



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2023년07월07일
(11) 등록번호 10-2553802
(24) 등록일자 2023년07월05일

- (51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G02B 5/18 (2006.01) F21V 8/00 (2016.01)
G02B 27/01 (2006.01)
- (52) CPC특허분류
G02B 5/1871 (2013.01)
G02B 27/0172 (2013.01)
- (21) 출원번호 10-2019-7025001
- (22) 출원일자(국제) 2018년01월25일
심사청구일자 2021년01월15일
- (85) 번역문제출일자 2019년08월26일
- (65) 공개번호 10-2019-0107727
- (43) 공개일자 2019년09월20일
- (86) 국제출원번호 PCT/US2018/015324
- (87) 국제공개번호 WO 2018/140651
국제공개일자 2018년08월02일
- (30) 우선권주장
62/451,608 2017년01월27일 미국(US)
62/451,615 2017년01월27일 미국(US)
- (56) 선행기술조사문헌
JP2007265581 A*
KR1020030052705 A*
US20160223988 A1*
WO2015105063 A1*
*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

- (73) 특허권자
매직 립, 인코포레이티드
미국 플로리다 플랜타이온 웨스트 선라이즈 블러
마드 7500 (우: 33322)
- (72) 발명자
린, 디안민
미국 33322 플로리다 플랜테이션 웨스트 선라이즈
블러마드 7500
클루그, 마이클, 앤서니
미국 33322 플로리다 플랜테이션 웨스트 선라이즈
블러마드 7500
(뒷면에 계속)
- (74) 대리인
특허법인 남앤남

전체 청구항 수 : 총 60 항

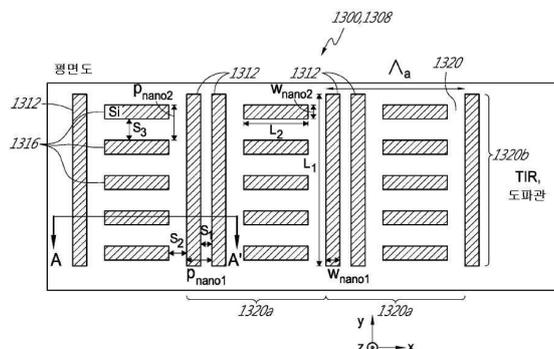
심사관 : 이성룡

(54) 발명의 명칭 상이하게 배향된 나노빔들을 갖는 메타표면들에 의해 형성된 회절 격자

(57) 요약

메타표면들은 예컨대, 광을 도파관으로 인커플링하거나 광을 도파관 밖을 아웃커플링하기 위해 머리-장착 디스플레이 시스템들에 콤팩트한 광학 엘리먼트들을 제공한다. 메타표면들은 복수의 반복 유닛 셀들에 의해 형성될 수 있고, 각각의 유닛 셀은 교차 방향으로 신장되는 두 세트 이상의 나노빔들 즉, 제1 방향으로 신장되는 하나 이상 (뒷면에 계속)

대표도 - 도13b



의 제1 나노빔들 및 제2 방향으로 신장되는 복수의 제2 나노빔들을 포함한다. 하향식 도에서 볼 때, 제1 방향은 y-축을 따를 수 있고, 제2 방향은 x-축을 따를 수 있다. 유닛 셀들은 10nm 내지 500nm 또는 300nm 내지 500nm를 포함하여, 10nm 내지 1 μ m 범위의 주기성을 가질 수 있다. 유리하게는, 메타표면들은 원형 편광을 갖는 입사광에 대해 그리고 넓은 범위의 입사각들에 걸쳐 높은 회절 각도들 및 높은 회절 효율들을 갖는 광의 회절을 제공한다.

(52) CPC특허분류

G02B 5/1809 (2013.01)

G02B 5/1842 (2013.01)

G02B 6/0016 (2013.01)

G02B 2207/101 (2013.01)

(72) 발명자

세인트 힐레어, 피에르

미국 33322 플로리다 플랜테이션 웨스트 선라이즈
불러바드 7500

멜리, 마우로

미국 33322 플로리다 플랜테이션 웨스트 선라이즈
불러바드 7500

페로즈, 크리스토프

미국 33322 플로리다 플랜테이션 웨스트 선라이즈
불러바드 7500

폴리아코브, 이브게니

미국 33322 플로리다 플랜테이션 웨스트 선라이즈
불러바드 7500

명세서

청구범위

청구항 1

광학 시스템으로서,
 가시 스펙트럼의 파장을 갖는 광을 회절시키도록 구성된 메타표면(metasurface)을 포함하고,
 상기 메타표면은 복수의 반복 유닛 셀들을 포함하며,
 각각의 유닛 셀은 나노빔들의 2 내지 4 세트들로 구성되고,
 나노빔들의 제1 세트는 하나 이상의 제1 나노빔들에 의해 형성되며;
 나노빔들의 제2 세트는 상기 하나 이상의 제1 나노빔들에 인접하게 배치되고 서브-파장 간격만큼 서로 분리되는 복수의 제2 나노빔들에 의해 형성되고,
 상기 하나 이상의 제1 나노빔들은 제1 배향 방향으로 신장되고, 상기 복수의 제2 나노빔들은 제2 배향 방향으로 신장되며, 상기 제1 배향 방향과 상기 제2 배향 방향은 서로 상이하고,
 상기 유닛 셀들은 10nm 내지 1 μ m 이하의 주기로 반복되고,
 상기 하나 이상의 제1 나노빔들 및 상기 제2 나노빔들은, 제1 굴절률을 갖는 하위 층 및 상기 제1 굴절률보다 낮은 제2 굴절률을 갖는 상위 층을 포함하는 이중층을 포함하며, 상기 상위 층은 마스크 층인,
 광학 시스템.

청구항 2

제1 항에 있어서,
 상기 하나 이상의 제1 나노빔들 및 상기 제2 나노빔들은, 상기 하나 이상의 제1 나노빔들에 의해 회절된 가시 광과 상기 제2 나노빔들에 의해 회절된 가시 광 사이에 위상차를 야기하도록 서로에 대해 일정 각도로 배향되는,
 광학 시스템.

청구항 3

제2 항에 있어서,
 상기 위상차는 상기 각도의 2배인,
 광학 시스템.

청구항 4

제1 항에 있어서,
 상기 가시 스펙트럼의 파장은 청색 광, 녹색 광 또는 적색 광에 대응하는,
 광학 시스템.

청구항 5

제1 항에 있어서,
 상기 하나 이상의 제1 나노빔들 및 상기 제2 나노빔들은 서로에 대해 90도만큼 회전되는 배향 방향으로 배향되는,
 광학 시스템.

청구항 6

제1 항에 있어서,
상기 제1 나노빔들 각각은 동일한 폭을 갖는,
광학 시스템.

청구항 7

제1 항에 있어서,
상기 제2 나노빔들 각각은 동일한 폭을 갖는,
광학 시스템.

청구항 8

제1 항에 있어서,
상기 제1 나노빔들 각각과 상기 제2 나노빔들 각각은 상기 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들의 개별 나노빔들 사이에서 동일한 간격을 갖는,
광학 시스템.

청구항 9

제1 항에 있어서,
상기 유닛 셀들은 상기 파장 이하의 주기로 반복되고, 상기 파장은 상기 가시 스펙트럼 내에 있는,
광학 시스템.

청구항 10

제1 항에 있어서,
상기 하나 이상의 제1 나노빔들 및 상기 제2 나노빔들은 상기 파장보다 작은 높이를 갖는,
광학 시스템.

청구항 11

제1 항에 있어서,
상기 하나 이상의 제1 나노빔들 및 상기 제2 나노빔들은 벌크 굴절률이 상기 파장에서 2.0 보다 높은 재료로 형성되는,
광학 시스템.

청구항 12

제1 항에 있어서,
상기 하나 이상의 제1 나노빔들 및 상기 제2 나노빔들은 반도체 재료 또는 절연 재료로 형성되는,
광학 시스템.

청구항 13

제1 항에 있어서,
상기 하나 이상의 제1 나노빔들 및 상기 제2 나노빔들은 실리콘을 갖는 재료로 형성되는,
광학 시스템.

청구항 14

제13 항에 있어서,

상기 하나 이상의 제1 나노빔들 및 상기 제2 나노빔들은 다결정 실리콘, 비정질 실리콘, 실리콘 탄화물 및 실리콘 질화물로 구성된 그룹으로부터 선택된 재료로 형성되는,

광학 시스템.

청구항 15

제1 항에 있어서,

상기 하나 이상의 제1 나노빔들 및 상기 제2 나노빔들은 표면 법선 평면에 대해 50 도 보다 큰 회절 각도에서 10%보다 큰 회절 효율로 상기 가시 광을 회절시키도록 구성되는,

광학 시스템.

청구항 16

제15 항에 있어서,

상기 하나 이상의 제1 나노빔들 및 상기 제2 나노빔들은 40도를 초과하는 입사각의 범위를 갖는 입사광에 대해 상기 회절 효율로 광을 회절시키도록 구성되는,

광학 시스템.

청구항 17

제16 항에 있어서,

상기 표면 법선 평면은 상기 제1 배향 방향으로 연장되는,

광학 시스템.

청구항 18

제17 항에 있어서,

상기 하나 이상의 제1 나노빔들 및 상기 제2 나노빔들은 투과 모드에서 광을 회절시키도록 구성되고, 상기 하나 이상의 제1 나노빔들 및 상기 제2 나노빔들의, 광-입사 측과 대향하는 측 상의 회절된 광의 세기는 상기 하나 이상의 제1 나노빔들 및 상기 제2 나노빔들의, 상기 광-입사 측과 동일한 측 상의 회절된 광의 세기에 비해 더 큰,

광학 시스템.

청구항 19

제17 항에 있어서,

상기 하나 이상의 제1 나노빔들 및 상기 제2 나노빔들은 반사 모드에서 광을 회절시키도록 구성되고, 상기 하나 이상의 제1 나노빔들 및 상기 제2 나노빔들의, 광-입사 측과 동일한 측 상의 회절된 광의 세기는 상기 하나 이상의 제1 나노빔들 및 상기 제2 나노빔들의, 상기 광-입사 측과 대향하는 측 상의 회절된 광의 세기에 비해 더 큰,

광학 시스템.

청구항 20

제1 항에 있어서,

상기 하나 이상의 제1 나노빔들 및 상기 제2 나노빔들은 기관 상에 형성되고, 벌크 굴절률이 상기 기관의 굴절률보다 적어도 0.5만큼 더 큰 재료로 형성되는,

광학 시스템.

청구항 21

제20 항에 있어서,

상기 기판은 1.5보다 큰 굴절률을 갖는,

광학 시스템.

청구항 22

제20 항에 있어서,

상기 기판은 상기 하나 이상의 제1 나노빔들 및 상기 제2 나노빔들에 의해 회절된 광이 내부 전반사 하에서 상기 제2 배향 방향으로 전파되도록 구성되는,

광학 시스템.

청구항 23

제1 항에 있어서,

상기 하나 이상의 제1 나노빔들 및 상기 제2 나노빔들은 실질적으로 직사각형 단면 형상을 갖는,

광학 시스템.

청구항 24

제1 항에 있어서,

상기 하나 이상의 제1 나노빔들은 한 쌍의 제1 나노빔들을 포함하는,

광학 시스템.

청구항 25

제24 항에 있어서,

상기 하나 이상의 제1 나노빔들은 상기 한 쌍의 나노빔들에 바로 인접하여서, 상기 제2 나노빔들이 제1 나노빔들의 인접한 쌍들 사이에 직접 개재되게 하는,

광학 시스템.

청구항 26

제1 항에 있어서,

상기 하나 이상의 제1 나노빔들은 하나의 제1 나노빔으로 구성되는,

광학 시스템.

청구항 27

제1 항에 있어서,

상기 하나 이상의 제1 나노빔들 및 상기 복수의 제2 나노빔들에 대해 상이한 배향으로 신장되는 복수의 제3 나노빔들에 의해 형성된 나노빔들의 제3 세트를 더 포함하고,

상기 제3 나노빔들은 상기 하나 이상의 제1 나노빔들과 상기 제2 나노빔들 사이에 개재되는,

광학 시스템.

청구항 28

제27 항에 있어서,

상기 제3 나노빔들은 동일한 길이를 가져서, 상기 제3 나노빔들은 함께 종결(coterminate)되는, 광학 시스템.

청구항 29

제27 항에 있어서,
상기 제3 나노빔들 중 인접한 나노빔들은 상기 제1 배향 방향으로 일정한 공간만큼 분리되는, 광학 시스템.

청구항 30

제27 항에 있어서,
상기 하나 이상의 제1 나노빔들은 복수의 제3 나노빔들에 대응하는 제1 배향 방향의 거리에 걸쳐있는(span), 광학 시스템.

청구항 31

제27 항에 있어서,
상기 제3 나노빔들 각각은 동일한 폭을 가지며, 상기 제3 나노빔들의 개별 나노빔들 간의 간격은 동일한 폭을 갖는, 광학 시스템.

청구항 32

제27 항에 있어서,
상기 제3 나노빔들은, 입사 광의 전파 방향에서 볼 때, 상기 하나 이상의 제1 나노빔들에 대해 상기 제2 나노빔들의 반시계 방향으로의 최소 회전 각도보다 작은 각도만큼 상기 하나 이상의 제1 나노빔들에 대해 상기 반시계 방향으로 회전되는 제3 배향 방향으로 연장되는, 광학 시스템.

청구항 33

제32 항에 있어서,
상기 하나 이상의 제1 나노빔들, 상기 복수의 제2 나노빔들 및 상기 복수의 제3 나노빔들에 대해 상이한 배향으로 신장되는 복수의 제4 나노빔들에 의해 형성되는 나노빔들의 제4 세트를 더 포함하고,
상기 제4 나노빔들은 상기 제3 나노빔들이 배치되는 측에 대향하는, 상기 제2 배향 방향으로 상기 제2 나노빔들의 측 상에 배치되는, 광학 시스템.

청구항 34

제33 항에 있어서,
상기 제4 나노빔들은, 입사 광의 전파 방향에서 볼 때, 상기 하나 이상의 제1 나노빔들에 대해 상기 제2 나노빔들의 반시계 방향으로의 최소 회전 각도보다 큰 각도만큼 상기 하나 이상의 제1 나노빔들에 대해 상기 반시계 방향으로 회전되는 제4 배향 방향으로 연장되는, 광학 시스템.

청구항 35

제34 항에 있어서,

상기 제4 배향 방향 및 상기 제3 배향 방향은 서로에 대해 90도 만큼 회전되는,
광학 시스템.

청구항 36

제1 항에 있어서,
상기 상위 층은 반사 방지 층인,
광학 시스템.

청구항 37

제1 항에 있어서,
상기 상위 층은 2.0보다 낮은 굴절률을 갖는 재료로 형성되는,
광학 시스템.

청구항 38

제1 항에 있어서,
상기 상위 층은 실리콘 또는 탄소를 함유하는,
광학 시스템.

청구항 39

제1 항에 있어서,
상기 하나 이상의 제1 나노빔들 및 상기 제2 나노빔들은 투명 스페이서 층에 매립되는,
광학 시스템.

청구항 40

제39 항에 있어서,
상기 투명 스페이서 층은 상기 하나 이상의 제1 나노빔들 및 상기 제2 나노빔들의 벌크 재료의 굴절률보다 작은 굴절률을 갖는,
광학 시스템.

청구항 41

제1 항에 있어서,
금속성 반사 층이 상기 하나 이상의 제1 나노빔들 및 상기 제2 나노빔들 위에 형성되는,
광학 시스템.

청구항 42

제1 항에 있어서,
가시 광을 전파시키도록 구성된 도파관을 더 포함하고,
상기 도파관은 상기 메타표면을 갖는 기관을 포함하고,
상기 하나 이상의 제1 나노빔들 및 상기 제2 나노빔들은 입사 광의 방향에 대해 회절 각도로 광을 회절시키고
상기 회절된 광이 내부 전반사 하에서 상기 기관에서 전파되게 하도록 배열되는,
광학 시스템.

