시한다. 이들은 치수들의 제어 정도가 높은 상태에서 그리고 특히 커패시터 애플리케이션들을 위한 최신 유전체 물질들의 설계를 사용해 리소 그래픽 방법으로 생산된다. 간단한 구성이 아주 낮은 기생 인덕턴스를 허용하고, 이 커패시터들은 현재 10 GHz를 훨씬 초과하는 정격 자체 공진 주파수(rated self resonant frequency)로써 시판용으로 이용 가능하다.
- [0230] 기존의 수치 시뮬레이션 기술들은, 복잡도 및 작은 치수들로 인해, 그러한 구조들의 거동을 쉽게 특성화하거나 예측하지 못할 것이다. 더 나아가, 커패시터들은 통상적으로, 그들의 고주파수 특징들이 아니라, 그들의 DC 값들에 의해 특성화된다. 본 발명은, 복소 임피던스 맥락에서의 부품들의 좀더 전통적인 전기 엔지니어링 특성화를 완전한 자유 공간 S-파라미터들의 맥락에서의 음의 인덕스 물질들의 확립된 완전한 파 솔루션들과 조합하면서, 예시적 구조들을 분석하는 혼성 접근 방법을 포함한다. SLC와 같은, HFSS 또는 MWS의 간단한 구조들을 조심스럽게 모델링하고 유도성/용량성 리액턴스들의 예상되는 주파수 의존을 확인하는 것에 의해, 능동 부품들을 갖춘 구조들의 효율적인 설계를 가능하게 할 규칙들을 확립한다. 이러한 혼성 모델링은 능동 부품들의 사용과 연계되는데, 여기에서는, 비선형 부품 이외에 기생 소자들의 영향이 고려되어야 한다.
- [0231] E(3) 회로 보드 기반의 3-D NIM들
- [0232] 본 발명의 추가 태양은 회로 보드 기반 메타물질에 관한 것이다. 예시적 실시예들은, 함께 어울릴 수 있는 복수개의 개개 회로 보드 조각들로 이루어진 모듈식 메타물질을 포함한다. 각 회로 보드 부분은, 각각이 도체들의 산재된 어레이들을 지지하는 유전체 기관의 사실상 평평한 회로 보드들을 구비하는 복수개의 단위 셀들을 포함한다. 셀들은 중앙 갭을 포함할 수 있다. 평평한 회로 보드들은 서로 수직하게 3차원으로 정렬되고, 일단 조립되면, 3차원 어레이를 형성한다.
- [0233] 도 23은 기계로 가공된 회로 보드 기술들을 이용하는 본 발명의 예시적 NIM의 3차원 개략도이다. 도 23(a)는, 복수개의 동일 셀들을 포함하는 유전체 베이스 보드(100)를 나타낸다. 각 셀은, 사실상 정사각형의 중앙 통로(104) 주위에 정렬된 대향하는 한 쌍의 도체들(102)을 가진다. 대향하는 도체들(102)은 도시된 바와 같은 일반적인 U 형태의 구리 스트립들일 수 있다. 이 또한 구리로 형성될 수 있는 제 2 도체 어레이(106)가 베이스 보드(100)상에 지지되고 일반적 그리드 구성을 가진다. 베이스 보드(100)는 암 커넥터 소켓들(108)을 더 포함한다. 도체들(102 및 106) 각각은 유전체 보드(100)상에 증착되거나 배치된 구리 스트립들 또는 도전 물질일 수 있다. 도체들(102 및 106)은 보드(100)의 대향하는 양면들상에 위치하는 것이 바람직스럽다.
- [0234] 도 23(b)는 복수개의 동일 셀들을 포함하는 단일 유전체 스트립 보드(120)를 나타낸다. 각 셀은, 사실상 정사각형 통로(124)를 둘러싸는, U 형태의 구리 스트립들일 수 있는 대향 도체들(122)을 가진다. 이 또한 구리 스

트립들일 수 있는 제 2 도체들(126)은 각각의 단위 셀 사이에 위치하고, 위쪽으로 연장하여 암 소켓(108)과 짝 지워지도록 구성된 수 커넥터 핀(128)을 형성한다. 마찬가지로, 슬롯(130)이 각각의 단위 셀 사이에 정의된다. 예시된 바와 같이, 슬롯(130)은 슬롯(130)의 대향면들과 일렬로 정렬하는 도체(126)에 의해 적어도 부분적으로 정의되는 것이 바람직스럽다. 도체들(122 및 126) 각각은, 유전체 보드(120)상에 증착되거나 배치된 구리 스트립들 또는 다른 도전 물질일 수 있다. 도체들(122 및 126)은 보드(120)의 대향하는 양면들상에 위치하는 것이 바람직스럽다.

[0235] 복수개의 스트립 보드들(120)은 함께 어울려, 도 23(c)에 예시된 바와 같은 3차원의 그리드형 어레이를 형성할 수도 있다. 각각의 스트립 보드(120)는, 반전된 스트립 보드(120)가 거기에 수직으로 정렬된 상태에서 제 2 스트립 보드와 맞물리는 경우, 슬롯들(130)의 상호 작용을 통해 서로 짝지워진다. 그 다음, 도 23(c)의 FIT의 그리드형 어레이는 수 핀들(128)과 암 소켓들(108)의 맞물림을 통해 베이스 보드(100)와 맞물릴 수 있다. 도 23(d)의 구조가 초래된다. 이것들을 서로 복수개의 적층하는 것에 의해, 도 23(d)에 도시된 바와 같은 3차원 메타물질이 구축될 수 있다.

[0236] 어레이들(106 및 126)은 핀들(128)과 소켓들(128)의 맞물림을 통해 서로 전도성 통신 상태에 있다. 더 나아가, 어레이들(126)은 슬롯들(130)의 협동하는 맞물림을 통해 스트립 보드들(120) 중 다른 것의 어레이들(126)과 통신 상태에 있다. 구조 전체에 걸쳐 소자들 사이의 전기 접속들은 리플로우 솔더링(reflow soldering) 기술들에 의해 형성된다.

[0237] 도 23의 그것이 일레인 본 발명의 예시적인 모듈식 회로 보드 구성은, 예를 들어, 가공의 용이성 및 비용에 관련된 것들을 포함하여, 다수의 이익들 및 이점들을 제공한다는 것을 알 수 있을 것이다. 마찬가지로, 도 23의 예시적인 모듈식 메타물질은 단지 일레일 뿐이라는 것과 본 발명의 모듈식 회로 보드 기반 메타물질들의 추가적인 다수 실시예들이 가능하다는 것도 알 수 있을 것이다. 이 실시예들 중 다수는, 그것들이, 그것들을 기계적으로 서로 접속시키기 위한 그리고 하나 이상의 연속적인 전기 도체 격자를 전기적으로 접속시키기 위한 일반적인 평면 회로 보드들로부터 가공될 수 있다는 공통점을 가진다.

[0238] E(4) 전류-전압 비의 최적화를 통한 NIM 단위 셀에서의 손실들의 제어

[0239] NIM내의 손실들은 도체들(대부분 구리)과 연관된 전도성 손실들 및 전계들을 경험하는 임의 유전체 물질의 손실 탄젠트 모두로 인해 발생한다. 앞서 제시된 링 공진기의 간단한 도면에서, LC 회로의 공진 전류는 다음과 같다.

$$i = \frac{EMF}{(Z_R + Z_L + Z_C)} = \frac{EMF}{R + j\left(\frac{1}{\omega L} - \frac{1}{\omega C}\right)}$$

[0240]

[0241] 본 발명의 일 태양은, 공진 주파수가 LC 곱에 의해 설정된다는 것과 유도성/용량성 조합을 선택함에 있어서 자 유도가 존재한다는 것을 인식하는 것에 의해, NIM 손실들을 제어하는 방법들 및 구조들에 관한 것이다. 이 선택은, 유전체 또는 옴 손실 채널들의 상대적 기여들을 변경할 수 있게 할 것이다. 인덕턴스가 SRR에 의해 형성되는 루프 사이즈의 기여만은 아니라는 것을 인식하는 것이 중요한데, 인덕턴스는 그 회로를 형성하는데 사용되는 와이어들의 치수들 및ジオ메트리(예를 들어, 와이어들의 자체 인덕턴스(self-inductance)), 다른 패키지형 또는 비패키지형 부품들이 사용되는 장소, 및 그것들의 기생 인덕턴스에 의해서도 설정된다.

[0242] 유도성/용량성 비를 변경함으로써, 손실들은 (유전체 손실들을 초래하는) 유도 전압들에 대한 (옴 손실들을 초래하는) 유도 전류들의 상대적 크기들을 변경하는 것에 의해 최소화된다. 다시 말해, 전계($CV^2/2$)와 자계($LI^2/2$)에 저장된 에너지 사이에서 규칙대로 발진하는 공진 회로는 L/C 비를 변경하는 것에 의해 V/I 비를 변경할 수 있다. 이것에 대한 실질적 제한들이 존재할 수 있는데 - 전파 중인 EM 모드에 커플링해야 하는 SRR에 의해 설정된 최소 유도 및 용량이 존재한다. 어느 한 쪽의 손실 메커니즘이 감소될 수 있다면, 좀더 낮은 순 손실 이익이 실현될 수 있다. 공기를 포함하는, 저손실 유전체들의 사용이 손실들을 감소시키는 일 방법이다. 예를 들어, 도 15(c)에는, 공기 갭이 사용되어 구성에서 사용되는 적층 물질과 연관된 손실들을 제거하는, 앞서 논의된 회로 보드 NIM 구조의 변경이 도시되어 있다.

[0243] E(5) THz 주파수들에 유용한 메타물질들

[0244] 마이크로파 주파수들의 종래 기술에서 이용되는 메타물질들은 DSRR(dual split ring resonator)을 포함하는데,

도 24(a)에는 4개의 DSRR(dual split ring resonator)들이 개략적으로 도시되어 있다. 도 24(b)에 4개가 도시되어 있는 단일 분할 링 공진기(SRR)는 유용한 추가 공진기이다. THz를 포함하는, 고주파수들에서 사용될 것으로 생각되는 추가적 공진기 구성이 도 24(c)에 도시되어 있다. 다른 구조들 이외에, 도 23(a) 및 도 23(b)의 DSRR 및 SRR 또한, THz를 포함하는, 고주파수들에서 유용할 것으로 생각된다. 또 다른 링 공진기 - C-형태의 링 공진기 - 가 도 23(d)에 도시되어 있다. 이중 C-형태의 링 공진기들도 가능하다. 도 23의 공진기들 모두가 본 발명의 예시적인 메타물질 실시예들에 사용될 수 있다. 그들은, 직선 와이어 도체들의 격자와 같은, 추가적 도체들과 조합될 수도 있다.

[0245] 도 24에서, G는 내부와 외부 링 사이의 갭이고, W는 금속 선들의 폭이며, L은 외부 링의 길이이고, S는 인접 셀들 사이의 간격이며, T는 링들의 분리이다. 이제 도 24(c)의 LSRR들(L-shaped resonators)을 참조하면, 각각의 개별 단위 셀은 도시된 바와 같은 "중첩하는 정사각형" 구성으로 정렬된 4개의 L-형 도체들(200)을 포함한다. L-형 도체들(200) 각각의 일 레그는 L-형 도체들(200) 중 다른 것의 일 레그와 인접하고, 일반적으로 L-형 도체들(200) 중 다른 것의 일 레그와 공연(coextensive)하고 평행하다. 도체들(200) 각각 사이에서 갭이 정의된다. 도체들(200)은 도체들(200)의 중첩 면적으로부터 그들의 용량을 형성한다. 이론적이고 실험적인 실험 연구들은, LSRR들이 동일 사이즈의 단위 셀들을 위한 DSRR들의 구조들에 대한 공진 주파수보다 높은 공진 주파수를 가진다는 것을 제시한다. 이 설계는, 요구되는 임계 치수가 좀더 클 수 있으므로, 동일한 설계 주파수를 위한 가공을 용이하게 할 수 있다.

[0246] 본 발명의 메타물질들은, THz 메타물질을 실현하기 위해, 유전체 기판에서 지지되는 추가 구조들과 조합된 도 24의 구조(들)를 포함한다. 일례는 격자 파라미터에 의해 설정된 차단 주파수 미만에서 음의 유전율을 갖는 것으로 공지된 얇은 와이어 구조 - 와이어들의 주기적인 격자 - 이다. 와이어 구조를 SRR 구조와 조합하는 것은 저주파수들에서 NIM을 실현하는데 이용되는 방법이었다. THz NIM 구조는 미크론 스케일의 해상도를 가진 다소 복잡한 구조들의 가공을 요구할 수 있다. 이 가공을 위해, 본 발명은 MEMS(micro-electro-mechanical-system)에 기초한 고유한 프로세스를 제공한다.

[0247] 본 발명의 예시적 방법은 제 1 유전체 기판에 희생층을 형성하는 단계, 희생층에 몰드를 형성하는 단계, 및 몰드에 도체를 증착하여 SRR, DSR, LRR 등과 같은 도체 링을 형성하는 단계를 포함한다. 그 다음, 희생층이 제거됨으로써, 도체 링은 상기 유전체 기판의 표면에서 지지된다. 제 1 유전체 기판의 표면을 덮고 도체 링을 덮는 제 2 유전체층이 형성된다. 제 2 희생층이 제 2 유전체층상에 형성되고, 제 2 몰드가 제 2 희생층에 형성된다. 제 2 도체가 제 2 몰드에 증착되고, 제 2 희생층이 제거됨으로써, 제 2 도체는 도체 링 위의 제 2 유전체층에서 지지된다.

[0248] 복수개의 도체 공진기 링들이 이런 식으로 형성될 수 있거나, 이 단계들은 복수개의 셀들이 후속적으로 다같이 조합되는 단일 단위 셀을 형성하는데 사용될 수도 있다. 이와 같이, 제 1 및 제 2 유전체층들, 도체 링 및 제 2 도체는 주파수 대역에 대해 동시적인 음의 유전율 및 투자율을 갖는 음의 인덱스 매체를 형성한다. 당업자들이라면, 이 단계들이 다양하고 상이한 유전체들, 도체들, 희생층들, 치수들 등으로 실시될 수 있다는 것을 알 수 있을 것이다. 일부 실시예들에서는, 아주 작은 스케일들이 사용되어 마이크로칩들을 형성한다.