청구항 43

제42 항에 있어서,

상기 기관은, 굴절률이 상기 하나 이상의 제1 나노빔들 및 상기 제2 나노빔들이 형성된 재료의 벌크 굴절률보다 작은 재료로 형성되고, 그리하여, 상기 회절된 광이 내부 전반사 하에서 상기 기관에서 전파되게 하는, 광학 시스템.

청구항 44

제42 항에 있어서,

상기 회절 각도는 50도를 초과하는, 광학 시스템.

청구항 45

제42 항에 있어서,

상기 기관은, 상기 하나 이상의 제1 나노빔들 및 상기 제2 나노빔들이 형성된 재료의 벌크 굴절률보다 굴절률이 적어도 0.5 만큼 더 작은 재료로 형성되는, 광학 시스템.

청구항 46

제42 항에 있어서,

상기 기관은 1.5보다 큰 굴절률을 갖는, 광학 시스템.

청구항 47

제1 항에 있어서,

상기 광학 시스템은 증강 현실 이미지 콘텐츠를 디스플레이하기 위해 사용자의 눈에 광을 프로젝팅하도록 구성된 머리-장착 디스플레이 디바이스이고,

상기 머리-장착 디스플레이 디바이스는,

상기 사용자의 머리에 지지되도록 구성된 프레임; 및

상기 프레임 상에 배치된 디스플레이를 포함하고, 상기 디스플레이의 적어도 일부는,

하나 이상의 도파관들 - 상기 하나 이상의 도파관들은 투명하며, 상기 사용자가 상기 머리-장착 디스플레이 디바이스를 착용할 때, 상기 사용자의 눈 전방의 위치에 배치되어서, 상기 투명한 부분은 상기 사용자 전방의 환경의 부분으로부터의 광을 상기 사용자의 눈으로 투과시켜 상기 사용자 전방의 환경의 상기 부분의 뷰(view)를 제공함 - ;

하나 이상의 광원들; 및

상기 광원들로부터의 광을 상기 하나 이상의 도파관들에 커플링하거나, 또는 상기 하나 이상의 도파관들 밖으로 광을 커플링하도록 구성된 적어도 하나의 회절 격자를 포함하고, 상기 회절 격자는 상기 메타 표면을 포함하는,

광학 시스템.

청구항 48

제47 항에 있어서,

상기 하나 이상의 광원들은 광섬유 스캐닝 프로젝터(fiber scanning projector)를 포함하는,

광학 시스템.

청구항 49

제47 항에 있어서,

상기 디스플레이는 복수의 깊이 평면들의 이미지 콘텐츠를 상기 사용자에게 제시하도록 상기 사용자의 눈에 광을 프로젝팅하도록 구성되는,

광학 시스템.

청구항 50

광학 시스템을 제조하는 방법으로서,

기판을 제공하는 단계;

상기 기판 상에 복수의 유닛 셀들 - 상기 유닛 셀들은 나노빔들의 2 내지 4 세트들로 구성됨 - 을 포함하는 메타표면을 형성하는 단계를 포함하고,

상기 유닛 셀들을 형성하는 단계는,

제1 굴절률을 갖는 하위 층을, 상기 제1 굴절률보다 낮은 제2 굴절률을 갖는 상위 층을 마스크 층으로 사용하여 에칭함으로써, 나노빔들의 제1 세트 및 나노빔들의 제2 세트를 패터닝하는 단계를 포함하며, 상기 나노빔들의 제1 세트 및 상기 나노빔들의 제2 세트를 패터닝하는 단계는,

하나 이상의 제1 나노빔들을 형성함으로써 상기 나노빔들의 제1 세트를 형성하는 단계; 및

상기 하나 이상의 제1 나노빔에 인접하게 상기 나노빔들의 제2 세트를 형성하는 단계를 포함하고,

상기 나노빔들의 제2 세트는 서브-파장 간격만큼 서로 분리되는 복수의 제2 나노빔들을 포함하며,

상기 하나 이상의 제1 나노빔 및 상기 복수의 제2 나노빔들은 상이한 배향 방향으로 신장되고,

상기 유닛 셀들은 10nm 내지 1 μ m 이하의 주기로 반복되며,

상기 하나 이상의 제1 나노빔 및 상기 제2 나노빔들은 상기 하위 층 및 상기 상위 층을 포함하는 이중층인,

광학 시스템을 제조하는 방법.

청구항 51

제50 항에 있어서,

상기 하나 이상의 제1 나노빔들을 형성하는 단계 및 상기 제2 나노빔들을 형성하는 단계는 상기 제1 나노빔들 및 상기 제2 나노빔들을 리소그래피식으로 정의하는 단계를 포함하는,

광학 시스템을 제조하는 방법.

청구항 52

제50 항에 있어서,

상기 하나 이상의 제1 나노빔들을 형성하는 단계 및 상기 제2 나노빔들을 형성하는 단계는 나노임프린팅 (nanoimprinting)에 의해 상기 제1 나노빔들 및 상기 제2 나노빔들을 형성하는 단계를 포함하는,

광학 시스템을 제조하는 방법.

청구항 53

제50 항에 있어서,

상기 하나 이상의 제1 나노빔들을 형성하는 단계 및 상기 제2 나노빔들을 형성하는 단계는 동시에 수행되는,

광학 시스템을 제조하는 방법.

청구항 54

제50 항에 있어서,
 상기 하나 이상의 제1 나노빔들은 동일한 폭을 갖는,
 광학 시스템을 제조하는 방법.

청구항 55

제50 항에 있어서,
 각각의 유닛 셀의 상기 제2 나노빔들은 동일한 폭을 갖는,
 광학 시스템을 제조하는 방법.

청구항 56

제50 항에 있어서,
 상기 유닛 셀들은 가시 스펙트럼의 파장 이하의 주기를 갖는,
 광학 시스템을 제조하는 방법.

청구항 57

광학 시스템으로서,
 파장을 갖는 가시 광을 회절시키도록 구성된 메타표면을 포함하고,
 상기 메타표면은 복수의 반복 유닛 셀들을 포함하며,
 각각의 유닛 셀은,
 하나 이상의 제1 나노빔들에 의해 형성된 나노빔들의 제1 세트; 및
 상기 하나 이상의 제1 나노빔들에 인접하게 배치되고 서브-파장 간격만큼 서로 분리되는 복수의 제2 나노빔들에 의해 형성되는 나노빔들의 제2 세트를 포함하고,
 상기 하나 이상의 제1 나노빔들 및 상기 복수의 제2 나노빔들은 상이한 배향 방향으로 신장되며,
 상기 유닛 셀들은 상기 파장 이하의 주기로 반복되고,
 상기 하나 이상의 제1 나노빔들 및 상기 제2 나노빔들은, 제1 굴절률을 갖는 하위 층 및 상기 제1 굴절률보다 낮은 제2 굴절률을 갖는 상위 층을 포함하는 이중층을 포함하며, 상기 상위 층은 마스크 층인,
 광학 시스템.

청구항 58

제57 항에 있어서,
 상기 파장의 광을 상기 메타표면으로 방출하도록 구성된 광원을 더 포함하는,
 광학 시스템.

청구항 59

제58 항에 있어서,
 상기 광원으로부터의 광을 변조하고 상기 변조된 광을 상기 메타표면으로 출력하도록 구성된 공간 광 변조기를 더 포함하는,
 광학 시스템.

청구항 60

제57 항에 있어서,

상기 파장은 청색 광, 녹색 광 또는 적색 광에 대응하는, 광학 시스템.

발명의 설명

기술 분야

- [0001] [0001] 본 출원은, 2017년 1월 27일에 출원된 미국 가출원 번호 제62/451,608호; 및 2017년 1월 27일에 출원된 미국 가출원 번호 제62/451,615호를 35 U.S.C. § 119(e) 하에서 우선권으로 주장한다. 이들 우선권 서류들 각각의 전체 개시내용은 인용에 의해 본원에 포함된다.
- [0002] [0002] 본 출원은 다음의 특허 출원들 즉, 미국 출원 번호 제14/331,218호(매직 립 문서 번호 20020.00); 미국 출원 번호 제14/641,376호(매직 립 문서 번호 20014.00); 미국 가출원 번호 제62/012,273호(매직 립 문서 번호 30019.00); 미국 가출원 번호 제62/005,807호(매직 립 문서 번호 30016.00); 미국 가출원 번호 제62/333,067호(대리인 문서 번호 MLEAP.066PR); 및 미국 특허 출원 번호 제15/342,033호(대리인 문서 번호 MLEAP.027A) 각각의 전체를 인용으로 포함한다.
- [0003] [0003] 본 개시내용은 디스플레이 시스템들에 관한 것으로, 보다 상세하게는 증강 현실 디스플레이 시스템들에 관한 것이다.

배경 기술

- [0004] [0004] 현대 컴퓨팅 및 디스플레이 기술들은 소위 "가상 현실" 또는 "증강 현실" 경험들을 위한 시스템들의 개발을 용이하게 했으며, 여기서 디지털 방식으로 생성된 이미지들 또는 이미지들의 부분들은, 그들이 실제인 것으로 보이거나, 실제로서 지각될 수 있는 방식으로 사용자에게 제시된다. 가상 현실, 또는 "VR" 시나리오는 통상적으로 다른 실제 세계 시각적 입력에 대한 투명성(transparency) 없는 디지털 또는 가상 이미지 정보의 프리젠테이션(presentation)을 수반하고; 증강 현실, 또는 "AR" 시나리오는 통상적으로 사용자 주위 실제 세계의 시각화에 대한 증강으로서 디지털 또는 가상 이미지 정보의 프리젠테이션을 수반한다. 혼합 현실, 또는 "MR" 시나리오는 AR 시나리오의 타입이고 통상적으로 자연 세계에 통합되고 이에 응답하는 가상 객체들을 수반한다. 예컨대, MR 시나리오는 실제세계의 객체들에 의해 차단된 것으로 나타나거나, 또는 그렇지 않고, 그 객체들과 상호작용하는 것으로 지각되는 AR 이미지 콘텐츠를 포함 할 수 있다.
- [0005] [0005] 도 1을 참조하면, 증강 현실 장면(1)이 도시된다. AR 기술의 사용자는 배경에 있는 사람들, 나무들, 빌딩들, 및 콘크리트 플랫폼(30)을 피쳐링(featuring)하는 실제 세계 공원-형 세팅(20)을 본다. 사용자는 또한, 자신이 실제 세계 플랫폼(1120) 위에 서 있는 로봇 동상(40) 및 호박벌의 의인화인 것처럼 보이는 날고있는 만화-형 아바타 캐릭터(50)와 같은 "가상 콘텐츠"를 "본다"고 지각한다. 이들 엘리먼트들(50, 40)은 이들이 실제 세계에 존재하지 않는다는 점에서 "가상"이다. 인간 시각 지각 시스템은 복잡하기 때문에, 다른 가상 또는 실제 세계 이미지리 엘리먼트들 사이에서 가상 이미지 엘리먼트들의 편안하고, 자연스럽고, 풍부한 프리젠테이션을 용이하게 하는 AR 기술을 생성하는 것은 난제이다.
- [0006] [0006] 본원에서 개시된 시스템들 및 방법들은 AR 및 VR 기술에 관련된 다양한 난제들을 해결한다.

발명의 내용

- [0007] [0007] 일부 실시예들에 따라, 광학 시스템은 파장을 갖는 가시 광을 회절시키도록 구성된 메타표면을 포함한다. 메타표면은 복수의 반복 유닛 셀들을 포함하고, 각각의 유닛 셀은 나노빔들의 2 내지 4 세트들로 구성된다. 나노빔들의 제1 세트는 하나 이상의 제1 나노빔들에 의해 형성되고 나노빔들의 제2 세트는 상기 하나 이상의 제1 나노빔들에 인접하게 배치되고 서브-파장 간격만큼 서로 분리되는 복수의 제2 나노빔들에 의해 형성된다. 상기 하나 이상의 제1 나노빔들 및 상기 복수의 제2 나노빔들은 상이한 배향 방향으로 신장된다. 상기 유닛 셀들은 약 10nm 내지 1μm 이하의 주기로 반복된다.
- [0008] [0008] 일부 다른 실시예들에 따라, 광학 시스템은 가시 광을 전파시키도록 구성된 도파관을 포함하고, 상기 도파관은, 위에서 설명된 광학 시스템의 메타표면을 갖는 기관을 포함하고, 상기 하나 이상의 제1 나노빔들 및 상기 제2 나노빔들은 입사 광의 방향에 대해 회절 각도로 광을 회절시키고 상기 회절된 광이 내부 전반사 하에

서 상기 기관에서 전파되게 하도록 배열된다.

- [0009] [0009] 일부 실시예들에 따라, 머리-장착 디스플레이 디바이스는 증강 현실 이미지 콘텐츠를 디스플레이하기 위해 사용자의 눈에 광을 프로젝팅하도록 구성되며, 여기서 머리-장착 디스플레이 디바이스는 상기 사용자의 머리에 지지되도록 구성된 프레임에 포함한다. 디스플레이 디바이스는 부가적으로 상기 프레임 상에 배치되는 디스플레이를 포함한다. 디스플레이의 적어도 일부는 하나 이상의 도파관들을 포함하고, 상기 하나 이상의 도파관들은 투명하며, 상기 사용자가 상기 머리-장착 디스플레이 디바이스를 착용할 때, 상기 사용자의 눈 전방의 위치에 배치되어서, 상기 투명한 부분은 상기 사용자 전방의 환경의 부분으로부터의 광을 상기 사용자의 눈으로 투과시켜 상기 사용자 전방의 환경의 상기 부분의 뷰(view)를 제공한다. 디스플레이 디바이스는 부가적으로 하나 이상의 광원들을 포함한다. 디스플레이 디바이스는 상기 광원들로부터의 광을 상기 하나 이상의 도파관들에 커플링하거나, 또는 상기 하나 이상의 도파관들 밖으로 광을 커플링하도록 구성된 적어도 하나의 회절 격자를 더 포함하며, 여기서 회절 격자는 위에서 설명된 광학 시스템의 메타표면을 포함한다.
- [0010] [0010] 또 다른 실시예들에 따라, 광학 시스템을 제조하는 방법은 기관을 제공하는 단계 및 복수의 유닛 셀들을 포함하는 메타표면을 기관 상에 형성하는 단계를 포함한다. 메타표면을 형성하는 단계는 나노빔들의 2 내지 4 세트들로 구성된 유닛 셀들을 형성하는 단계를 포함한다. 유닛 셀을 형성하는 단계는, 하나 이상의 제1 나노빔들을 포함하는 나노빔들의 제1 세트를 형성하는 단계; 및 하나 이상의 제1 나노빔들에 인접하게 나노빔들의 제2 세트를 형성하는 단계를 포함한다. 나노빔들의 제2 세트를 형성하는 단계는 서브-파장 간격만큼 서로 분리되는 복수의 제2 나노빔들을 형성하는 단계를 포함한다. 상기 하나 이상의 제1 나노빔들 및 상기 복수의 제2 나노빔들은 상이한 배향 방향으로 신장된다. 상기 유닛 셀들은 약 10nm 내지 1 μ m 이하의 주기로 반복된다.
- [0011] [0011] 일부 실시예들에 따라, 광학 시스템은 파장을 갖는 가시 광을 회절시키도록 구성된 메타표면을 포함하며, 여기서 메타표면은 복수의 반복 유닛 셀들을 포함한다. 각각의 유닛 셀은 나노빔들의 제1 세트를 포함하며, 여기서 상기 제1 나노빔들 중 둘 이상은 상이한 폭들을 갖는다. 각각의 유닛 셀은 부가적으로, 나노빔들의 제2 세트를 포함하며, 여기서 상기 제2 나노빔들 중 둘 이상은 상이한 폭들을 갖는다. 제2 나노빔들은 제1 나노빔들에 인접하게 배치되고 서브-파장 간격만큼 서로 분리된다. 또한, 유닛 셀들의 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들은 상이한 배향들을 갖는다.
- [0012] [0012] 다른 실시예들에 따라, 머리-장착 디스플레이 디바이스는 증강 현실 이미지 콘텐츠를 디스플레이하기 위해 사용자의 눈에 광을 프로젝팅하도록 구성되며, 여기서 머리-장착 디스플레이 디바이스는 상기 사용자의 머리에 지지되도록 구성된 프레임에 포함한다. 디스플레이 디바이스는 부가적으로 상기 프레임 상에 배치되는 디스플레이를 포함한다. 디스플레이의 적어도 일부는 하나 이상의 도파관들을 포함하고, 상기 하나 이상의 도파관들은 투명하며, 상기 사용자가 상기 머리-장착 디스플레이 디바이스를 착용할 때, 상기 사용자의 눈 전방의 위치에 배치되어서, 상기 투명한 부분은 광을 상기 사용자의 눈으로 투과시켜 상기 사용자 전방의 환경의 상기 부분의 뷰(view)를 제공한다. 디스플레이 디바이스는 부가적으로 하나 이상의 광원들을 포함한다. 디스플레이 디바이스는 상기 광원들로부터의 광을 상기 하나 이상의 도파관들에 커플링하거나, 또는 상기 하나 이상의 도파관들 밖으로 광을 커플링하도록 구성된 적어도 하나의 회절 격자를 더 포함하며, 여기서 회절 격자는 위에서 설명된 광학 시스템에 따른 메타표면을 포함한다.
- [0013] [0013] 또 다른 실시예들에 따라, 메타표면을 제조하는 방법은 기관을 제공하는 단계를 포함한다. 이 방법은 부가적으로, 기관 상에 복수의 유닛 셀들을 갖는 메타표면을 형성하는 단계를 포함한다. 메타표면을 형성하는 단계는 상이한 폭들을 갖는 둘 이상의 제1 나노빔들을 포함하는 나노빔들의 제1 세트를 형성하는 단계를 포함한다. 메타표면을 형성하는 단계는 부가적으로, 상이한 폭들을 갖는 둘 이상의 제2 나노빔들을 포함하는 나노빔들의 제2 세트를 형성하는 단계를 포함하며, 여기서 제2 나노빔들은 제1 나노빔들에 인접하게 배치되고 서브-파장 간격만큼 서로 분리된다. 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들은 상이한 배향들을 갖는다.
- [0014] [0014] 다양한 다른 실시예들의 예들이 아래에 제공된다.
- [0015] 1. 광학 시스템으로서,
- [0016] 파장을 갖는 가시 광을 회절시키도록 구성된 메타표면(metasurface) - 메타표면은 복수의 반복 유닛 셀들을 포함하고,
- [0017] 각각의 유닛 셀은 나노빔들의 2 내지 4 세트들로 구성되고,
- [0018] 나노빔들의 제1 세트는 하나 이상의 제1 나노빔들에 의해 형성되고; 그리고