[0249] 추가 설명으로써, 본 발명의 예시적 방법이 도 25에서 약술된다. 먼저, 도 25(a)의 단면도에 도시된 바와 같이, 음의 포토레지스트층(PR;250)이 (예를 들어, 투명한 석영일 수 있는) 유전체 기판(252)으로 스핀된 다음에는, 접착-모드 리소그래피 프로세스가 수반되어, 설계된 SRR 패턴을 몰드(253)로서 전달한다. 예시적 몰드 패턴(253)이 SRR을 형성하지만, 예를 들어, DRR, LRR, 및 C-형을 포함하는, 다른 패턴들도 형성될 수 있다. 제 1 리소그래피 프로세스 이후에는, 도 25(b)에 예시된 바와 같이, 100 nm 크롬 및 1 μ m 두께의 구리 도체층들(254)이 증착되어 몰드 내부를 채우고 층(250)을 덮는다. 다음으로, 리프트-오프 프로세스(lift-off process)가 이용되어, 도 25(c)에 도시된 바와 같이, 양면 연마형 석영 기판(double-side polished quartz substrate)에 패턴닝된 SRR층을 전달한다. 도 25(d)는 이와 같이 형성된 DRR을 좀더 잘 예시하기 위해 이 시점에서의 구조에 대한 상면도를 나타낸다.

[0250] 다음으로, 도 25(e)에 도시된 바와 같이, 토포그래피(topography)는 스핀-온 유리층(256)을 도포하는 것에 의해 평탄화된다. 도 25(f)에 도시된 바와 같이, PR의 다른 층(258)이 층(256)상에 형성되고 제 2 리소그래피 프로세스가 적용되어 플라스모닉 와이어들의 몰드(257)를 형성하며, 도 25(g)에 도시된 바와 같이, 구리와 같은 도체층(260)이 증착된다. 예시적 두께는 1 μ m이다. 제 2 금속 증착 및 리프트-오프 단계 이후에는, 도 25(h)에 도시된 바와 같이, 스핀-온 유리층(256)에 의해 분리된 SRR 구조들 상단의 몰드(257)에 형성된 사실상 직선의 얇은 금속 와이어들(262)이 발생된다. 상면도가 도 25(i)에 도시되어 있다.

- [0251] 예시적인 이 단계들을 반복하는 것에 의해, 일련의 반복되는 SRR들 및 얇은 와이어들이 가공될 수 있다. 또는, 이 단계들이 적용되어 어레이로 정렬된, 도 25에 예시된 바와 같은, 복수개의 단위 셀들을 동시에 형성할 수도 있다. 이와 같이, 도 25에 예시된 바와 같은 개개 셀을 복수 또는 다수 구비하는 메타물질이 가공될 수 있다. 본 발명의 이러한 그리고 다른 MEMS 가공 기술들이, 이들 2개의 마이크로 구조형 구축 블록들을 집적하여 고주파수 NIM들을 형성하기 위한 효과적인 접근 방법을 제공한다.
- [0252] E(6) NIM들에 의한 공간 필터링
- [0253] 본 발명의 수동 NIM들을 위한 예시적인 일 애플리케이션은, 입사 필드 분포가 평평한 물질에 의한 프로세싱을 경험하는 공간 필터링이다. 공간 필터링의 개념은 도 26에서 예시되는데, 전통적인 공간 필터링은 도 26(a)에 예시되어 있고, 본 발명의 NIM을 사용하는 공간 필터링은 도 26(b)에 예시되어 있다. 도 26(b)에 도시된 NIM 장치는 이방성 NIM들의 겹층들(bilayers)을 보상하는 것으로부터 형성된다. 이방성 NIM들의 하나 이상 유형들을 구비하는 복합 구조는 동일한 공간 필터링 펄크션을 기존의 전통적인 다중-소자 시스템으로서 컴팩트하게 수행할 수 있다는 것을 발견하였다. 평면의 얇은 (수동) NIM 슬랩이 하나 이상의 입사각들을 위해 선택된다. 그러한 물질은, 레이돔(radome)과 같은, 구조로 적당하게 집적되어, 예를 들어, RF 통신의 검출을 감소시키는 것에도 적용될 수 있다.
- [0254] 도 27은 대역 통과 필터로 입사하는 가우시안 빔들의 반사 및 전달을 개략적으로 예시한다. 빔들은 10λ 의 폭 및 9° (정사각형), 34° (별), 및 69° (원)의 입사각을 가진다. 도 27에 예시된 펄크션을 실현하기 위해서, 본 발명의 이방성 NIM들의 4개의 별도 평면층들이 다같이 조립된다. 이 애플리케이션은 평면 NIM 구조들의 가공에 대한 상당한 제어를 요하고, 그에 따라, NIM 장치들을 효과적으로 가공하기 위해 본 발명의 방법들을 이용한다.
- [0255] E(7) 능동 부품들을 통한 메타물질들의 동적 튜닝
- [0256] 본 발명의 추가 태양은, NIM들을 포함하는, 메타물질들에서의 능동 부품들의 사용에 관한 것이다. 본 발명의 예시적 NIM들은 NIM들의 응답 파라미터들 중 일부에 대한 외부 제어를 실현하기 위해 매입된 능동 및 비선형 장치들을 포함한다. 유효 인덱스의 능동 제어는, 예를 들어, SRR/연속-와이어 기반 NIM의 전계 또는 자계 소자들 중 하나에 이득 소자들을 매입하는 것에 의해 실현될 수 있다. 이것은, 이산 능동 부품들을 전혀 포함하지 않는 선형-응답 NIM들보다 좀더 복잡한 구조이다.
- [0257] 능동 소자들은, 전계 및 자계 분포들을 과도하게 교란하지 않고 능동 소자들에서의 이득 및 위상 시프트에 대한 제어를 유지하는 방식으로 매입되어야 한다. 복잡한 다른 관계는, 주파수들의 관련된 음의 인덱스 대역에서 NIM의 전자기 특성들을 교란하지 않으면서, 능동 소자들에 전력 및 그라운드 접촉들을 제공해야 할 필요성에 의해 제시된다. 본 발명의 예시적 NIM들에서는, 음의 인덱스 대역에서 높은 (비투과) 임피던스들을 산출하지만 낮은 (전력) 주파수들에서는 낮은 임피던스를 유지하는 튜닝 스타브들(tuning stubs)로써 설계된 전력 리드들을 산재하는 것에 의해, 관련된 전력 및 그라운드 리드들이 추가된다. 비선형 및 이득 소자들은 연속 와이어 및 NIM 물질의 SRR 구조들 모두와 집적되는데, PIN 다이오드들일 수 있는, 벡터 다이오드들이 자기적 능동 SRR들의 용량성 갭 영역에 배치될 수 있다. HEMT 트랜지스터들은 HEMT 트랜지스터들을 LHM의 와이어 섹션들에 매입하는 것에 의해 전계 신호를 증폭하는데 사용될 수 있거나, 다른 방법으로, HEMT 트랜지스터들을 SRR 소자들의 링들에 매입하는 것에 의해 자계 성분을 증폭하는데 사용될 수 있다.
- [0258] 유용하다고 생각되는 예시적인 능동 소자들은, 통상적으로 1-6 GHz 대역에서 15-35 dB의 이득을 갖고 다소 낮은 이득을 갖지만 18 GHz까지 동작할 수 있는 Agilent ATF50000 및 ATF30000 시리즈의 부정형(pseudomorphic) HEMT 트랜지스터들을 포함한다. 동일 제조자로부터의 고주파수 PIN 다이오드들은 빔 조정 및 파 위상 시프팅을 위한 2-터미널 구현들을 허용할 수 있다. MicroSemi로부터의 벡터 다이오드들(MTV2100 및 GC1500A)은, SRR/와이어 구현의 용량성 부분에 대한 튜닝 가능성을 실현하는데 이용될 것이다. 하나 이상의 능동 부품이 매입될 수 있는데, 일례로는 링 도체 갭에 매입된 제 1 능동 부품 및 직선 와이어 도체 격자에 매입된 제 2 능동 부품을 들 수 있다.
- [0259] X-대역 마이크로파 범위에서 동작하는 예시적인 일 능동 NIM의 개략적 예시가 도 28에 도시되어 있다. Microsemi 벡터들, pF 용량에 의한 4:1 튜닝 범위를 가진 전압-바이어싱된 가변 커패시터들이 오른쪽에 도시되어 있다. 패키지는, 대용량 어셈블리를 위한 시판용 픽앤플레이스 머신들(pick and place machines)로써 적당하게 핸들링되는 산업 표준의 0402 사이즈이다. 왼쪽에는 능동 NIM 어셈블리가 예시되어 있다. 전기 유전율을 위해 사용되는 구리 와이어들의 층이 (명료화를 위해 지지되지 않는) 분할 링 어셈블리 평면 아래에 도시되어 있다. 매 링마다 2개의 갭들을 가진 분할 링들의 3 x 4 어레이가 회로 보드 기판상에 도시되어 있다. 벡터

터는, 동적으로 튜닝 가능한 용량을 제공하며, 각각의 갭을 확장한다. 버랙터들은, 20 V까지 전압을 인가하는 것에 의해 튜닝된다. 이 바이어스 전압은 도 28에 도시되어 있는 선들에 의해 공급된다. (초기 용량을 충전하는 것을 넘어서는) 전류가 사실상 흐르지 않기 때문에, 도전율이 아주 낮은 선이 바이어스를 제공하는데 사용될 수 있다. 선들의 높은 저항률은 제어 선들에 의해 인접 셀들이 단락되는 것을 방지할 것이다. RF에 대해서는 높은 임피던스를 제시하지만 제어 신호들에 대해서는 낮은 임피던스를 제시하는 고유전율 선들이 사용될 수도 있지만, 가공 어려움들을 제시한다. 폴리머-기반 도체들 또는 과립형 흑연 물질들(granular graphitic materials)을 포함하는 다수의 저도전율 물질들이 사용될 수 있다. 바이어스 선들은 V_b 및 그라운드로 교대로 바이어싱된다는 것에 그리고 교대하는 로우들의 버랙터들에 대한 물리적 배향들은 반전되어 셀 바이어싱의 간단한 수단을 수용한다는 것에 주의해야 한다.

[0260] E(8) 능동 회로들을 통해 손실이 감소된 메타물질들

[0261] 능동 회로들이 적용되어 저항 네트워크들에서 저항 손실들의 균형을 잡는다. 중요할 수 있는 이 기술은 모든 주파수 범위들에 걸쳐 가치를 가질 수 있지만, 특히, 펌핑된 물질들이 쉽게 획득되는 광 범위에서 가치를 가질 수 있다. 그러나, 저주파수들에서, 이 기술은, 제어되는 손실들의 기본적인 개념들이 조사될 수 있게 하면서, 선반 재고(off-the-shelf) 증폭기들 및 등가 부품들을 사용해 연구되고 개발될 수 있다.

[0262] NIC들(Negative Impedance Converters)이 업계에 공지되어 있다. 간단한 개략도가 도 29에 도시되어 있다. 본질적으로, NIC는 인가된 전압에 응답하여 반전 전류를 유도하는 선형 증폭기를 사용하는 것에 의해 동작한다. 따라서, 회로 저항을 통과하는 전류(및 그에 따른 I^2R 의 손실 전력)는 회로에 (증폭기 전력원으로부터 유도되는) 전력을 역공급하는 것에 의해 보상된다. 그러한 회로는, 시스템이 증폭기의 선형 범위에서 동작하기만 한다면, 저항 손실들을 보상할 수 있다. NIC는 관심 주파수에서 동작해야 한다. NIM들에서의 손실들을 보상하기 위한 NIC의 사용이 이론적으로 제안되어 왔다. 고주파수 증폭기들 및 부품들의 이용 가능성은 본 기술의 유용성을 좀더 짧은 파장들로 확장할 것이다.

[0263] 회로에 순 위상 응답(net phase response)이 존재하면, 그 위상 응답은 물질의 나머지에 대한 위상 응답에 가산되어, 물질의 음의 인덱스 특징들을 추가적으로 제어하는데 사용될 수 있다. 그러한 회로는, 기본적인 부품들이 동작해야 하는 주파수들, 예를 들어, 낮은 GHz 범위에서의 동작으로 한정될 수 있다. 부품들의 사이즈 또한 그들의 용도를 좀더 긴 파장들로 한정할 수 있다.

[0264] E(9) 비선형 메타물질들

[0265] 자체가 주파수 분산을 갖는, 비선형성과 메타물질 구조들의 조합은 유용할 수 있는 거동 유형들을 유도할 수 있다. 예를 들어, 국지적 전계들은 공진 메타물질 소자들의 용량성 범위들에서 상당히 향상되기 때문에, 전략적으로 그러한 구조로 배치된 비선형 물질은 크게 향상될 수 있다. Kerr 비선형성(즉, $n = n_1 + n_2 E^2$ 의 형태를 가진 인덱스)을 가진 물질이 SRR들의 어레이에 매입된다면, 광학적 쌍안정성의 형태가 초래될 수 있다.

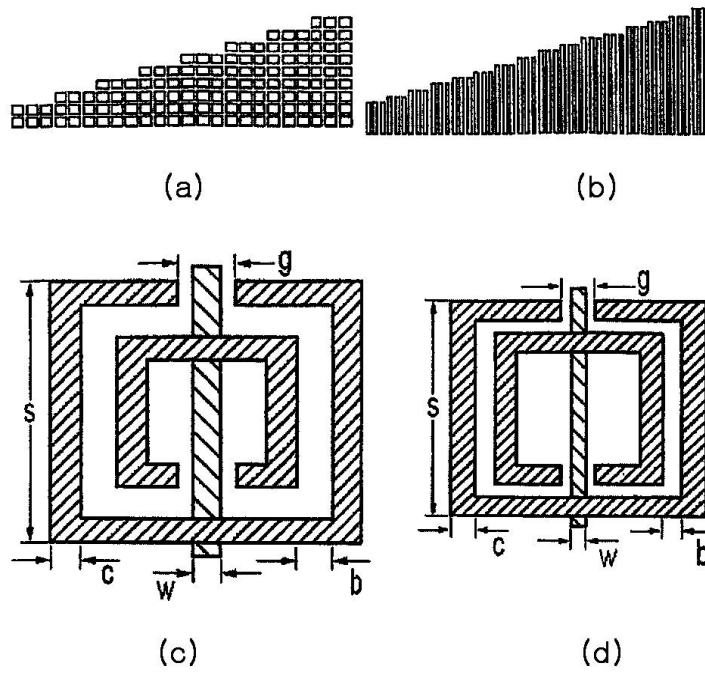
[0266] 광 주파수들에 이용 가능한 다양한 비선형 물질들(예를 들어, $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$)이 존재하기는 하지만, 예시적인 일 목표 주파수 범위에서는, 다이오드 또는 유사한 고체 상태 소자들을 이용해 소정의 비선형 응답을 실현하는 것이 바람직스럽다. 본 발명의 태양은, 매입된 다이오드 회로를 이용해 SRR 매체에 유사한 Kerr 비선형성을 도입하는 비선형 NIM에 관한 것이다. 복합 물질은, 입사 필드의 밀도에 기초해 양에서 음으로 전환 가능한 굴절 인덱스를 나타낼 것이다. 다이오드들과 같은 능동 부품들의 사용은 조심스럽게 바이어싱되고 균형이 유지되어야 하기 때문에, 입사 밀도 맥락에서의 동작 범위는 좁게 규정될 것으로 생각된다. 도 30은 공진 품질 팩터의 2개 값들을 위한 무차원(dimensionless)의 비선형 공진 주파수 대 필드 강도를 예시한다. 곡선들은 (밀도 의존적) 공진 주파수에서의 쌍안정 거동을 위한 가능성을 나타낸다.