- [0019] 나노빔들의 제2 세트는 하나 이상의 제1 나노빔들에 인접하게 배치되고 서브-파장 간격만큼 서로 분리되는 복수의 제2 나노빔들에 의해 형성되고,
- [0020] 하나 이상의 제1 나노빔들 및 복수의 제2 나노빔들은 상이한 배향 방향으로 신장되고,
- [0021] 유닛 셀들은 약 10nm 내지 1 μ m 이하의 주기로 반복되는,
- [0022] 광학 시스템.
- [0023] 2. 실시예 1의 광학 시스템에 있어서,
- [0024] 하나 이상의 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들은 하나 이상의 제1 나노빔들에 의해 회절된 가시 광과 제2 나노빔들에 의해 회절된 가시 광 사이의 위상차를 야기하도록 서로에 대해 일정 각도로 배향되는,
- [0025] 광학 시스템.
- [0026] 3. 실시예 2의 광학 시스템에 있어서,
- [0027] 위상차는 각도의 2배인,
- [0028] 광학 시스템.
- [0029] 4. 실시예 1 내지 실시예 3 중 어느 한 실시예의 광학 시스템에 있어서,
- [0030] 가시 스펙트럼의 파장은 청색 광, 녹색 광 또는 적색 광에 대응하는,
- [0031] 광학 시스템.
- [0032] 5. 실시예 1 내지 실시예 4 중 어느 한 실시예의 광학 시스템에 있어서,
- [0033] 하나 이상의 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들은 서로에 대해 약 90도만큼 회전되는 배향 방향으로 배향되는,
- [0034] 광학 시스템.
- [0035] 6. 실시예 1 내지 실시예 5 중 어느 한 실시예의 광학 시스템에 있어서,
- [0036] 제1 나노빔들 각각은 동일한 폭을 갖는,
- [0037] 광학 시스템.
- [0038] 7. 실시예 1 내지 실시예 6 중 어느 한 실시예의 광학 시스템에 있어서,
- [0039] 제2 나노빔들 각각은 동일한 폭을 갖는,
- [0040] 광학 시스템.
- [0041] 8. 실시예 1 내지 실시예 7 중 어느 한 실시예의 광학 시스템에 있어서,
- [0042] 제2 나노빔들 각각의 제1 나노빔들 각각은 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들의 개별 나노빔들 사이에서 동일한 간격을 갖는,
- [0043] 광학 시스템.
- [0044] 9. 실시예 1 내지 실시예 7 중 어느 한 실시예의 광학 시스템에 있어서,
- [0045] 유닛 셀들은 파장 이하의 주기로 반복되고, 파장은 가시 스펙트럼 내에 있는,
- [0046] 광학 시스템.
- [0047] 10. 실시예 1 내지 실시예 9 중 어느 한 실시예의 광학 시스템에 있어서,
- [0048] 하나 이상의 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들은 파장보다 작은 높이를 갖는,
- [0049] 광학 시스템.
- [0050] 11. 실시예 1 내지 실시예 10 중 어느 한 실시예의 광학 시스템에 있어서,
- [0051] 하나 이상의 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들은 벌크 굴절률이 파장에서 2.0 보다 높은 재료로 형성되는,

- [0052] 광학 시스템.
- [0053] 12. 실시예 1 내지 실시예 11 중 어느 한 실시예의 광학 시스템에 있어서,
- [0054] 하나 이상의 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들은 반도체 재료 또는 절연 재료로 형성되는,
- [0055] 광학 시스템.
- [0056] 13. 실시예 1 내지 실시예 12 중 어느 한 실시예의 광학 시스템에 있어서,
- [0057] 하나 이상의 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들은 실리콘을 갖는 재료로 형성되는,
- [0058] 광학 시스템.
- [0059] 14. 실시예 1 내지 실시예 13 중 어느 한 실시예의 광학 시스템에 있어서,
- [0060] 하나 이상의 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들은 다결정 실리콘, 비정질 실리콘, 실리콘 탄화물 및 실리콘 질화물로 구성된 그룹으로부터 선택된 재료로 형성되는,
- [0061] 광학 시스템.
- [0062] 15. 실시예 1 내지 실시예 14 중 어느 한 실시예의 광학 시스템에 있어서,
- [0063] 하나 이상의 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들은 표면 법선 평면에 대해 50 도 보다 큰 회절 각도에서 10%보다 큰 회절 효율로 가시 광을 회절시키도록 구성되는,
- [0064] 광학 시스템.
- [0065] 16. 실시예 15의 광학 시스템에 있어서,
- [0066] 하나 이상의 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들은 40도를 초과하는 입사각의 범위를 갖는 입사광에 대해 회절 효율로 광을 회절시키도록 구성되는,
- [0067] 광학 시스템.
- [0068] 17. 실시예 16의 광학 시스템에 있어서,
- [0069] 표면 법선 평면은 제1 배향 방향으로 연장되는,
- [0070] 광학 시스템.
- [0071] 18. 실시예 17의 광학 시스템에 있어서,
- [0072] 하나 이상의 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들은 투과 모드에서 광을 회절시키도록 구성되고, 하나 이상의 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들의, 광-입사 축과 대향하는 축 상의 회절된 광의 세기는 하나 이상의 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들의, 광-입사 축과 동일한 축 상의 회절된 광의 세기에 비해 더 큰,
- [0073] 광학 시스템.
- [0074] 19. 실시예 17의 광학 시스템에 있어서,
- [0075] 하나 이상의 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들은 반사 모드에서 광을 회절시키도록 구성되고, 하나 이상의 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들의, 광-입사 축과 동일한 축 상의 회절된 광의 세기는 하나 이상의 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들의, 광-입사 축과 대향하는 축 상의 회절된 광의 세기에 비해 더 큰,
- [0076] 광학 시스템.
- [0077] 20. 실시예 1 내지 실시예 19 중 어느 한 실시예의 광학 시스템에 있어서,
- [0078] 하나 이상의 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들은 기관 상에 형성되고, 벌크 굴절률이 기관의 굴절률보다 적어도 0.5만큼 더 큰 재료로 형성되는,
- [0079] 광학 시스템.
- [0080] 21. 실시예 20의 광학 시스템에 있어서,
- [0081] 기관은 1.5보다 큰 굴절률을 갖는,

- [0082] 광학 시스템.
- [0083] 22. 실시예 20 또는 실시예 21의 광학 시스템에 있어서,
- [0084] 기관은 하나 이상의 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들에 의해 회절된 광이 내부 전반사 하에서 제2 방향으로 전파 되도록 구성되는,
- [0085] 광학 시스템.
- [0086] 23. 실시예 1 내지 실시예 22 중 어느 한 실시예의 광학 시스템에 있어서,
- [0087] 하나 이상의 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들은 실질적으로 직사각형 단면 형상을 갖는,
- [0088] 광학 시스템.
- [0089] 24. 실시예 1 내지 실시예 23 중 어느 한 실시예의 광학 시스템에 있어서,
- [0090] 하나 이상의 제1 나노빔들은 한 쌍의 제1 나노빔들을 포함하는,
- [0091] 광학 시스템.
- [0092] 25. 실시예 24의 광학 시스템에 있어서,
- [0093] 하나 이상의 제1 나노빔들은 한 쌍의 나노빔들에 바로 인접하여서, 제2 나노빔들이 제1 나노빔들의 인접한 쌍들 사이에 직접 개재되게 하는,
- [0094] 광학 시스템.
- [0095] 26. 실시예 1 내지 실시예 23 중 어느 한 실시예의 광학 시스템에 있어서,
- [0096] 하나 이상의 제1 나노빔들은 하나의 제1 나노빔으로 구성되는,
- [0097] 광학 시스템.
- [0098] 27. 실시예 1 내지 실시예 24 및 실시예 26 중 어느 한 실시예의 광학 시스템에 있어서,
- [0099] 하나 이상의 제1 나노빔들 및 복수의 제2 나노빔들에 대해 상이한 배향으로 신장되는 복수의 제3 나노빔들에 의해 형성된 나노빔들의 제3 세트를 더 포함하고,
- [0100] 제3 나노빔들은 하나 이상의 제1 나노빔들과 제2 나노빔들 사이에 개재되는,
- [0101] 광학 시스템.
- [0102] 28. 실시예 27의 광학 시스템에 있어서,
- [0103] 제3 나노빔들은 동일한 길이를 가져서, 제3 나노빔들은 함께 종결(coterminate)되는,
- [0104] 광학 시스템.
- [0105] 29. 실시예 27 또는 실시예 28의 광학 시스템에 있어서,
- [0106] 제3 나노빔들 중 인접한 나노빔들은 제1 배향 방향으로 일정한 공간만큼 분리되는,
- [0107] 광학 시스템.
- [0108] 30. 실시예 27 내지 실시예 29 중 어느 한 실시예의 광학 시스템에 있어서,
- [0109] 하나 이상의 제1 나노빔들은 복수의 제3 나노빔들에 대응하는 제1 배향 방향의 거리에 걸쳐있는(span),
- [0110] 광학 시스템.
- [0111] 31. 실시예 27 내지 실시예 30 중 어느 한 실시예의 광학 시스템에 있어서,
- [0112] 제3 나노빔들 각각은 동일한 폭을 가지며, 제3 나노빔들의 개별 나노빔들 간의 간격은 동일한 폭을 갖는,
- [0113] 광학 시스템.
- [0114] 32. 실시예 27 내지 실시예 31 중 어느 한 실시예의 광학 시스템에 있어서,
- [0115] 제3 나노빔들은, 입사 광의 전파 방향에서 볼 때, 하나 이상의 제1 나노빔들에 대해 제2 나노빔들의 반시계 방

향으로의 최소 회전 각도보다 작은 각도만큼 하나 이상의 제1 나노빔들에 대해 반시계 방향으로 회전되는 제3 배향 방향으로 연장되는,

- [0116] 광학 시스템.
- [0117] 33. 실시예 27 내지 실시예 32 중 어느 한 실시예의 광학 시스템에 있어서,
- [0118] 하나 이상의 제1 나노빔들, 복수의 제2 나노빔들 및 복수의 제3 나노빔들에 대해 상이한 배향으로 신장되는 복수의 제4 나노빔들에 의해 형성되는 나노빔들의 제4 세트를 더 포함하고,
- [0119] 제4 나노빔들은 제3 나노빔들이 배치되는 측에 대향하는, 제2 배향 방향으로 제2 나노빔들의 측 상에 배치되는,
- [0120] 광학 시스템.
- [0121] 34. 실시예 33의 광학 시스템에 있어서,
- [0122] 제4 나노빔들은, 입사 광의 전파 방향에서 볼 때, 하나 이상의 제1 나노빔들에 대해 제2 나노빔들의 반시계 방향으로의 최소 회전 각도보다 큰 각도만큼 하나 이상의 제1 나노빔들에 대해 반시계 방향으로 회전되는 제4 배향 방향으로 연장되는,
- [0123] 광학 시스템.
- [0124] 35. 실시예 34의 광학 시스템에 있어서,
- [0125] 제4 배향 방향 및 제3 배향 방향은 서로에 대해 약 90도 만큼 회전되는,
- [0126] 광학 시스템.
- [0127] 36. 실시예 1 내지 실시예 35 중 어느 한 실시예의 광학 시스템에 있어서,
- [0128] 하나 이상의 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들은 제1 굴절률을 갖는 하위 층 및 제1 굴절률보다 낮은 제2 굴절률을 갖는 상위 층을 포함하는 이중층을 포함하는,
- [0129] 광학 시스템.
- [0130] 37. 실시예 36의 광학 시스템에 있어서,
- [0131] 상위 층은 약 2.0보다 낮은 굴절률을 갖는 재료로 형성되는,
- [0132] 광학 시스템.
- [0133] 38. 실시예 36 또는 실시예 37의 광학 시스템에 있어서,
- [0134] 상위 층은 실리콘 또는 탄소를 함유하는,
- [0135] 광학 시스템.
- [0136] 39. 실시예 1 내지 실시예 38 중 어느 한 실시예의 광학 시스템에 있어서,
- [0137] 하나 이상의 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들은 투명 스페이서 층에 매립되는,
- [0138] 광학 시스템.
- [0139] 40. 실시예 39의 광학 시스템에 있어서,
- [0140] 투명 스페이서 층은 하나 이상의 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들의 벌크 재료의 굴절률보다 작은 굴절률을 갖는,
- [0141] 광학 시스템.
- [0142] 41. 실시예 1 내지 실시예 38 중 어느 한 실시예의 광학 시스템에 있어서,
- [0143] 금속성 반사 층은 하나 이상의 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들 위에 형성되는,
- [0144] 광학 시스템.
- [0145] 42. 광학 시스템으로서,
- [0146] 가시 광을 전파시키도록 구성된 도파관을 포함하고,

- [0147] 도파관은 실시예 1 내지 실시예 41 중 어느 한 실시예에 따른 메타표면을 갖는 기관을 포함하고,
- [0148] 하나 이상의 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들은 입사 광의 방향에 대해 회절 각도로 광을 회절시키고 회절된 광이 내부 전반사 하에서 기관에서 전파되게 하도록 배열되는,
- [0149] 광학 시스템.
- [0150] 43. 실시예 42의 도파관에 있어서,
- [0151] 기관은, 굴절률이 하나 이상의 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들이 형성된 재료의 벌크 굴절률보다 작은 재료로 형성되고, 그리하여, 회절된 광이 내부 전반사 하에서 기관에서 전파되게 하는,
- [0152] 광학 시스템.
- [0153] 44. 실시예 42 또는 실시예 43의 도파관에 있어서,
- [0154] 회절 각도는 50도를 초과하는,
- [0155] 광학 시스템.
- [0156] 45. 실시예 42 내지 실시예 44 중 어느 한 실시예의 도파관에 있어서,
- [0157] 기관은, 하나 이상의 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들이 형성된 재료의 벌크 굴절률보다 굴절률이 적어도 0.5 만큼 더 작은 재료로 형성되는,
- [0158] 광학 시스템.
- [0159] 46. 실시예 42 내지 실시예 45 중 어느 한 실시예의 도파관에 있어서,
- [0160] 기관은 1.5보다 큰 굴절률을 갖는,
- [0161] 광학 시스템.
- [0162] 47. 증강 현실 이미지 콘텐츠를 디스플레이하기 위해 사용자의 눈에 광을 프로젝팅하도록 구성된 머리-장착 디스플레이 디바이스로서,
- [0163] 사용자의 머리에 지지되도록 구성된 프레임;
- [0164] 프레임 상에 배치된 디스플레이를 포함하고,
- [0165] 디스플레이의 적어도 일부는,
- [0166] 하나 이상의 도파관들 - 하나 이상의 도파관들은 투명하며, 사용자가 머리-장착 디스플레이 디바이스를 착용할 때, 사용자의 눈 전방의 위치에 배치되어서, 투명한 부분은 사용자 전방의 환경의 부분으로부터의 광을 사용자의 눈으로 투과시켜 사용자 전방의 환경의 부분의 뷰(view)를 제공함 - ;
- [0167] 하나 이상의 광원들; 및
- [0168] 광원들로부터의 광을 하나 이상의 도파관들에 커플링하거나, 또는 하나 이상의 도파관들 밖으로 광을 커플링하도록 구성된 적어도 하나의 회절 격자를 포함하고,
- [0169] 회절 격자는 실시예 1 내지 실시예 41 중 어느 한 실시예에 따른 메타표면을 포함하는,
- [0170] 머리-장착 디스플레이 디바이스.
- [0171] 48. 실시예 47의 디바이스에 있어서,
- [0172] 하나 이상의 광원들은 광섬유 스캐닝 프로젝터(fiber scanning projector)를 포함하는,
- [0173] 머리-장착 디스플레이 디바이스.
- [0174] 49. 실시예 47 또는 실시예 48의 디바이스에 있어서,
- [0175] 디스플레이는 복수의 깊이 평면들의 이미지 콘텐츠를 사용자에게 제시하도록 사용자의 눈에 광을 프로젝팅하도록 구성되는,
- [0176] 머리-장착 디스플레이 디바이스.

- [0177] 50. 광학 시스템을 제조하는 방법으로서,
 [0178] 기관을 제공하는 단계;
 [0179] 기관 상에 복수의 유닛 셀들을 포함하는 메타표면을 형성하는 단계를 풍마하고, 유닛 셀들은 나노빔들의 2 내지 4 세트들로 구성되며,
 [0180] 유닛 셀들을 형성하는 단계는,
 [0181] 하나 이상의 제1 나노빔들을 포함하는 나노빔들의 제1 세트를 형성하는 단계; 및
 [0182] 하나 이상의 제1 나노빔에 인접하게 나노빔들의 제2 세트를 형성하는 단계를 포함하고,
 [0183] 나노빔들의 제2 세트는 서브-과장 간격만큼 서로 분리되는 복수의 제2 나노빔들을 포함하고,
 [0184] 하나 이상의 제1 나노빔들 및 복수의 제2 나노빔들은 상이한 배향 방향으로 신장되고,
 [0185] 유닛 셀들은 약 10nm 내지 1 μ m 이하의 주기로 반복되는,
 [0186] 광학 시스템을 제조하는 방법.
- [0187] 51. 실시예 50의 방법에 있어서,
 [0188] 하나 이상의 제1 나노빔들을 형성하는 단계 및 제2 나노빔들을 형성하는 단계는 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들을 리소그래피식으로 정의하는 단계를 포함하는,
 [0189] 광학 시스템을 제조하는 방법.
- [0190] 52. 실시예 50의 방법에 있어서,
 [0191] 하나 이상의 제1 나노빔들을 형성하는 단계 및 제2 나노빔들을 형성하는 단계는 나노임프린팅(nanoimprinting)에 의해 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들을 형성하는 단계를 포함하는,
 [0192] 광학 시스템을 제조하는 방법.
- [0193] 53. 실시예 50 내지 실시예 52 중 어느 한 실시예의 방법에 있어서,
 [0194] 하나 이상의 제1 나노빔들을 형성하는 단계 및 제2 나노빔들을 형성하는 단계는 동시에 수행되는,
 [0195] 광학 시스템을 제조하는 방법.
- [0196] 54. 실시예 50 내지 실시예 53 중 어느 한 실시예의 방법에 있어서,
 [0197] 하나 이상의 제1 나노빔들은 동일한 폭을 갖는,
 [0198] 광학 시스템을 제조하는 방법.
- [0199] 55. 실시예 50 내지 실시예 54 중 어느 한 실시예의 방법에 있어서,
 [0200] 각각의 유닛 셀의 제2 나노빔들은 동일한 폭을 갖는,
 [0201] 광학 시스템을 제조하는 방법.
- [0202] 56. 실시예 50 내지 실시예 55 중 어느 한 실시예의 방법에 있어서,
 [0203] 유닛 셀들은 가시 스펙트럼의 과장 이하의 주기를 갖는,
 [0204] 광학 시스템을 제조하는 방법.
- [0205] 57. 광학 시스템으로서,
 [0206] 과장을 갖는 가시 광을 회절시키도록 구성된 메타표면을 포함하고,
 [0207] 메타표면은 복수의 반복 유닛 셀들을 포함하고,
 [0208] 각각의 유닛 셀은,
 [0209] 하나 이상의 제1 나노빔들에 의해 형성된 나노빔들의 제1 세트; 및
 [0210] 하나 이상의 제1 나노빔들에 인접하게 배치되고 서브-과장 간격만큼 서로 분리되는 복수의 제2

나노빔들에 의해 형성되는 나노빔들의 제2 세트를 포함하고,

- [0211] 하나 이상의 제1 나노빔들 및 복수의 제2 나노빔들은 상이한 배향 방향으로 신장되고,
- [0212] 유닛 셀들은 파장 이하의 주기로 반복되는,
- [0213] 광학 시스템.
- [0214] 58. 실시예 57의 광학 시스템에 있어서,
- [0215] 파장의 광을 메타표면으로 방출하도록 구성된 광원을 더 포함하는,
- [0216] 광학 시스템.
- [0217] 59. 실시예 58의 광학 시스템에 있어서,
- [0218] 광원으로부터의 광을 변조하고 변조된 광을 메타표면으로 출력하도록 구성된 공간 광 변조기를 더 포함하는,
- [0219] 광학 시스템.
- [0220] 60. 실시예 57 또는 실시예 59의 광학 시스템에 있어서,
- [0221] 파장은 청색 광, 녹색 광 또는 적색 광에 대응하는,
- [0222] 광학 시스템.
- [0223] 61. 광학 시스템으로서,
- [0224] 파장을 갖는 가시 광을 회절시키도록 구성된 메타표면을 포함하고,
- [0225] 메타표면은 복수의 반복 유닛 셀들을 포함하고,
- [0226] 각각의 유닛 셀은,
- [0227] 나노빔들의 제1 세트 - 제1 나노빔들 중 둘 이상은 상이한 폭들을 가짐 - ; 및
- [0228] 나노빔들의 제2 세트를 포함하고,
- [0229] 제2 나노빔들 중 둘 이상은 상이한 폭들을 갖고, 제2 나노빔들은 제1 나노빔들에 인접하게 배치되고 서브-파장 간격만큼 서로 분리되고,
- [0230] 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들은 상이한 배향들을 갖는,
- [0231] 광학 시스템.
- [0232] 62. 실시예 61의 광학 시스템에 있어서,
- [0233] 파장의 광을 메타표면으로 방출하도록 구성된 광원을 더 포함하는,
- [0234] 광학 시스템.
- [0235] 63. 실시예 62의 광학 시스템에 있어서,
- [0236] 광원으로부터의 광을 변조하고 변조된 광을 메타표면으로 출력하도록 구성된 공간 광 변조기를 더 포함하는,
- [0237] 광학 시스템.
- [0238] 64. 실시예 61 내지 실시예 63 중 어느 한 실시예의 광학 시스템에 있어서,
- [0239] 파장은 청색 광, 녹색 광 또는 적색 광에 대응하는,
- [0240] 광학 시스템.
- [0241] 65. 실시예 61의 광학 시스템에 있어서,
- [0242] 나노빔들의 제1 세트 및 나노빔들의 제2 세트는, 메타표면이 단일 차수의 회절된 광으로 가시 광을 회절시키도록 구성되게 배열되는.
- [0243] 광학 시스템.

- [0244] 66. 실시예 61 내지 실시예 65 중 어느 한 실시예의 광학 시스템에 있어서,
 [0245] 나노빔들의 제1 세트는 각각 제1 폭 및 제2 폭을 갖는 한 쌍의 제1 나노빔들을 포함하고, 나노빔들의 제2 세트
 는 각각 제3 폭 및 제4 폭을 갖는 교번적인 제2 나노빔들을 포함하는,
 [0246] 광학 시스템.
- [0247] 67. 실시예 61 내지 실시예 66 중 어느 한 실시예의 광학 시스템에 있어서,
 [0248] 유닛 셀들은 약 10nm 내지 1 μ m 이하의 주기로 반복되는,
 [0249] 광학 시스템.
- [0250] 68. 실시예 61 내지 실시예 68 중 어느 한 실시예의 광학 시스템에 있어서,
 [0251] 유닛 셀들은 파장 이하의 주기로 반복되고, 파장은 가시 스펙트럼 내에 있는,
 [0252] 광학 시스템.
- [0253] 69. 실시예 61 내지 실시예 68 중 어느 한 실시예의 광학 시스템에 있어서,
 [0254] 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들은 나노빔들의 제1 세트에 의해 회절된 가시 광과 나노빔들의 제2 세트에 의해 회
 절된 가시 광 사이의 위상차를 야기하도록 서로에 대해 배향 각도로 배향되는,
 [0255] 광학 시스템.
- [0256] 70. 실시예 69의 광학 시스템에 있어서,
 [0257] 위상차는 각도의 2배인,
 [0258] 광학 시스템.
- [0259] 71. 실시예 69 또는 실시예 70의 광학 시스템에 있어서,
 [0260] 배향 각도는 약 90도인,
 [0261] 광학 시스템.
- [0262] 72. 실시예 61 내지 실시예 67 중 어느 한 실시예의 광학 시스템에 있어서,
 [0263] 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들은 파장보다 작은 높이를 갖는,
 [0264] 광학 시스템.
- [0265] 73. 실시예 61 내지 실시예 72 중 어느 한 실시예의 광학 시스템에 있어서,
 [0266] 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들은 벌크 굴절률이 파장에서 2.0 보다 높은 재료로 형성되는,
 [0267] 광학 시스템.
- [0268] 74. 실시예 61 내지 실시예 73 중 어느 한 실시예의 광학 시스템에 있어서,
 [0269] 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들은 반도체 재료 또는 절연 재료로 형성되는,
 [0270] 광학 시스템.
- [0271] 75. 실시예 61 내지 실시예 74 중 어느 한 실시예의 광학 시스템에 있어서,
 [0272] 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들은 티타늄 이산화물로 형성되는,
 [0273] 광학 시스템.
- [0274] 76. 실시예 61 내지 실시예 75 중 어느 한 실시예의 광학 시스템에 있어서,
 [0275] 제1 나노빔 및 제2 나노빔은 실리콘-함유 재료로 형성되는,
 [0276] 광학 시스템.
- [0277] 77. 실시예 61 내지 실시예 76 중 어느 한 실시예의 광학 시스템에 있어서,

- [0278] 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들은 단결정 실리콘, 다결정 실리콘, 비정질 실리콘, 실리콘 탄화물 및 실리콘 질화물로 구성된 그룹으로부터 선택된 재료로 형성되는,
- [0279] 광학 시스템.
- [0280] 78. 실시예 61 내지 실시예 77 중 어느 한 실시예의 광학 시스템에 있어서,
- [0281] 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들은 표면 법선 평면에 대해 50 도 보다 큰 회절 각도에서 10%보다 큰 회절 효율로 가시 광을 회절시키도록 구성되는,
- [0282] 광학 시스템.
- [0283] 79. 실시예 78의 광학 시스템에 있어서,
- [0284] 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들은 40도를 초과하는 입사각들의 범위를 갖는 입사광에 대해 회절 효율로 광을 회절시키도록 구성되는,
- [0285] 광학 시스템.
- [0286] 80. 실시예 79의 광학 시스템에 있어서,
- [0287] 표면 법선 평면은 제1 배향 방향으로 연장되는,
- [0288] 광학 시스템.
- [0289] 81. 실시예 80의 광학 시스템에 있어서,
- [0290] 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들은 투과 모드에서 광을 회절시키도록 구성되고, 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들의, 광-입사 측과 대향하는 측 상의 회절된 광의 세기는 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들의, 광-입사 측과 동일한 측 상의 회절된 광의 세기에 비해 더 큰,
- [0291] 광학 시스템.
- [0292] 82. 실시예 80의 광학 시스템에 있어서,
- [0293] 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들은 반사 모드에서 광을 회절시키도록 구성되고, 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들의, 광-입사 측과 동일한 측 상의 회절된 광의 세기는 제 1 나노빔들 및 제2 나노빔들의, 광-입사 측과 대향하는 측 상의 회절된 광의 세기에 비해 더 큰,
- [0294] 광학 시스템.
- [0295] 83. 실시예 61 내지 실시예 82 중 어느 한 실시예의 광학 시스템에 있어서,
- [0296] 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들은 기관 상에 형성되고, 벌크 굴절률이 기관의 굴절률보다 적어도 0.5만큼 더 큰 재료로 형성되는,
- [0297] 광학 시스템.
- [0298] 84. 실시예 83의 광학 시스템에 있어서,
- [0299] 기관은 1.5보다 큰 굴절률을 갖는,
- [0300] 광학 시스템.
- [0301] 85. 실시예 83 또는 실시예 84의 광학 시스템에 있어서,
- [0302] 기관은 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들에 의해 회절된 광이 내부 전반사 하에서 제2 방향으로 전파되도록 구성되는,
- [0303] 광학 시스템.
- [0304] 86. 실시예 61 내지 실시예 85 중 어느 한 실시예의 광학 시스템에 있어서,
- [0305] 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들은 실질적으로 직사각형 단면 형상을 갖는,
- [0306] 광학 시스템.