[0267] NIM들의 좁은 대역폭이 선형 주파수 도메인의 애플리케이션들을 위한 제한일 수도 있지만, NIM들의 고유한 특성들을 강화하기 위한 다른 접근 방법은 NIM들의 분산 특성들을 이용하는 파 전파 현상들 및 애플리케이션들을 검색하는 것이다. 전자기 펄스들은, 예를 들어, 주파수 성분들의 대역을 포함하므로, 펄스의 형태는 일반적으로 분산 매체를 통한 전달에 의해 변경된다. NIM과 상호 작용하는 펄스는, 음의 인덱스 대역내에 놓인 각각의 주파수 성분을 대해 음의 위상 시프트를 겪을 것이다. 선형인 음의 인덱스 대 양의 인덱스 매체들내에서 전적으로 전파하는 펄스들 사이에 특별한 차이점은 없지만, 본 발명의 예시적 NIM들을 포함하는, 파 전파에 대해 상당한 영향을 미칠 수 있는 NIM 구조들이 존재한다.

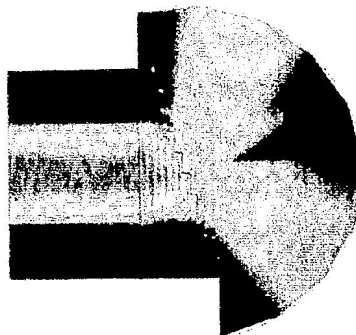
- [0268] 일레들은, 분산적인 양 및 음 물질들의 조합으로부터 형성되는 구조들을 포함한다. 구조들의 다른 등급은 비선형성들을 갖춘 NIM들이다. 비선형성의 상이한 유형들을 나타내는 NIM들을 위해 다양한 애플리케이션들이 제시되었다. 저주파수들에서는, 선행 일레들에서와 같이, 적절하게 바이어싱된 다이오드들과 같은, 비선형 부품들이 이용되어 입사 전자기 필드들에 대해 비선형 응답을 나타내는 음의 인덱스 메타물질들을 발생시킬 수 있다.
- [0269] E(10) 능동 고주파수 주파수 NIM들
- [0270] 능동 제어 및 비선형 소자들을 NIM에 매입하기 위한 2가지 바람직한 경로들: 앞서 논의된 바와 같은, 회로-보드-기반 NIM 구조들과 이산 전자 부품들의 집적 및 능동 소자들을 포함하는 맞춤형-가공된 반도체 물질들과 NIM 구조들의 집적이 존재한다. 이산 부품들을 사용하는 전자의 접근 방법이 구현 및 설계 방법들을 테스트하기에 좀 더 용이하지만, 20 GHz 미만의 주파수들로 제한될 수 있다. LHM 구조들과 동일한 반도체 기판상에 맞춤형-가공된 능동 소자들이 리소그래피 방법으로 패터닝되는 후자의 접근 방법은 궁극적으로, 100-200 GHz 이상에 근접할 수 있는, 능동 소자들을 위해 훨씬 높은 중심 동작 주파수들을 허용하겠지만, 개발 노력에서 상당히 높은 비용들과 긴 리드 타임들(lead times)을 발생시킨다.
- [0271] 다른 방법으로, 100 μm 정도의 칩 다이 사이즈들을 가진 이산적이고 패키징되지 않은 부품들의 사용을 수반하는 2가지 접근 방법들을 조합하는 접근 방법들은, 어쩌면 MEMS 기술을 사용해 패터닝된 반도체 (예를 들어, Si 및 폴리-Si) 기판들을 사용해, 고도로 연마된 리지드 반도체(rigid semiconductor)에 의해 제공되는 리지드, 울트라플랫(ultraflat) 표면에 비아들 및 대응되는 상호 접속 능력을 추가할 수 있게 하는 충분히 복잡한 회로-보드형 기술로써 훨씬 높은 동작 주파수를 허용할 수도 있다.
- [0272] E(11) 튜닝 가능한 THz NIM들
- [0273] TiO_2 의 유전체 펄크션은 인가되는 전계를 통해 THz 주파수들에서 변경될 수 있다. 도 31에서 개략적으로 도시된 본 발명의 예시적 장치는 이 목적을 위해 가공되었다. TiO_2 의 2000 옹스트롬층이, 하부 전극으로서 기능하는 도핑된 Si상에 PVD(physical vapor deposition) 프로세스를 사용해 성장되었다. 이 구조에서 상부 전극의 역할은 절연체인 P3HT(Poly3-hexylthiophene)막에 의해 수행된다. 그러나, P3HT는, 전하들이 전계 도핑을 통해 주입될 때, 상당한 전기 도전을 나타낸다. 이러한 FET 지오메트리는 인가되는 전계하의 TiO_2 에 대한 THz 및 적외선 연구들을 위해 적응되었다. 장치의 신규성은, 먼-IR로부터 Si 기판의 대역 갭에 의해 부여되는 차단 주파수를 가진 근접-IR로의 전달 실험들에 적합한, 넓은 면적($>1 \text{ cm}^2$)의 "그리드-전극" 구조를 포함한다. 도펀트들의 농도가 10^{18} cm^{-3} 의 범위인 상태에서, 기판 및 그에 따른 전체적인 장치 구조는 높은 서브-THz로부터 Si의 대역 갭 에너지에 이르기까지 높은 전달($T(\omega) \approx 20-30\%$)을 나타낸다.
- [0274] 인가되는 전계에 의한 TiO_2 의 THz 응답의 변경으로 인해 장치에서는 전달에서의 변화들이 발생한다. 이 변화들은 TiO_2 의 진동 주파수들에 근접하여 발생하는 공진들의 형태를 갖고, 여기에서, $\epsilon_1(\omega)$ 의 필드 유도형 변경은 50-80 %를 초과할 수 있다. 특히, SRR 어레이들은 하단-접촉 FET 지오메트리로 쉽게 집적될 수 있으므로, 신규한 이 접근 방법이 장치의 튜닝 가능성을 실현한다.
- [0275] 여기에서는 본 발명의 특정 실시예들이 도시되고 설명되지만, 당업자라면, 다른 변경들, 대체들 및 대안들이 명백하다는 것을 이해할 수 있어야 한다. 첨부된 청구항들로부터 판정되어야 하는 본 발명의 정신 및 범위를 벗어나지 않으면서, 그러한 변경들, 대체들 및 대안들이 이루어질 수 있다.