- [0307] 87. 실시예 61 내지 실시예 85 중 어느 한 실시예의 광학 시스템에 있어서,
- [0308] 제1 나노빔들은 한 쌍의 나노빔들에 바로 인접하여서, 제2 나노빔들이 제1 나노빔들의 인접한 쌍들 사이에 직접 개재되게 하는,
- [0309] 광학 시스템.
- [0310] 88. 실시예 61 내지 실시예 87 중 어느 한 실시예의 광학 시스템에 있어서,
- [0311] 가시 광을 전파시키도록 구성된 도파관을 더 포함하고,
- [0312] 메타표면이 도파관 위에 배치되고, 메타표면은, 광의 입사 방향에 대해 회절 각도로 광을 회절시켜 회절된 광이 내부 전반사 하에서 기관에서 전파되게 하도록 배열되는 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들을 포함하는,
- [0313] 광학 시스템.
- [0314] 89. 실시예 61 내지 실시예 88 중 어느 한 실시예의 광학 시스템에 있어서,
- [0315] 기관은, 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들이 형성된 재료의 벌크 굴절률보다 굴절률이 적어도 0.5 만큼 더 작은 재료로 형성되는,
- [0316] 광학 시스템.
- [0317] 90. 증강 현실 이미지 콘텐츠를 디스플레이하기 위해 사용자의 눈에 광을 프로젝팅하도록 구성된 머리-장착 디스플레이 디바이스로서,
- [0318] 사용자의 머리에 지지되도록 구성된 프레임;
- [0319] 프레임 상에 배치된 디스플레이를 포함하고,
- [0320] 디스플레이의 적어도 일부는,
- [0321] 하나 이상의 도파관들 - 하나 이상의 도파관들은 투명하며, 사용자가 머리-장착 디스플레이 디바이스를 착용할 때, 사용자의 눈 전방의 위치에 배치되어서, 투명한 부분은 광을 사용자의 눈으로 투과시켜 사용자 전방의 환경의 부분의 뷰(view)를 제공함 - ;
- [0322] 하나 이상의 광원들; 및
- [0323] 광원들로부터의 광을 하나 이상의 도파관들에 커플링하거나, 또는 하나 이상의 도파관들 밖으로 광을 커플링하도록 구성된 적어도 하나의 회절 격자를 포함하고,
- [0324] 회절 격자는 실시예 61 내지 실시예 87 중 어느 한 실시예에 따른 메타표면을 포함하는,
- [0325] 머리-장착 디스플레이 디바이스.
- [0326] 91. 실시예 90의 디스플레이 디바이스에 있어서,
- [0327] 하나 이상의 광원들은 광섬유 스캐닝 프로젝터를 포함하는,
- [0328] 머리-장착 디스플레이 디바이스.
- [0329] 92. 실시예 90 또는 실시예 91의 디스플레이 디바이스에 있어서,
- [0330] 디스플레이는 복수의 깊이 평면들의 이미지 콘텐츠를 사용자에게 제시하도록 사용자의 눈에 광을 프로젝팅하도록 구성되는,
- [0331] 머리-장착 디스플레이 디바이스.
- [0332] 93. 메타표면을 제조하는 방법으로서,
- [0333] 기관을 제공하는 단계;
- [0334] 기관 상에 복수의 유닛 셀들을 갖는 메타표면을 형성하는 단계를 포함하고,
- [0335] 메타표면을 형성하는 단계는,
- [0336] 상이한 폭들을 갖는 둘 이상의 제1 나노빔들을 포함하는 나노빔들의 제1 세트를 형성하는

단계; 및

- [0337] 상이한 폭들을 갖는 둘 이상의 제2 나노빔들을 포함하는 나노빔들의 제2 세트를 형성하는 단계를 포함하고,
- [0338] 제2 나노빔들은 제1 나노빔들에 인접하게 배치되고 서브-파장 간격만큼 서로 분리되고,
- [0339] 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들은 상이한 배향들을 갖는,
- [0340] 메타표면을 제조하는 방법.
- [0341] 94. 실시예 93의 방법에 있어서,
- [0342] 제1 나노빔들을 형성하는 단계 및 제2 나노빔들을 형성하는 단계는 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들을 리소그래피 식으로 동시에 정의하는 단계를 포함하는,
- [0343] 메타표면을 제조하는 방법.
- [0344] 95. 실시예 93의 방법에 있어서,
- [0345] 제1 나노빔들을 형성하는 단계 및 제2 나노빔들을 형성하는 단계는 나노임프린팅에 의해 제1 나노빔들 및 제2 나노빔들을 형성하는 단계를 포함하는,
- [0346] 메타표면을 제조하는 방법.
- [0347] 96. 실시예 93 내지 실시예 95 중 어느 한 실시예의 방법에 있어서,
- [0348] 제1 나노빔들을 형성하는 단계 및 제2 나노빔들을 형성하는 단계는 동시에 수행되는,
- [0349] 메타표면을 제조하는 방법.
- [0350] 97. 실시예 93 내지 실시예 96 중 어느 한 실시예의 방법에 있어서,
- [0351] 유닛 셀들은 가시 스펙트럼의 파장 이하의 주기성을 갖는,
- [0352] 메타표면을 제조하는 방법.

도면의 간단한 설명

- [0015] 도 1은 AR(augmented reality) 디바이스를 통한 AR의 사용자의 뷰를 예시한다.
- [0016] 도 2는 웨어러블 디스플레이 시스템의 예를 예시한다.
- [0017] 도 3은 사용자에게 대한 3차원 이미저리를 시뮬레이팅하기 위한 종래의 디스플레이 시스템을 예시한다.
- [0018] 도 4는 다중 깊이 평면들을 사용하여 3-차원 이미저리를 시뮬레이팅하기 위한 접근법의 양상들을 예시한다.
- [0019] 도 5a 내지 도 5c는 곡률의 반경과 초점 반경 간의 관계들을 예시한다.
- [0020] 도 6은 이미지 정보를 사용자에게 출력하기 위한 도파관 스택의 예를 예시한다.
- [0021] 도 7은 도파관에 의해 출력된 출사 빔들의 예를 예시한다.
- [0022] 도 8은 각각의 깊이 평면이 다수의 상이한 컴포넌트 컬러들을 사용하여 형성된 이미지들을 포함하는 스택된 도파관 어셈블리의 예를 예시한다.
- [0023] 도 9a는 인커플링 광학 엘리먼트를 각각 포함하는 스택된 도파관들의 세트의 예의 측 단면도를 예시한다.
- [0024] 도 9b는 도 9a의 복수의 스택된 도파관들의 예의 사시도를 예시한다.
- [0025] 도 9c는 도 9a 및 도 9b의 복수의 스택된 도파관들의 예의 하향식 평면도를 예시한다.
- [0026] 도 10a는 종래의 광학 엘리먼트의 예로서 액시콘의 단면도를 개략적으로 예시한다.
- [0027] 도 10b는 메타표면으로 형성된 광학 엘리먼트의 예로서 메타표면-기반 액시콘의 단면도를 개략적으로

예시한다.

[0028] 도 10c는 도 10b의 메타표면-기반 액시콘이 시준된 가우시안 LCP(left circularly polarized) 광빔으로 조명될 때 발생하는 투과된 빔 프로파일을 예시한다.

[0029] 도 11a는 TE(transverse electric) 편광 및 TM(orthogonal transverse magnetic) 편광을 갖는 입사광에 의한 하향식 조명 하에서 복수의 나노빔들을 포함하는 메타표면으로 형성된 예시적인 파장판을 예시한다.

[0030] 도 11b는 도 11a를 참조하여 예시된 예시적인 파장판으로부터 비롯된 시뮬레이팅된 위상 파면들을 예시한다.

[0031] 도 11c는 도 11a의 예시적인 파장판으로부터 비롯된 TE-편광된 광빔에 대한 TM-편광된 광의 시뮬레이팅된 위상 리타데이션을 예시한다.

[0032] 도 11d는 도 11c에 예시된 시뮬레이팅된 위상 리타데이션에 대응하는, 도 11a의 예시적인 파장판의 시뮬레이팅된 흡수 스펙트럼들을 예시한다.

[0033] 도 12a 내지 도 12h는 각각, 0 , $\pi/4$, $\pi/2$, $3\pi/4$, π , $5\pi/4$, $3\pi/2$ 및 $7\pi/4$ 의 각도(θ)에 의한 파장판의 고속 축들에서의 회절들에 대응하는 입사광의 편광 벡터들의 변화들을 예시한다.

[0034] 도 13a 및 도 13b는 각각, 일부 실시예들에 따라, 2-상 레벨 기하학적 위상 광학 엘리먼트들을 갖는 메타표면을 포함하는 회절 격자의 측 단면도 및 하향식 도를 예시한다.

[0035] 도 14는 도 13a 및 도 13b를 참조하여 설명된 예시적인 회절 격자에 대한 시뮬레이팅된 회절 효율 대 입사각(α)을 예시한다.

[0036] 도 15a 및 도 15b는 도 13a 및 도 13b를 참조하여 설명된 회절 격자를 통한 투과 시에 TE-편광된 광에 대한 위상 파면들의 2-차원 시뮬레이션을 예시한다.

[0037] 도 16a는 일부 실시예들에 따라, 마스크 층이 남겨진, 일부 실시예들에 따른 기하학적 위상 광학 엘리먼트들을 갖는 메타표면을 포함하는 회절 격자의 측 단면도를 예시한다.

[0038] 도 16b는 도 16a에 예시된 예시적인 회절 격자에 대한 시뮬레이팅된 회절 효율(η) 대 마스크 층의 두께를 예시한다.

[0039] 도 16c는 일부 실시예들에 따라, 남겨진 마스크 층이 20nm 두께인, 도 16a에 예시된 예시적인 회절 격자에 대한 시뮬레이팅된 회절 효율(η) 대 입사각(α)을 예시한다.

[0040] 도 16d는 일부 실시예들에 따라, 남겨진 마스크 층이 40nm 두께인, 도 16a에 예시된 예시적인 회절 격자에 대한 시뮬레이팅된 회절 효율(η) 대 입사각(α)을 예시한다.

[0041] 도 17a 및 도 17b는 각각, 일부 실시예들에 따라, TE 및 TM 편광된 녹색 광에 대해, 비정질 실리콘으로 형성된 예시적인 회절 격자에 대한 시뮬레이팅된 회절 효율(η) 대 입사각(α)을 예시한다.

[0042] 도 18은 일부 실시예들에 따라, 다결정 실리콘으로 형성되고 녹색 광을 회절시키도록 구성된 예시적인 회절 격자에 대한 시뮬레이팅된 회절 효율(η) 대 입사각(α)을 예시한다.

[0043] 도 19는 일부 실시예들에 따라, 실리콘 탄화물(SiC)로 형성되고 녹색 광을 회절시키도록 구성된 예시적인 회절 격자에 대한 시뮬레이팅된 회절 효율(η) 대 입사각(α)을 예시한다.

[0044] 도 20은 일부 실시예들에 따라, 실리콘 질화물(Si₃N₄)로 형성되고 녹색 광을 회절시키도록 구성된 예시적인 회절 격자에 대한 시뮬레이팅된 회절 효율(η) 대 입사각(α)을 예시한다.

[0045] 도 21은 일부 실시예들에 따라, 다결정 실리콘으로 형성되고 청색 광을 회절시키도록 구성된 예시적인 회절 격자에 대한 시뮬레이팅된 회절 효율(η) 대 입사각(α)을 예시한다.

[0046] 도 22는 일부 실시예들에 따라, 비정질 실리콘으로 형성되고 청색 광을 회절시키도록 구성된 예시적인 회절 격자에 대한 시뮬레이팅된 회절 효율(η) 대 입사각(α)을 예시한다.

[0047] 도 23은 일부 실시예들에 따라, 실리콘 탄화물(SiC)로 형성되고 청색 광을 회절시키도록 구성된 예시적인 회절 격자에 대한 시뮬레이팅된 회절 효율(η) 대 입사각(α)을 예시한다.

[0048] 도 24는 일부 실시예들에 따라, 실리콘 질화물(Si_3N_4)로 형성되고 청색 광을 회절시키도록 구성된 예시적인 회절 격자에 대한 시뮬레이션된 회절 효율(η) 대 입사각(α)을 예시한다.

[0049] 도 25는 일부 실시예들에 따라, 4-상 레벨 기하학적 위상 광학 엘리먼트들을 갖는 메타표면을 포함하는 회절 격자의 하향식 도를 예시한다.

[0050] 도 26은 일부 실시예들에 따라, 반사 모드에서 회절되도록 구성되는, 기하학적 위상 광학 엘리먼트들을 갖는 메타표면을 포함하는 회절 격자의 단면도를 예시한다.

[0051] 도 27은 도 26에서 예시된 예시적인 회절 격자에 대한 시뮬레이션된 회절 효율(η) 대 입사각(α)을 예시한다.

[0052] 도 28a 내지 도 28d는 일부 실시예들에 따라, 기하학적 위상 광학 엘리먼트들을 갖는 메타표면을 포함하는 회절 격자의 다양한 제조 스테이지들에서의 중간 구조들의 단면도들이다.

[0053] 도 29a 내지 도 29d는 일부 다른 실시예들에 따라, 기하학적 위상 광학 엘리먼트들을 갖는 메타표면을 포함하는 회절 격자의 다양한 제조 스테이지들에서의 중간 구조들의 단면도들이다.

[0054] 도 30a 및 도 30b는 각각, 일부 실시예들에 따라, 2-상 레벨의 비대칭 기하학적 위상 광학 엘리먼트들을 갖는 메타표면을 포함하는 회절 격자의 측 단면도 및 하향식 도를 예시한다.

[0055] 도 31a 및 도 31b는 각각, 일부 실시예들에 따라, TE 및 TM 편광된 녹색 광에 대해, 다결정 실리콘으로 형성된 예시적인 회절 격자에 대한 시뮬레이션된 회절 효율(η) 대 입사각(α)을 예시한다.

[0056] 도 32a 및 도 32b는 각각, 일부 실시예들에 따라, TE 및 TM 편광된 녹색 광에 대해, 비정질 실리콘으로 형성된 예시적인 회절 격자에 대한 시뮬레이션된 회절 효율(η) 대 입사각(α)을 예시한다.

[0057] 도 33a 및 도 33b는 각각, 일부 실시예들에 따라, TE 및 TM 편광된 녹색 광에 대해, 비정질 실리콘으로 형성된 예시적인 회절 격자에 대한 시뮬레이션된 회절 효율(η) 대 입사각(α)을 예시한다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0354] [0058] 디스플레이 시스템들과 같은 광학 시스템들은 종종, 광의 전파를 제어하기 위해 광학 엘리먼트들을 활용한다. 일부 애플리케이션들에서, 콤팩트한 광학 시스템들에 대한 요구로 인해, 종래의 광학 엘리먼트들은 더 이상 적합하지 않을 수 있다.

[0355] [0059] 메타표면들인 메타물질 표면(metamaterial surface)들은 기하학적 광학기에 비교하면, 훨씬 더 작은 스케일로 사실상 평평하고 수차가 없는(aberration-free) 광학기를 실현할 기회들을 제공한다. 이론에 의해 제한됨 없이, 일부 실시예들에서, 메타표면들은 공명 광학 안테나들로서 기능하는 표면 구조들의 조밀한 어레이인 것들을 포함한다. 광-표면 구조 상호작용의 공명 성질은 광학 파면들을 조작하는 능력을 제공한다. 일부 경우들에서, 메타표면들은 부피가 크거나 제조하기 어려운 광학 컴포넌트들을, 단순한 패터닝 프로세스들에 의해 형성된 얇고 비교적 평면의 엘리먼트들로 대체할 수 있게 한다.

[0356] [0060] 일부 실시예들에서, 회절 격자들을 형성하기 위한 메타표면들이 개시된다. 메타표면들은 복수의 반복 유닛 셀들에 의해 형성된 격자의 형태를 취할 수 있다. 각각의 유닛 셀은 교차 방향으로 신장되는 나노빔들의 2개 이상의 세트들 즉, 제1 방향으로 신장되는 하나 이상의 제1 나노빔들 및 제1 방향과 상이한 제2 방향으로 신장되는 복수의 제2 나노빔들을 포함할 수 있다. 예컨대, 하향식 도에서 볼 때, 제1 방향은 일반적으로 y-축을 따를 수 있고, 제2 방향은 일반적으로 x-축을 따를 수 있다. 일부 실시예들에서, 유닛 셀들은 나노빔들의 4개의 세트들 즉 제1 방향으로 신장되는 하나 이상의 제1 나노빔들, 제2 방향으로 신장되는 복수의 제2 나노빔들, 제3 방향으로 신장되는 복수의 제3 나노빔들, 제4 방향으로 신장되는 복수의 제4 나노빔들을 포함할 수 있다. 예로서, 제1 및 제2 방향들은 서로에 대해 제1 각도(예컨대, 90°)를 형성할 수 있고, 제1 및 제3 방향들 및 제1 및 제4 방향들은 서로에 대해 대각을 형성할 수 있다. 일부 실시예들에서, 메타표면들은 (다수의 제1 나노빔들이 존재하는 경우) 제1 나노빔들 각각이 동일한 폭을 갖는다는 점에서 대칭적일 수 있다. 일부 다른 실시예들에서, 메타표면들은 (다수의 제1 나노빔들이 존재하는 경우) 유닛 셀 내의 제1 나노빔들 중 적어도 하나가 제1 나노빔들 중 다른 적어도 하나와 상이한 폭을 갖는다는 점에서 비대칭인 것으로 설명될 수 있다. 일부 실시예들에서, 대칭 또는 비대칭 메타표면들의 유닛 셀들은, 10nm 내지 500nm 또는 300nm 내지 500nm를 포함하는 10nm 내지 $1\mu\text{m}$ 범위의 주기성을 가지며, 메타표면이 회절시키도록 구성되는, 또는 예컨대, 도파관으로의 인커플링 또는 도파관으로부터의 아웃커플링을 위해 메타표면으로 지향되는 광의 파장들보다 작을 수 있다. 유

리하계는, 본원에서 개시된 메타표면들은 원형 편광을 갖는 입사광에 대해 그리고 넓은 범위의 입사각들에 걸쳐 높은 회절 각도들 및 높은 회절 효율들을 갖는 광의 회절을 제공하는 것으로 밝혀졌다. 특히, 일부 실시예들에서, 비대칭 메타표면들은 회절된 광을 복수의 회절 차수들 중 하나로 스티어링(steer)하면서 복수의 회절 차수들 중 다른 것(들)을 감소시킬 수 있다. 또한, 일부 실시예들에서, 메타표면들은 높은 파장 선택성으로 광을 회절시킨다.