도면

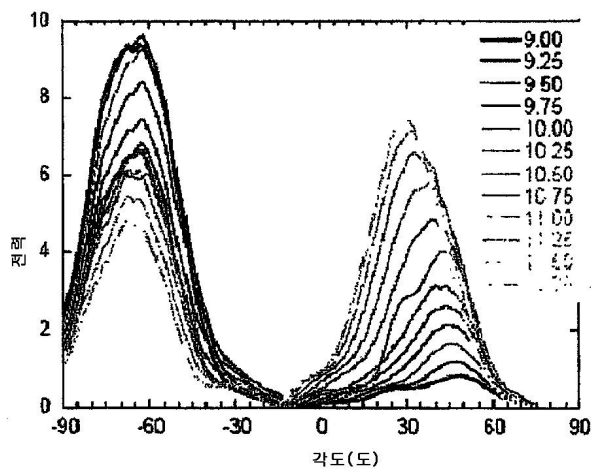
도면1



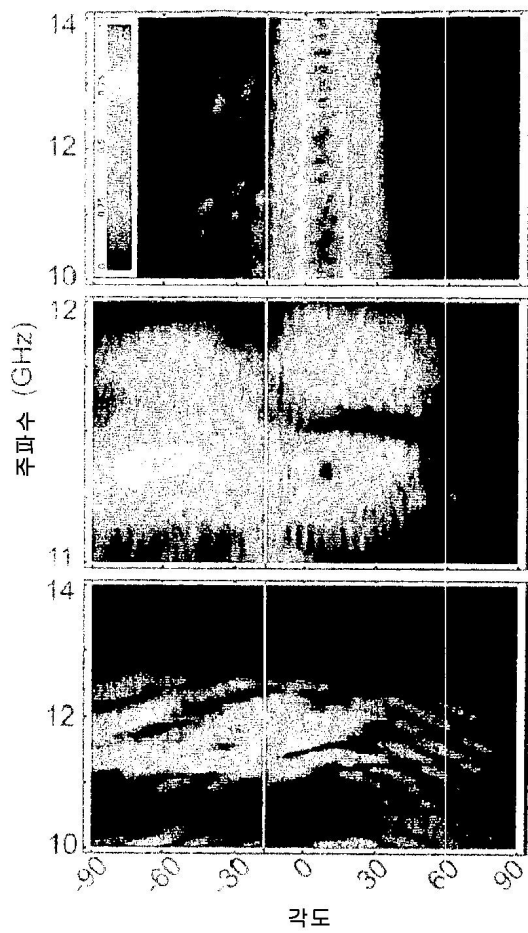
도면2



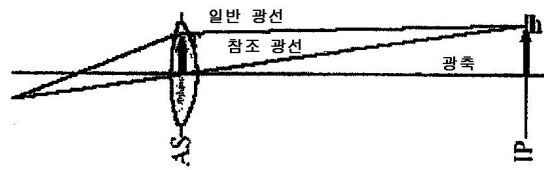
도면3



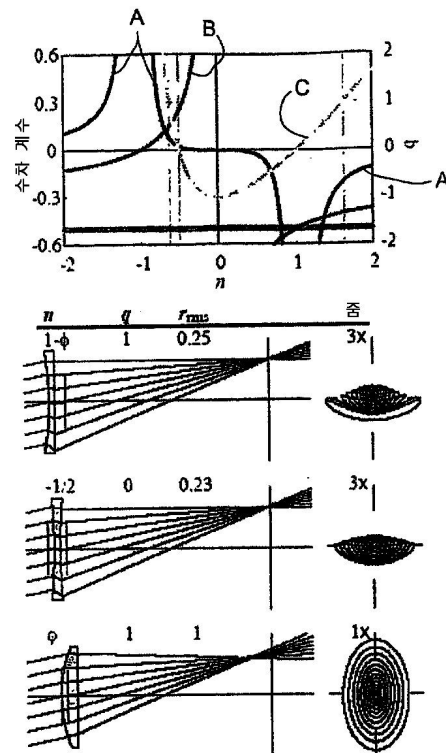
도면4



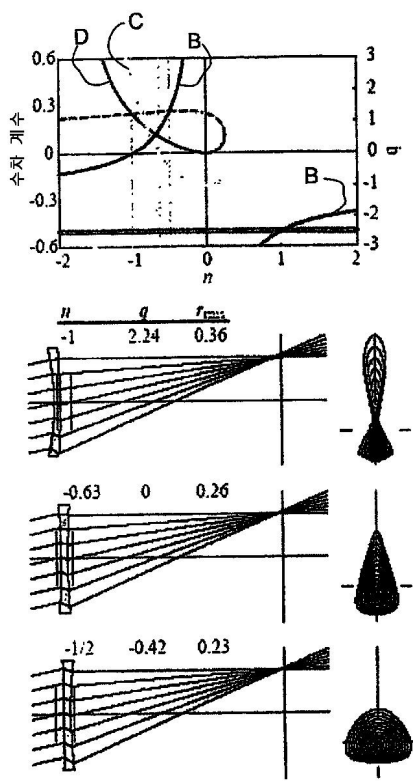
도면5



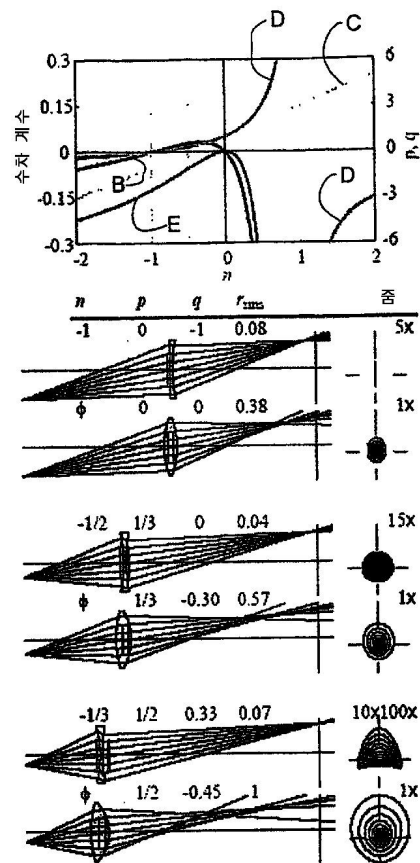
도면6



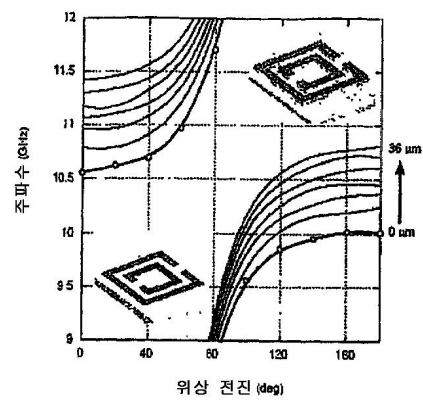
도면7



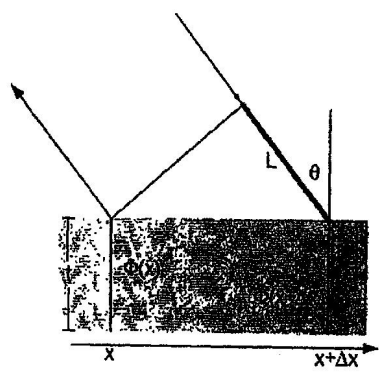
도면8



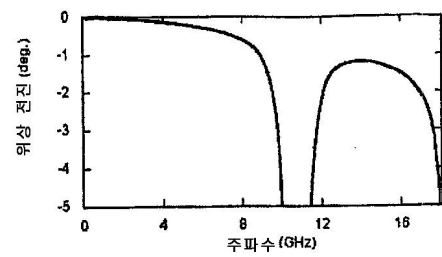
도면9



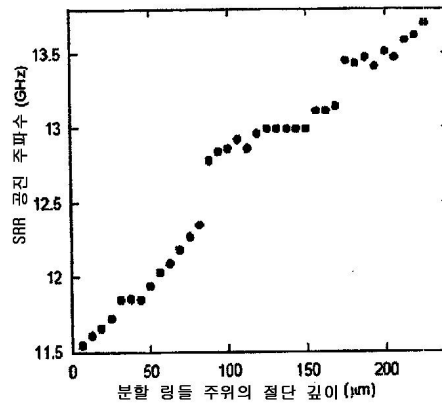
도면10



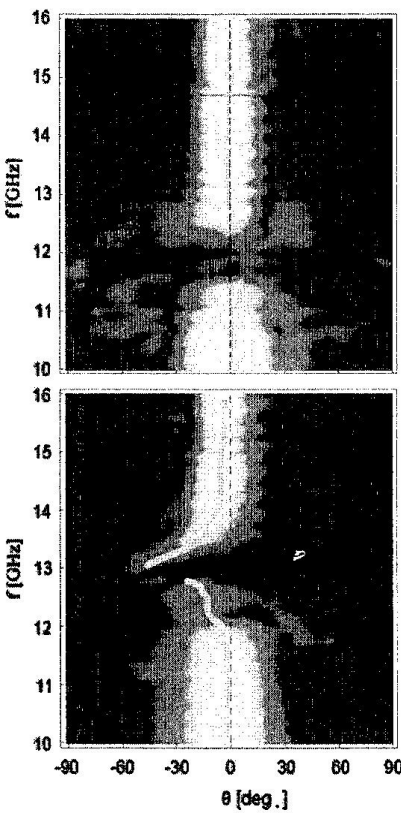
도면11



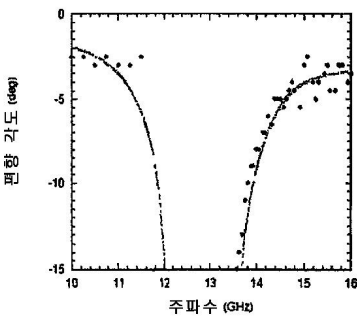
도면12



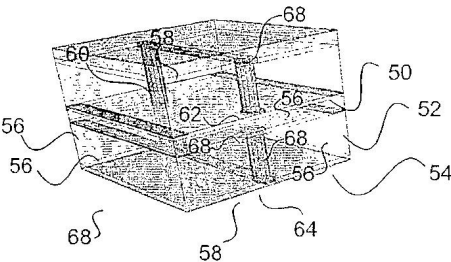
도면13



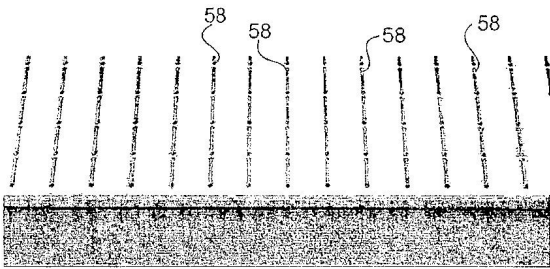
도면14



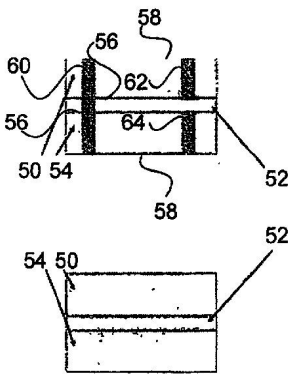
도면15a