[0357] [0061] 일부 실시예들에서, 메타표면들은 콤팩트한 광학 엘리먼트들을 제공하기 위해 웨어러블 디스플레이 시스템들에서 활용될 수 있다. AR 시스템들은 사용자가 자신 주위의 세계를 계속해서 볼 수 있게 하면서, 가상 콘텐츠를 사용자 또는 뷰어에 디스플레이할 수 있다. 바람직하게는, 이 콘텐츠는 사용자의 눈에 이미지 정보를 프로젝팅하는, 예컨대, 안경류의 부분으로서 머리-장착 디스플레이 상에 디스플레이된다. 게다가, 디스플레이는 또한 주변 환경의 뷰를 허용하기 위해 주변 환경으로부터 사용자의 눈으로 광을 투과시킬 수 있다. 본원에서 사용되는 바와 같이, "머리-장착" 디스플레이는 뷰어의 머리 상에 장착될 수 있는 디스플레이라는 것이 인지될 것이다.

[0358] [0062] 이제 유사한 참조 번호들이 전반에 걸쳐 유사한 부분들을 지칭하는 도면들에 대한 참조가 이루어질 것이다.

[0359] **예시적인 디스플레이 시스템들**

[0360] [0019] 도 2는 웨어러블 디스플레이 시스템(60)의 예를 예시한다. 디스플레이 시스템(60)은 디스플레이(70), 및 그 디스플레이(70)의 기능을 지원하기 위한 다양한 기계 및 전자 모듈들 및 시스템들을 포함한다. 디스플레이(70)는, 디스플레이 시스템 사용자 또는 뷰어(90)에 의해 착용 가능하고 사용자(90)의 눈들의 전방에 디스플레이(70)를 포지셔닝하도록 구성된 프레임(80)에 커플링될 수 있다. 디스플레이(70)는 일부 실시예들에서, 안경류(eyewear)로 고려될 수 있다. 부 실시예들에서, 스피커(100)는 프레임(80)에 커플링되고 사용자(90)의 외이도에 인접하게 포지셔닝되도록 구성된다(일부 실시예들에서, 도시되지 않은 다른 스피커가 선택적으로, 사용자의 다른 외이도에 인접하게 포지셔닝되어 스테레오/형상화 가능(shapeable) 사운드 제어를 제공할 수 있음). 디스플레이 시스템은 또한 하나 이상의 마이크로폰들(110) 또는 사운드를 검출하기 위한 다른 디바이스들을 포함할 수 있다. 일부 실시예들에서, 마이크로폰은 사용자가 시스템(60)에 입력들 또는 커맨드들(예컨대, 음성 메뉴 커맨드들의 선택, 자연어 질문 등)을 제공할 수 있도록 구성되고, 그리고/또는 다른 사람들(예컨대, 유사한 디스플레이 시스템들의 다른 사용자들)과의 오디오 통신을 허용할 수 있다. 마이크로폰은 또한, 오디오 데이터(예컨대, 사용자 및/또는 환경으로부터의 사운드들)를 수집하기 위한 주변 센서로서 구성될 수 있다. 일부 실시예들에서, 디스플레이 시스템은 또한, 프레임(80)과 별개이고 사용자(90)의 신체(예컨대, 사용자(90)의 머리, 몸통, 손발(extremity) 등)에 부착될 수 있는 주변 센서(120a)를 포함할 수 있다. 주변 센서(120a)는 일부 실시예들에서, 사용자(90)의 생리적 상태를 특징화하는 데이터를 취득하도록 구성될 수 있다. 예컨대, 센서(120a)는 전극일 수 있다.

[0361] [0020] 도 2를 계속 참조하면, 디스플레이(70)는, 다양한 구성들로 장착될 수 있는, 예컨대, 프레임(80)에 고정적으로 부착되거나, 사용자에게 의해 착용된 헬멧 또는 모자에 고정적으로 부착되거나, 헤드폰들에 임베딩되거나, 그렇지 않으면 사용자(90)에게 제거 가능하게 부착되는(예컨대, 백팩(backpack)-스타일 구성으로, 벨트-커플링 스타일 구성으로) 로컬 데이터 프로세싱 모듈(140)에 통신 링크(130)에 의해, 예컨대, 유선 리드 또는 무선 연결성에 의해, 동작 가능하게 커플링된다. 유사하게, 센서(120a)는 통신 링크(120b), 예컨대, 유선 리드 또는 무선 연결성에 의해 로컬 프로세서 및 데이터 모듈(140)에 동작 가능하게 커플링될 수 있다. 로컬 프로세싱 및 데이터 모듈(140)은 하드웨어 프로세서뿐 아니라, 디지털 메모리 예컨대, 비-휘발성 메모리(예컨대, 플래시 메모리 또는 하드 디스크 드라이브들)를 포함할 수 있고, 이 둘 모두는 데이터의 프로세싱, 캐싱(caching) 및 저장을 보조하기 위해 활용될 수 있다. 데이터는 a) 센서들(예컨대 프레임(80)에 동작 가능하게 커플링되거나 그렇지 않으면 사용자(90)에게 부착될 수 있음), 예컨대, 이미지 캡처 디바이스들(예컨대, 카메라들), 마이크로폰들, 관성 측정 유닛들, 가속도계들, 컴퍼스(compass)들, GPS 유닛들, 라디오 디바이스들, 자이로(gyro)들 및/또는 본원에서 개시된 다른 센서들로부터 캡처되고; 및/또는 b) 원격 프로세싱 모듈(150) 및/또는 원격 데이터 리포지토리(repository)(160)(가상 콘텐츠에 관련된 데이터를 포함함)를 사용하여 취득 및/또는 프로세싱되는(어쨌든, 이러한 프로세싱 또는 리트리벌(retrieval) 후 디스플레이(70)에 전달하기 위한) 데이터를 포함한다. 로컬 프로세싱 및 데이터 모듈(140)은 통신 링크들(170, 180)에 의해, 예컨대, 유선 또는 무선 통신 링크들을 통하여, 원격 프로세싱 모듈(150) 및 원격 데이터 리포지토리(160)에 동작 가능하게 커플링될 수 있어서, 이들 원격 모듈들(150, 160)은 서로 동작 가능하게 커플링되고 로컬 프로세싱 및 데이터 모듈(140)에 대한 자원들로서 이용 가능하다. 일부 실시예들에서, 로컬 프로세싱 및 데이터 모듈(140)은 이미지 캡처 디바이스들, 마

이크로폰들, 관성 측정 유닛들, 가속도계들, 컴퍼스들, GPS 유닛들, 라디오 디바이스들 및/또는 자이로들 중 하나 이상을 포함할 수 있다. 일부 다른 실시예들에서, 이들 센서들 중 하나 이상은 프레임(80)에 부착될 수 있거나, 또는 유선 또는 무선 통신 통로들에 의해 로컬 프로세싱 및 데이터 모듈(140)과 통신하는 자립형 구조들일 수 있다.

[0362] [0021] 도 2를 계속 참조하면, 일부 실시예들에서, 원격 프로세싱 모듈(150)은 데이터 및/또는 이미지 정보를 분석 및 프로세싱하도록 구성된 하나 이상의 프로세서들을 포함할 수 있다. 일부 실시예들에서, 원격 데이터 리포지토리(160)는 "클라우드" 자원 구성에서 인터넷 또는 다른 네트워킹 구성을 통하여 이용 가능할 수 있는 디지털 데이터 저장 설비를 포함할 수 있다. 일부 실시예들에서, 원격 데이터 리포지토리(160)는 정보, 예컨대, 증강 현실 콘텐츠를 생성하기 위한 정보를 로컬 프로세싱 및 데이터 모듈(140) 및/또는 원격 프로세싱 모듈(150)에 제공하는 하나 이상의 원격 서버들을 포함할 수 있다. 일부 실시예들에서, 모든 데이터는 저장되고 모든 컴퓨테이션들은 로컬 프로세싱 및 데이터 모듈에서 수행되어, 원격 모듈로부터 완전히 자율적인 사용을 허용한다.

[0363] [0022] 이제 도 3을 참조하면, "3-차원" 또는 "3-D"로서 이미지의 지각은 뷰어의 각각의 눈에 이미지의 약간 상이한 프리젠테이션들을 제공함으로써 달성될 수 있다. 도 3은 사용자에게 대한 3차원 이미저리를 시물레이팅하기 위한 종래의 디스플레이 시스템을 예시한다. 2개의 별개의 이미지들(190 및 200)(각각의 눈(210 및 220)에 대해 하나씩)이 사용자에게 출력된다. 이미지들(190, 200)은 뷰어의 시선과 평행한 광학 또는 z-축을 따라 거리(230) 만큼 눈들(210, 220)로부터 이격된다. 이미지들(190, 200)은 평평하고, 눈들(210, 220)은 단일 원근 조절된 상태를 취함으로써 이미지들에 포커싱될 수 있다. 그러한 3-D 디스플레이 시스템들은 조합된 이미지에 대한 스케일 및/또는 깊이의 지각을 제공하기 위하여 이미지들(190, 200)을 조합하는데 인간 시각 시스템에 의존한다.

[0364] [0023] 그러나, 인간 시각 시스템은 더 복잡하고 현실적인 깊이의 지각을 제공하는 것이 더 어렵다는 것이 인지될 것이다. 예컨대, 종래의 3-D 디스플레이 시스템들의 많은 뷰어들은 그런 시스템들이 불편하다는 것을 발견하거나, 깊이감을 전혀 지각하지 못할 수 있다. 이론에 의해 제한됨이 없이, 객체의 뷰어들은 이접운동 및 원근조절의 조합으로 인해 객체를 3-차원인 것으로 지각할 수 있다고 여겨진다. 서로에 대한 두 눈들의 이접운동(vergence) 움직임들(즉, 동공들이 객체를 응시하기 위해 눈들의 시선들을 수렴하도록 서로를 향해 또는 서로 멀어지게 움직이도록 하는 눈들의 회전)은 눈들의 동공들 및 렌즈들의 포커싱(또는 원근조절)과 밀접하게 연관된다. 정상 조건들하에서, 하나의 객체로부터 상이한 거리에 있는 다른 객체로 포커스를 변화시키기 위하여, 눈들의 렌즈들의 포커스를 변화시키거나, 또는 눈들을 원근조절하는 것은 "원근조절-이접운동 반사(accommodation-vergence reflex)"로서 알려진 관계하에서, 동일한 거리에 대한 이접운동에서의 매칭하는 변화는 물론 동공 팽창 및 수축을 자동으로 유발할 것이다. 마찬가지로, 이접운동에서의 변경은 정상 조건들하에서, 렌즈 형상 및 동공 사이즈의, 원근조절에서의 매칭하는 변경을 트리거할 것이다. 본원에서 언급되는 바와 같이, 다수의 입체 또는 "3-D" 디스플레이 시스템들은, 3-차원 관점이 인간 시각 시스템에 의해 지각 되도록 각각의 눈에 약간 상이한 프리젠테이션들(그리고 따라서, 약간 상이한 이미지들)을 사용하여 장면을 디스플레이한다. 그러나, 그러한 시스템들은 많은 뷰어들에게 불편한데, 그 이유는 다른 것들 중에서, 그러한 시스템들이 단순히 장면의 상이한 프리젠테이션들을 제공하지만, 눈들이 단일 원근조절된 상태에서 모든 이미지 정보를 보고, 그리고 원근조절-이접운동 반사에 반하여 작동하기 때문이다. 원근조절과 이접운동 사이의 더 양호한 매칭을 제공하는 디스플레이 시스템들은 3-차원 이미저리의 더 현실적이고 편안한 시물레이션들을 형성할 수 있다.

[0365] [0024] 도 4는 다중 깊이 평면들을 사용하여 3-차원 이미저리를 시물레이팅하기 위한 접근법의 양상들을 예시한다. 도 4를 참조하면, z-축 상에서 눈들(210, 220)로부터 다양한 거리들에 있는 객체들은, 이들 객체들이 포커싱이 맞도록(in focus) 눈들(210 및 220)에 의해 원근조절된다. 눈들(210, 220)은 z-축을 따라 상이한 거리들에 있는 객체들에 포커싱을 맞추게 하는 특정 원근조절된 상태들을 가정한다. 결과적으로, 특정 원근조절된 상태는 연관된 초점 거리를 갖는, 깊이 평면들(240) 중 특정한 하나의 깊이 평면과 연관되는 것으로 말해질 수 있어서, 특정 깊이 평면의 객체들 또는 객체들의 부분들은, 눈이 해당 깊이 평면에 대해 원근조절된 상태에 있을 때 포커싱이 맞게 된다. 일부 실시예들에서, 3-차원 이미저리는 눈들(210, 220) 각각에 대해 이미지의 상이한 프리젠테이션들을 제공함으로써, 그리고 또한 깊이 평면들 각각에 대응하는 이미지의 상이한 프리젠테이션들을 제공함으로써 시물레이팅될 수 있다. 예시의 명확성을 위해 별개인 것으로 도시되지만, 눈들(210, 220)의 시야들은 예컨대, z-축을 따른 거리가 증가함에 따라 겹쳐질 수 있다는 것이 인지될 것이다. 게다가, 예시의 용이함을 위해 평평한 것으로 도시되지만, 깊이 평면의 윤곽들은 물리적 공간에서 만곡될 수 있어서, 깊이 평면

의 모든 피쳐들은 특정 원근조절된 상태에서 눈과 포커싱이 맞게 된다는 것이 인지될 것이다.

[0366] [0025] 객체와 눈(210 또는 220) 간의 거리는 또한, 그 눈으로 볼 때, 그 객체로부터 광의 발산(divergence)의 양을 변화시킬 수 있다. 도 5a 내지 도 5c는 광선들의 거리와 발산 간의 관계들을 예시한다. 객체와 눈(210) 간의 거리는, 거리가 감소하는 순서로 R1, R2 및 R3에 의해 표현된다. 도 5a 내지 도 5c에 도시된 바와 같이, 광선들은, 객체에 대한 거리가 감소함에 따라 더 많이 발산하게 된다. 거리가 증가함에 따라, 광선들은 더욱 시준된다. 다른 말로 하면, 포인트(객체 또는 객체의 부분)에 의해 생성된 광 필드가 구체 파면 곡률을 가지는 것으로 말해질 수 있고, 구체 파면 곡률은, 포인트가 사용자의 눈으로부터 얼마나 멀리 떨어져 있는지의 함수이다. 곡률은 객체와 눈(210) 간의 거리가 감소함에 따라 증가한다. 결과적으로, 상이한 깊이 평면들에서, 광선들의 발산 정도는 또한 상이하고, 발산 정도는, 깊이 평면들과 뷰어의 눈(210) 간의 거리가 감소함에 따라 증가한다. 단지 하나의 눈(210)이 도 5a 내지 도 5c 및 본원의 다른 도면들에서 예시의 명확성을 위해 예시되지만, 눈(210)에 대한 논의들이 뷰어의 양쪽 눈들(210 및 220)에 적용될 수 있다는 것이 인지될 것이다.

[0367] [0026] 이론에 의해 제한됨이 없이, 인간 눈이 통상적으로 깊이 지각을 제공하기 위하여 유한 수의 깊이 평면들을 해석할 수 있다고 여겨진다. 결과적으로, 지각된 깊이의 매우 그럴듯한 시뮬레이션은, 눈에, 이들 제한된 수의 깊이 평면들 각각에 대응하는 이미지의 상이한 프리젠테이션들을 제공함으로써 달성될 수 있다. 상이한 프리젠테이션들이 뷰어의 눈들에 의해 별개로 포커싱될 수 있고, 그리하여, 상이한 깊이 평면 상에 로케이팅되는 장면에 대한 상이한 이미지 피쳐들에 포커스를 맞추도록 요구되는 눈의 원근조절에 기초하여 그리고/또는 상이한 깊이 평면들 상의 상이한 이미지 피쳐들이 아웃 포커스(out of focus)되는 것을 관찰하는 것에 기초하여 깊이 단서들을 사용자에게 제공하는 것을 돕는다.

[0368] [0027] 도 6은 이미지 정보를 사용자에게 출력하기 위한 도파관 스택의 예를 예시한다. 디스플레이 시스템(250)은 복수의 도파관들(270, 280, 290, 300, 310)을 사용하여 3-차원 지각을 눈/뇌에 제공하기 위하여 활용될 수 있는 도파관들의 스택, 또는 스택된 도파관 어셈블리(260)를 포함한다. 일부 실시예들에서, 디스플레이 시스템(250)은 도 2의 시스템(60)이고, 도 6은 그 시스템(60)의 일부 부분들을 더 상세히 개략적으로 보여준다. 예컨대, 도파관 어셈블리(260)는 도 2의 디스플레이(70)의 부분일 수 있다. 디스플레이 시스템(250)은 일부 실시예들에서 광 필드(light field) 디스플레이로서 간주될 수 있다는 것이 인지될 것이다.

[0369] [0028] 도 6을 계속 참조하면, 도파관 어셈블리(260)는 또한 도파관들 사이에 복수의 피쳐들(320, 330, 340, 350)을 포함할 수 있다. 일부 실시예들에서, 피쳐들(320, 330, 340, 350)은 하나 이상의 렌즈들일 수 있다. 도파관들(270, 280, 290, 300, 310) 및/또는 복수의 렌즈들(320, 330, 340, 350)은 다양한 레벨들의 파면 곡률 또는 광선 발산으로 이미지 정보를 눈에 전송하도록 구성될 수 있다. 각각의 도파관 레벨은 특정 깊이 평면과 연관될 수 있고 그 깊이 평면에 대응하는 이미지 정보를 출력하도록 구성될 수 있다. 이미지 주입 디바이스들(360, 370, 380, 390, 400)은 도파관들에 대한 광의 소스로서 기능할 수 있고, 이미지 정보를 도파관들(270, 280, 290, 300, 310)에 주입하기 위하여 활용될 수 있으며, 도파관들 각각은, 본원에 설명된 바와 같이, 눈(210)을 향하여 출력하기 위해 각각의 개별 도파관에 걸쳐 인입 광을 분산시키도록 구성될 수 있다. 광은 이미지 주입 디바이스들(360, 370, 380, 390, 400)의 출력 표면(410, 420, 430, 440, 450)을 나가고 도파관들(270, 280, 290, 300, 310)의 대응하는 입력 표면(460, 470, 480, 490, 500)에 주입된다. 일부 실시예들에서, 입력 표면들(460, 470, 480, 490, 500) 각각은 대응하는 도파관의 예지일 수 있거나, 또는 대응하는 도파관의 주 표면의 일부일 수 있다 (즉, 도파관 표면들 중 하나는 직접적으로 세계(510) 또는 뷰어의 눈(210)을 향함). 일부 실시예들에서, 단일 광빔(예컨대, 시준된 빔)은 특정 도파관과 연관된 깊이 평면에 대응하는 특정 각도들(및 발산의 양들)로 눈(210)을 향하여 지향되는 시준된 클론 빔(cloned collimated beam)들의 전체 필드를 출력하기 위하여 각각의 도파관으로 주입될 수 있다. 일부 실시예들에서, 이미지 주입 디바이스들(360, 370, 380, 390, 400) 중 단 하나의 이미지 주입 디바이스가 복수(예컨대, 3개)의 도파관들(270, 280, 290, 300, 310)과 연관되고 그에 광을 주입할 수 있다.

[0370] [0029] 일부 실시예들에서, 이미지 주입 디바이스들(360, 370, 380, 390, 400)은 각각 대응하는 도파관(270, 280, 290, 300, 310)에 주입을 위한 이미지 정보를 각각 생성하는 이산 디스플레이들이다. 일부 다른 실시예들에서, 이미지 주입 디바이스들(360, 370, 380, 390, 400)은 예컨대, 이미지 정보를 하나 이상의 광학 도관들(예컨대, 광섬유 케이블들)을 통하여 이미지 주입 디바이스들(360, 370, 380, 390, 400) 각각에 파이핑(pipe)할 수 있는 단일 멀티플렉싱된 디스플레이의 출력 단부들이다. 이미지 주입 디바이스들(360, 370, 380, 390, 400)에 의해 제공되는 이미지 정보는 상이한 파장들 또는 컬러들(예컨대, 본원에서 논의된 바와 같이 상이한 컴포넌트 컬러들)의 광을 포함할 수 있다는 것이 인지될 것이다.

- [0371] [0030] 일부 실시예들에서, 도파관들(270, 280, 290, 300, 310)로 주입된 광은 LED(light emitting diode)와 같은 광 이미터를 포함할 수 있는 광 모듈(530)을 포함하는 광 프로젝터 시스템(520)에 의해 제공된다. 광 모듈(530)로부터의 광은 빔 분할기(550)를 통해 광 변조기(540), 예컨대, 공간 광 변조기에 지향되고 그에 의해 수정될 수 있다. 광 변조기(540)는 도파관들(270, 280, 290, 300, 310) 내로 주입되는 광의 지각된 세기를 변화시키도록 구성될 수 있다. 공간 광 변조기들의 예들은, LCOS(liquid crystal on silicon) 디스플레이들을 포함하는 LCD(liquid crystal display)들을 포함한다.
- [0372] [0031] 일부 실시예들에서, 디스플레이 시스템(250)은 광을 다양한 패턴들(예컨대, 래스터 스캔, 나선형 스캔, 리사주(Lissajous) 패턴 등)로 하나 이상의 도파관들(270, 280, 290, 300, 310) 내로 그리고 궁극적으로 뷰어의 눈(210)으로 프로젝팅하도록 구성된 하나 이상의 스캐닝 섬유들을 포함하는 스캐닝 섬유 디스플레이일 수 있다. 일부 실시예들에서, 예시된 이미지 주입 디바이스들(360, 370, 380, 390, 400)은 하나 또는 복수의 도파관들(270, 280, 290, 300, 310) 내로 광을 주입하도록 구성된 단일 스캐닝 섬유 또는 스캐닝 섬유들의 번들(bundle)을 개략적으로 표현할 수 있다. 일부 다른 실시예들에서, 예시된 이미지 주입 디바이스들(360, 370, 380, 390, 400)은 복수의 스캐닝 섬유들 또는 스캐닝 섬유들의 복수의 번들들을 개략적으로 표현할 수 있으며, 이들 각각은 도파관들(270, 280, 290, 300, 310) 중 연관된 하나 내로 광을 주입하도록 구성된다. 하나 이상의 광섬유들이 광 모듈(530)로부터 하나 이상의 도파관들(270, 280, 290, 300, 310)로 광을 송신하도록 구성될 수 있다는 것이 인지될 것이다. 예컨대, 스캐닝 섬유를 빠져나가는 광을 하나 이상의 도파관들(270, 280, 290, 300, 310)로 재지향시키도록, 스캐닝 섬유 또는 섬유들과 하나 이상의 도파관들(270, 280, 290, 300, 310) 사이에 하나 이상의 개재된 광학 구조들이 제공될 수 있다는 것이 인지될 것이다.
- [0373] [0032] 제어기(560)는 이미지 주입 디바이스들(360, 370, 380, 390, 400), 광원(530) 및 광 변조기(540)의 동작을 포함한, 스택된 도파관 어셈블리(260)의 하나 이상의 도파관들의 동작을 제어한다. 일부 실시예들에서, 제어기(560)는 로컬 데이터 프로세싱 모듈(140)의 부분이다. 제어기(560)는 예컨대, 본원에 개시된 다양한 방식들 중 임의의 방식에 따라 도파관들(270, 280, 290, 300, 310)에 대한 이미지 정보의 타이밍 및 제공을 조절하는 프로그래밍(예컨대, 비-일시적 매체의 명령들)을 포함한다. 일부 실시예들에서, 제어기는 단일 통합 디바이스, 또는 유선 또는 무선 통신 채널들에 의해 연결되는 분산 시스템일 수 있다. 제어기(560)는 일부 실시예들에서, 프로세싱 모듈들(140 또는 150)(도 2)의 부분일 수 있다.
- [0374] [0033] 도 6을 계속 참조하면, 도파관들(270, 280, 290, 300, 310)은 TIR(total internal reflection)에 의해 각각의 개별 도파관 내에서 광을 전파시키도록 구성될 수 있다. 도파관들(270, 280, 290, 300, 310)은 각각 평면형이거나 다른 형상(예컨대, 곡선)을 가질 수 있으며, 주 최상부 및 최하부 표면들 및 이들 주 최상부와 최하부 표면들 사이에서 연장되는 에지들을 갖는다. 예시된 구성에서, 도파관들(270, 280, 290, 300, 310)은 이미지 정보를 눈(210)에 출력하기 위해 각각의 개별 도파관 내에서 전파되는 광을 도파관 밖으로 재지향시킴으로써 도파관 밖으로 광을 추출하도록 구성된 아웃커플링 광학 엘리먼트들(570, 580, 590, 600, 610)을 각각 포함할 수 있다. 추출된 광은 아웃-커플링된 광으로서 또한 지칭될 수 있고, 아웃-커플링 광학 엘리먼트들은 또한 광 추출 광학 엘리먼트들로서 지칭될 수 있다. 추출된 광빔은, 도파관 내에서 전파되는 광이 광 추출 광학 엘리먼트에 부딪치는 위치들에서 도파관에 의해 출력될 수 있다. 아웃-커플링 광학 엘리먼트들(570, 580, 590, 600, 610)은 예컨대, 본원에서 추가로 논의되는 바와 같이, 회절성 광학 피쳐들을 포함하는 격자들일 수 있다. 설명의 용이함 및 도면 명확성을 위하여 도파관들(270, 280, 290, 300, 310)의 최하부 주 표면들에 배치된 것으로 예시되지만, 일부 실시예들에서, 아웃커플링 광학 엘리먼트들(570, 580, 590, 600, 610)은 본원에서 추가로 논의되는 바와 같이, 최상부 및/또는 최하부 주 표면들에 배치될 수 있고, 그리고/또는 도파관들(270, 280, 290, 300, 310)의 볼륨에 직접 배치될 수 있다. 일부 실시예들에서, 아웃-커플링 광학 엘리먼트들(570, 580, 590, 600, 610)은 도파관들(270, 280, 290, 300, 310)을 형성하기 위해 투명 기판에 부착된 재료 층에 형성될 수 있다. 일부 다른 실시예들에서, 도파관들(270, 280, 290, 300, 310)은 재료의 모놀리식 피스(piece)일 수 있고 아웃-커플링 광학 엘리먼트들(570, 580, 590, 600, 610)은 재료의 해당 피스의 표면 상에 그리고/또는 그 내부에 형성될 수 있다.
- [0375] [0034] 도 6을 계속 참조하면, 본원에 논의된 바와 같이, 각각의 도파관(270, 280, 290, 300, 310)은 특정 깊이 평면에 대응하는 이미지를 형성하기 위해 광을 출력하도록 구성된다. 예컨대, 눈에 가장 가까운 도파관(270)은, (그러한 도파관(270)에 주입된) 시준된 광을 눈(210)에 전달하도록 구성될 수 있다. 시준된 광은 광학 무한대 초점 평면을 나타낼 수 있다. 위의 다음 도파관(280)은, 시준된 광이 눈(210)에 도달할 수 있기 전에 제1 렌즈(350)(예컨대, 네거티브 렌즈)를 통과하는 시준된 광을 전송하도록 구성될 수 있고; 그러한 제1 렌즈(350)는 약간 볼록한 파면 곡률을 생성하도록 구성될 수 있어서, 눈/뇌는 위의 다음 도파관(280)으로부터 오

는 광을, 광학적 무한대로부터 눈(210)을 향하여 안쪽으로 더 가까운 제1 초점 평면으로부터 오는 것으로 해석한다. 유사하게, 위의 제3 도파관(290)은 자신의 출력 광을 눈(210)에 도달하기 전에 제1 (350) 및 제2 (340) 렌즈들 둘 모두를 통과시키고; 제1 (350) 및 제2 (340) 렌즈들의 조합된 광학 파워(optical power)는 다른 증분 양의 파면 곡률을 생성하도록 구성될 수 있어서, 눈/뇌는 제3 도파관(290)으로부터 오는 광을, 위의 다음 도파관(280)으로부터의 광보다는 광학적 무한대로부터 사람을 향하여 안쪽으로 훨씬 더 가까운 제2 초점 평면으로부터 오는 것으로 해석한다.

[0376] [0035] 다른 도파관 층들(300, 310) 및 렌즈들(330, 320)은 유사하게 구성되는데, 스택에서 가장 높은 도파관(310)은 자신의 출력을, 사람과 가장 가까운 초점 평면을 나타내는 어그리게이트 초점 전력에 대해 자신과 눈 사이의 렌즈들 모두를 통하여 전송한다. 스택된 도파관 어셈블리(260)의 다른 측 상에서 세계(510)로부터 오는 광을 보거나/해석할 때 렌즈들(320, 330, 340, 350)의 스택을 보상하기 위하여, 보상 렌즈 층(620)은 아래의 렌즈 스택(320, 330, 340, 350)의 어그리게이트 전력을 보상하기 위하여 스택의 최상부에 배치될 수 있다. 이러한 구성은 이용 가능한 도파관/렌즈 쌍들이 존재하는 만큼 많은 지각된 초점 평면들을 제공한다. 도파관들의 아웃-커플링 광학 엘리먼트들 및 렌즈들의 포커싱 양상들 둘 모두는 정적(즉, 동적이거나 전자-활성이지 않음)일 수 있다. 일부 대안적인 실시예들에서, 어느 하나 또는 둘 모두는 전자-활성 피쳐들을 사용하여 동적일 수 있다.

[0377] [0036] 일부 실시예들에서, 도파관들(270, 280, 290, 300, 310) 중 둘 또는 그 초과는 동일한 연관된 깊이 평면을 가질 수 있다. 예컨대, 다수의 도파관들(270, 280, 290, 300, 310)은 동일한 깊이 평면으로 세팅된 이미지들을 출력하도록 구성될 수 있거나, 또는 도파관들(270, 280, 290, 300, 310)의 다수의 서브세트들은 동일한 복수의 깊이 평면들로 세팅된 이미지들(각각의 깊이 평면에 대해 하나의 이미지가 세팅됨)을 출력하도록 구성될 수 있다. 이는 그러한 깊이 평면들에서 확장된 시야를 제공하기 위해 타일 이미지(tiled image)를 형성하는 이점들을 제공할 수 있다.

[0378] [0037] 도 6을 계속 참조하면, 아웃커플링 광학 엘리먼트들(570, 580, 590, 600, 610)은 자신의 개별 도파관들 밖으로 광을 재지향시키고 그리고 또한 도파관과 연관된 특정 깊이 평면에 대해 적절한 양의 발산 또는 시준으로 이 광을 출력하도록 구성될 수 있다. 결과로서, 상이한 연관된 깊이 평면들을 가진 도파관들은 상이한 구성들의 아웃-커플링 광학 엘리먼트들(570, 580, 590, 600, 610)을 가질 수 있고, 이러한 아웃-커플링 광학 엘리먼트들(570, 580, 590, 600, 610)은 연관된 깊이 평면에 따라 상이한 양의 발산으로 광을 출력한다. 일부 실시예들에서, 광 추출 광학 엘리먼트들(570, 580, 590, 600, 610)은 특정 각도들로 광을 출력하도록 구성될 수 있는 볼류메트릭(volumetric) 또는 표면 피쳐들일 수 있다. 예컨대, 광 추출 광학 엘리먼트들(570, 580, 590, 600, 610)은 볼륨 홀로그램들, 표면 홀로그램들, 및/또는 회절 격자들일 수 있다. 일부 실시예들에서, 피쳐들(320, 330, 340, 350)은 렌즈들이 아닐 수 있고; 오히려, 이들은 단순히 스페이서들(예컨대, 공기 갭들을 형성하기 위한 클래딩(cladding) 층들 및/또는 구조들)일 수 있다.