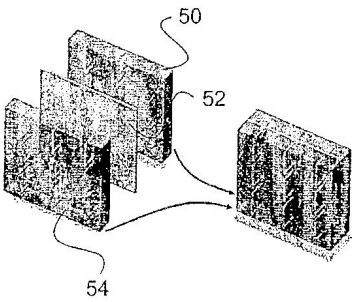
도면15b



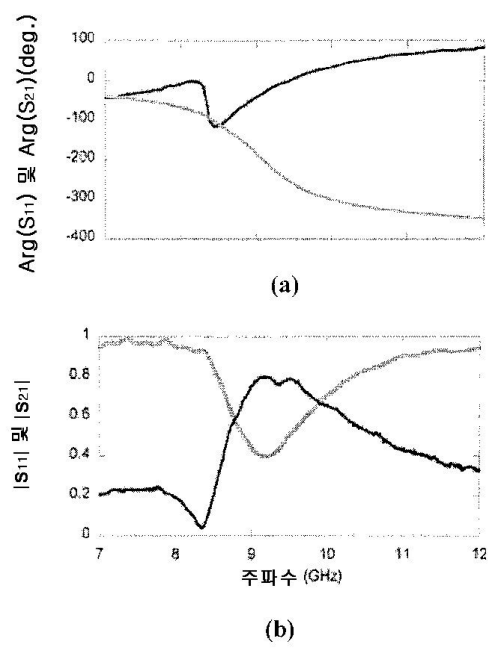
도면15c



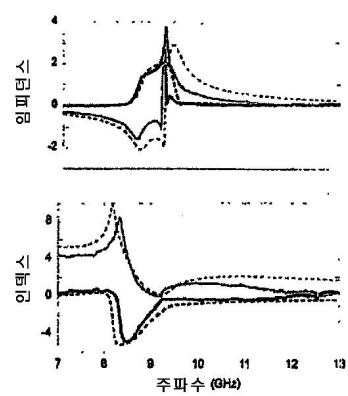
도면16



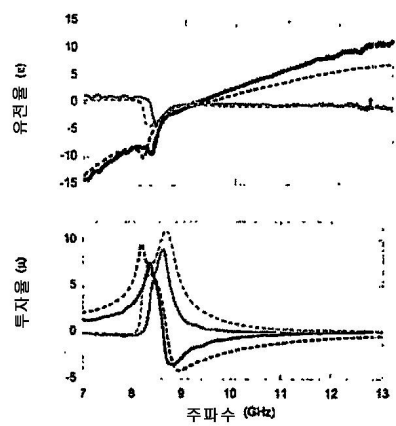
도면17



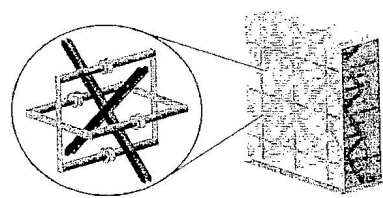
도면18



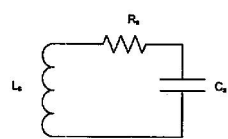
도면19



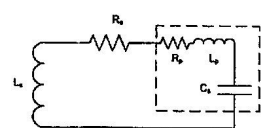
도면20



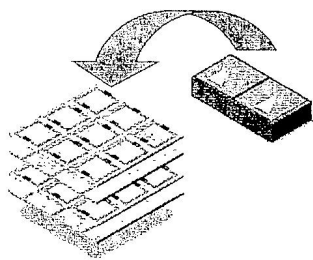
도면21a



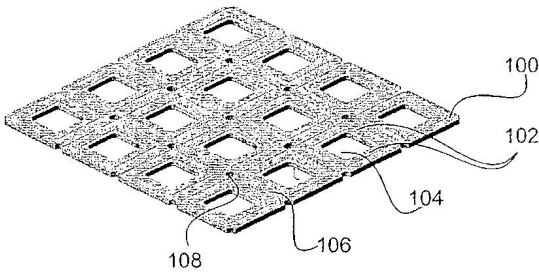
도면21b



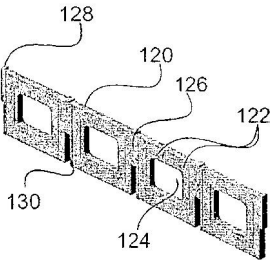
도면22



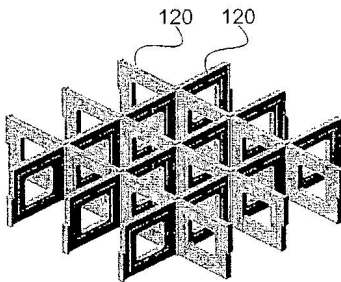
도면23a



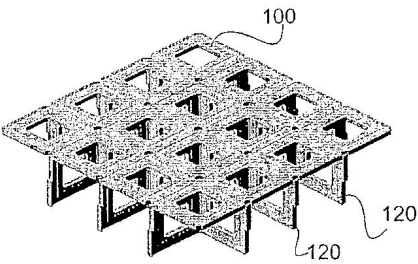
도면23b



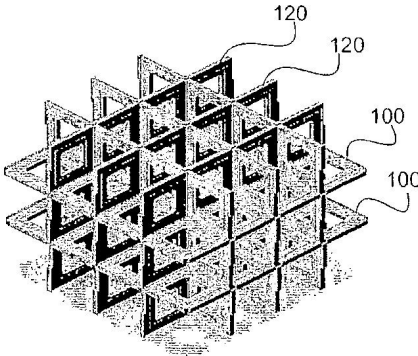
도면23c



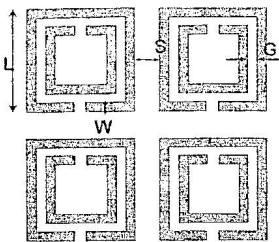
도면23d



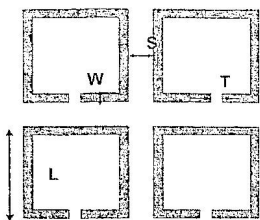
도면23e



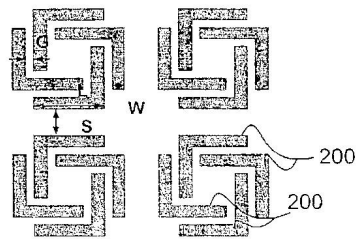
도면24a



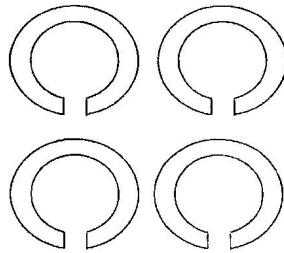
도면24b



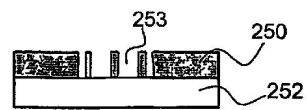
도면24c



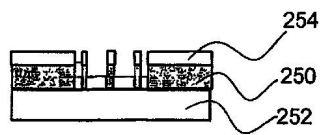
도면24d



도면25a



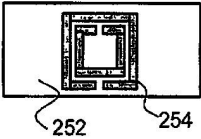
도면25b



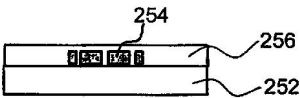
도면25c



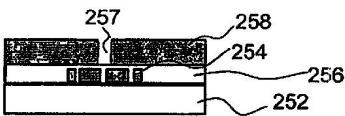
도면25d



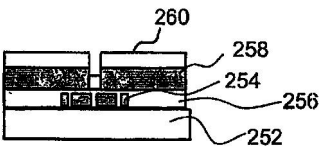
도면25e



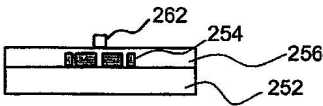
도면25f



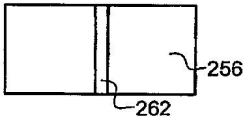
도면25g



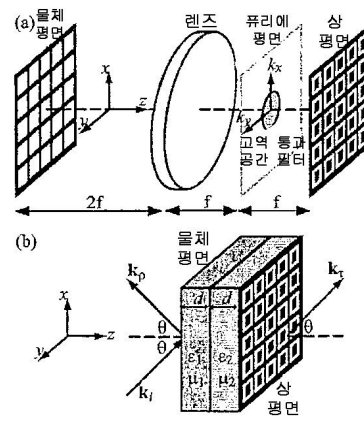
도면25h



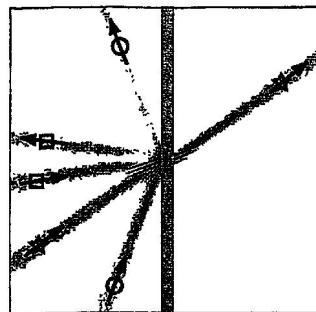
도면25i



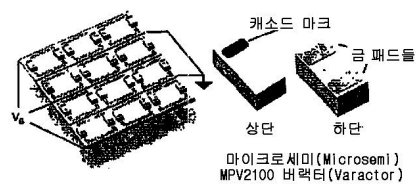
도면26



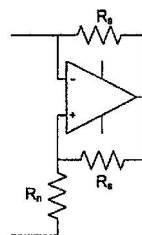
도면27



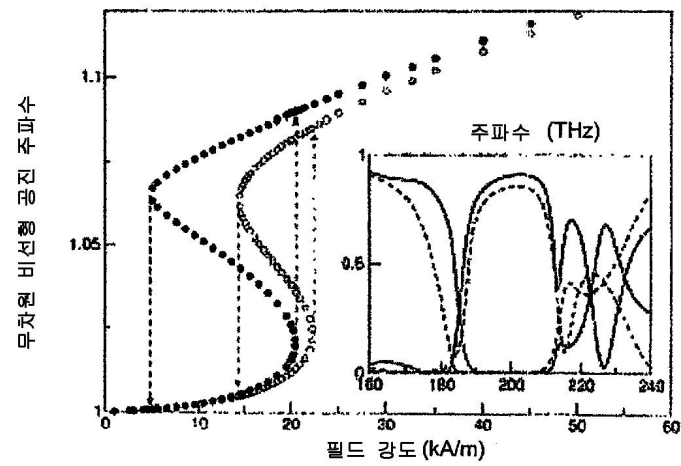
도면28



도면29



도면30



도면31