[0379] [0038] 일부 실시예들에서, 아웃-커플링 광학 엘리먼트들(570, 580, 590, 600, 610)은 회절 패턴을 형성하는 회절 피쳐들 또는 "회절 광학 엘리먼트"(또한 본원에서 "DOE"로서 지칭됨)이다. 바람직하게는, DOE들은 충분히 낮은 회절 효율성을 가져서, 빔의 광의 일부만이 DOE의 각각의 교차로 인해 눈(210)을 향하여 편향되지만, 나머지는 TIR을 통하여 도파관을 통해 계속 이동한다. 따라서, 이미지 정보를 전달하는 광은 다수의 위치들에서 도파관을 나가는 다수의 관련된 출사 빔들로 분할되고 그 결과는 이런 특정 시준된 빔이 도파관 내에서 이리저리 반사되기 때문에 눈(210)을 향하는 상당히 균일한 출사 방출 패턴이다.

[0380] [0039] 일부 실시예들에서, 하나 이상의 DOE들은, 그것들을 활발하게 회절시키는 "온" 상태들과 그것들을 크게 회절시키지 않는 "오프" 상태들 간에 스위칭 가능할 수 있다. 예컨대, 스위칭 가능 DOE는, 마이크로액적들이 호스트 매질에서 회절 패턴을 포함하는 중합체 분산형 액정 층을 포함할 수 있고, 마이크로액적들의 굴절률은 호스트 매질의 굴절률에 실질적으로 매칭하도록 스위칭될 수 있거나(이 경우에 패턴은 입사광을 현저하게 회절시키지 않음) 또는 마이크로액적은 호스트 매질의 인덱스에 매칭하지 않는 인덱스로 스위칭될 수 있다(이 경우에 패턴은 입사광을 활발하게 회절시킴).

[0381] [0040] 일부 실시예들에서, 예컨대, 사용자 입력들을 검출하고 그리고/또는 사용자의 생리적 상태를 모니터링하기 위해 눈(210) 및/또는 눈(210) 주위 조직의 이미지들을 캡처하도록 카메라 어셈블리(630)(예컨대, 가시 광 및 적외선 카메라들을 포함하는 디지털 카메라)가 제공될 수 있다. 본원에서 사용된 바와 같이, 카메라는 임의의 이미지 캡처 디바이스일 수 있다. 일부 실시예들에서, 카메라 어셈블리(630)는 이미지 캡처 디바이스 및 눈에 광(예컨대, 적외선)을 프로젝팅하기 위한 광원을 포함할 수 있으며, 이 광은 그 후 눈에 의해 반사되고 이미

지 캡처 디바이스에 의해 검출될 수 있다. 일부 실시예들에서, 카메라 어셈블리(630)는 프레임(80)(도 2)에 부착될 수 있고, 카메라 어셈블리(630)로부터의 이미지 정보를 프로세싱할 수 있는 프로세싱 모듈들(140 및/또는 150)과 전기 통신할 수 있다. 일부 실시예들에서, 하나의 카메라 어셈블리(630)가 각각의 눈을 별개로 모니터링하기 위해 각각의 눈에 대해 활용될 수 있다.

[0382] [0041] 이제 도 7을 참조하면, 도파관에 의해 출력된 출사 빔들의 예가 도시된다. 하나의 도파관이 예시되지만, 도파관 어셈블리(260)(도 6) 내의 다른 도파관들이 유사하게 기능할 수 있다는 것이 인지될 것이며, 여기서 도파관 어셈블리(260)는 다수의 도파관들을 포함한다. 광(640)은 도파관(270)의 입력 표면(460)에서 도파관(270)으로 주입되고 TIR에 의해 도파관(270) 내에서 전파된다. 광(640)이 DOE(570)에 충돌하는 포인트들에서, 광의 일부는 출사 빔들(650)로서 도파관을 나간다. 출사 빔들(650)은 실질적으로 평행한 것으로 예시되지만, 본원에 논의된 바와 같이, 이들 출사 빔들은 또한 도파관(270)과 연관된 깊이 평면에 따라, 임의의 각도로 눈(210)으로 전파되도록 재지향될 수 있다(예컨대, 발산하는 출사 빔들을 형성함). 실질적으로 평행한 출사 빔들은, 눈(210)으로부터 먼 거리(예컨대, 광학적 무한대)에 있는 깊이 평면 상에 세팅된 것처럼 보이는 이미지들을 형성하도록 광을 아웃커플링하는 아웃-커플링 광학 엘리먼트들을 갖는 도파관을 나타낼 수 있다는 것이 인지될 것이다. 다른 도파관들 또는 아웃커플링 광학 엘리먼트들의 다른 세트들은 더 발산하는 출사 빔 패턴을 출력할 수 있고, 이는 눈(210)이 망막 상에 포커싱을 맞추게 하기 위해 더 가까운 거리로 원근조절하는 것을 요구할 것이고 광학적 무한대보다 눈(210)에 더 가까운 거리로부터의 광으로서 눈에 의해 해석될 것이다.

[0383] [0042] 일부 실시예들에서, 풀(full) 컬러 이미지는 컴포넌트 컬러들, 예컨대, 3개 또는 그 초과 컴포넌트 컬러들 각각에 이미지들을 오버레이시킴으로써 각각의 깊이 평면에 형성될 수 있다. 도 8은 각각의 깊이 평면이 다수의 상이한 컴포넌트 컬러들을 사용하여 형성된 이미지들을 포함하는 스택된 도파관 어셈블리의 예를 예시한다. 예시된 실시예는 깊이 평면들(240a-240f)을 도시하지만, 더 많거나 더 적은 깊이들이 또한 고려될 수 있다. 각각의 깊이 평면은, 제1 컬러(G)의 제1 이미지; 제2 컬러(R)의 제2 이미지; 및 제3 컬러(B)의 제3 이미지를 포함해서, 자신과 연관된 3개 또는 그 초과 컴포넌트 컬러 이미지들을 가질 수 있다. 상이한 깊이 평면들은 G, R 및 B 문자들 다음에 오는 디오퍼들(dpt)에 대한 상이한 숫자들에 의해 도면에 표시된다. 단지 예를로서, 이들 문자들 각각 다음에 오는 숫자들은 디오퍼들(1/m) 또는 뷰어로부터의 깊이 평면의 역 거리(inverse distance)를 표시하며, 도면들에서 각각의 박스는 개별 컴포넌트 컬러 이미지를 나타낸다. 일부 실시예들에서, 상이한 파장들의 광의 눈의 포커싱에서의 차이를 참작하기 위해, 상이한 컴포넌트 컬러들에 대한 깊이 평면들의 정확한 배치는 변동될 수 있다. 예컨대, 주어진 깊이 평면에 대한 상이한 컴포넌트 컬러 이미지들은 사용자로부터의 상이한 거리들에 대응하는 깊이 평면들 상에 배치될 수 있다. 이러한 어레이먼트는 시력 및 사용자의 편안함을 증가시킬 수 있고 그리고/또는 색수차들을 감소시킬 수 있다.

[0384] [0043] 일부 실시예들에서, 각각의 컴포넌트 컬러의 광은 하나의 전용 도파관에 의해 출력될 수 있고, 결과적으로, 각각의 깊이 평면은 그것과 연관된 다수의 도파관들을 가질 수 있다. 이러한 실시예들에서, 문자들 G, R 또는 B를 포함하는 도면들 내의 각각의 박스는 개별 도파관을 나타내는 것으로 이해될 수 있고, 3개의 도파관들이 깊이 평면 당 제공될 수 있으며, 여기서 3개의 컴포넌트 컬러 이미지들이 깊이 평면 당 제공된다. 각각의 깊이 평면과 연관된 도파관들이 설명의 용이함을 위해 이 도면에서 서로 인접한 것으로 도시되지만, 물리적 디바이스에서, 도파관들은 모두 레벨 당 하나의 도파관을 갖는 스택으로 배열될 수 있다는 것이 인지될 것이다. 일부 다른 실시예들에서, 다수의 컴포넌트 컬러들이 동일한 도파관에 의해 출력될 수 있어서, 예컨대, 단지 단일 도파관이 깊이 평면 당 제공될 수 있다.

[0385] [0044] 도 8을 계속 참조하면, 일부 실시예들에서, G는 녹색 컬러이고, R은 적색 컬러이고, B는 청색 컬러이다. 일부 다른 실시예들에서, 마젠타 및 시안을 포함하는, 다른 광의 파장들과 연관되는 다른 컬러들이 적색, 녹색 또는 청색 중 하나 이상을 대체할 수 있거나, 또는 이에 추가로 사용될 수 있다.

[0386] [0045] 본 개시내용 전반에 걸쳐 주어진 컬러의 광에 대한 참조는 그 주어진 컬러인 것으로서 뷰어에 의해 지각되는 광의 파장들의 범위 내의 하나 이상의 파장들의 광을 포함하는 것으로 이해될 것인 점이 인지될 것이다. 예컨대, 적색 광은 약 620-780nm 범위의 하나 이상의 파장들의 광을 포함할 수 있고, 녹색 광은 약 492-577nm 범위의 하나 이상의 파장들의 광을 포함할 수 있으며, 청색 광은 약 435-493nm 범위의 하나 이상의 파장들의 광을 포함할 수 있다.

[0387] [0046] 일부 실시예들에서, 광원(530)(도 6)은 뷰어의 시각적 지각 범위 밖의 하나 이상의 파장들, 예컨대, 적외선 및/또는 자외선 파장들의 광을 방출하도록 구성될 수 있다. 또한, 디스플레이(250)의 도파관들의 인-커플링, 아웃-커플링 및 다른 광 재지향 구조들은 예컨대, 이미징 및/또는 사용자 자극 애플리케이션들을 위해 사용

자의 눈(210)을 향하여 디스플레이 밖으로 이 광을 지향 및 방출하도록 구성될 수 있다.

- [0388] [0047] 이제 도 9a를 참조하면, 일부 실시예들에서, 도파관에 충돌하는 광은 도파관 내로 그 광을 인-커플링하기 위해 재지향될 필요가 있을 수 있다. 인-커플링 광학 엘리먼트는 광을 그의 대응하는 도파관으로 재지향 및 인-커플링하는 데 사용될 수 있다. 도 9a는 인-커플링 광학 엘리먼트를 각각 포함하는 복수의 스택된 도파관들 또는 스택된 도파관들의 세트(660)의 예의 측 단면도를 예시한다. 도파관들은 각각 하나 이상의 상이한 파장들, 또는 하나 이상의 상이한 파장들의 범위들의 광을 출력하도록 구성될 수 있다. 스택(660)은 스택(260)(도 6)에 대응할 수 있고, 스택(660)의 예시된 도파관들은, 이미지 주입 디바이스들(360, 370, 380, 390, 400) 중 하나 또는 그 초과로부터의 광이 인-커플링을 위해 광이 재지향되도록 요구하는 포지션으로부터 도파관들로 주입되는 것을 제외하면, 복수의 도파관들(270, 280, 290, 300, 310)의 부분에 대응할 수 있다는 것이 인지될 것이다.
- [0389] [0048] 스택된 도파관들의 예시된 세트(660)는 도파관들(670, 680, 및 690)을 포함한다. 각각의 도파관은, (도파관 상의 광 입력 영역으로서 또한 지칭될 수 있는) 연관된 인-커플링 광학 엘리먼트를 포함하며, 예컨대, 인-커플링 광학 엘리먼트(700)는 도파관(670)의 주 표면(예컨대, 상위 주 표면) 상에 배치되고, 인-커플링 광학 엘리먼트(710)는 도파관(680)의 주 표면(예컨대, 상위 주 표면) 상에 배치되며, 인-커플링 광학 엘리먼트(720)는 도파관(690)의 주 표면(예컨대, 상위 주 표면) 상에 배치된다. 일부 실시예들에서, 인-커플링 광학 엘리먼트들(700, 710, 720) 중 하나 이상은 각각의 도파관(670, 680, 690)의 최하부 주 표면 상에 배치될 수 있다(특히, 여기서 하나 이상의 인-커플링 광학 엘리먼트들은 반사성 편향 광학 엘리먼트들임). 예시된 바와 같이, 인-커플링 광학 엘리먼트들(700, 710, 720)은, 특히 이러한 인-커플링 광학 엘리먼트들이 투과성 편향 광학 엘리먼트들인 경우, 그의 각각의 도파관(670, 680, 690)의 상위 주 표면(또는 다음 하위 도파관의 최상부) 상에 배치될 수 있다. 일부 실시예들에서, 인-커플링 광학 엘리먼트들(700, 710, 720)은 각각의 도파관(670, 680, 690)의 바디에 배치될 수 있다. 일부 실시예들에서, 본원에서 논의된 바와 같이, 인-커플링 광학 엘리먼트들(700, 710, 720)은 파장 선택적이어서, 이들은 하나 이상의 광 파장들을 선택적으로 재지향시키면서 다른 광 파장들을 투과시킨다. 그의 각각의 도파관(670, 680, 690)의 한 측 또는 코너 상에서 예시되지만, 인-커플링 광학 엘리먼트들(700, 710, 720)은 일부 실시예들에서, 그의 각각의 도파관(670, 680, 690)의 다른 영역들에 배치될 수 있다는 것이 인지될 것이다.
- [0390] [0049] 예시된 바와 같이, 인-커플링 광학 엘리먼트들(700, 710, 720)은 서로 측방향으로 오프셋될 수 있다. 일부 실시예들에서, 각각의 인-커플링 광학 엘리먼트는, 광이 다른 인-커플링 광학 엘리먼트를 통과하지 않고 자신이 그 광을 수신하도록 오프셋될 수 있다. 예컨대, 각각의 인-커플링 광학 엘리먼트(700, 710, 720)는 도 6에 도시된 바와 같이 상이한 이미지 주입 디바이스(360, 370, 380, 390, 및 400)로부터 광을 수신하도록 구성될 수 있고, 다른 인-커플링 광학 엘리먼트들(700, 710, 720)로부터 분리(예컨대, 측방향으로 이격)될 수 있어서, 그것은 인-커플링 광학 엘리먼트들(700, 710, 720) 중 다른 것들로부터의 광을 실질적으로 수신하지 않는다.
- [0391] [0050] 각각의 도파관은 또한 연관된 광 분배 엘리먼트들을 포함하며, 예컨대, 광 분배 엘리먼트들(730)은 도파관(670)의 주 표면(예컨대, 최상부 주 표면) 상에 배치되고, 광 분배 엘리먼트들(740)은 도파관(680)의 주 표면(예컨대, 최상부 주 표면) 상에 배치되며, 광 분배 엘리먼트들(750)은 도파관(690)의 주 표면(예컨대, 최상부 주 표면) 상에 배치된다. 일부 다른 실시예들에서, 광 분배 엘리먼트들(730, 740, 750)은 연관된 도파관들(670, 680, 690)의 최하부 주 표면 상에 각각 배치될 수 있다. 일부 다른 실시예들에서, 광 분배 엘리먼트들(730, 740, 750)은 연관된 도파관들(670, 680, 690)의 최상부 및 최하부 주 표면 둘 모두 상에 각각 배치될 수 있거나; 또는 광 분배 엘리먼트들(730, 740, 750)은 상이한 연관된 도파관들(670, 680, 690)의 최상부 및 최하부 주 표면들 중 상이한 것들 상에 각각 배치될 수 있다.
- [0392] [0051] 도파관들(670, 680, 690)은 예컨대, 기체, 액체 및/또는 고체 재료 층들에 의해 이격되고 분리될 수 있다. 예컨대, 예시된 바와 같이, 층(760a)은 도파관들(670, 680)을 분리할 수 있고; 층(760b)은 도파관(680 및 690)을 분리할 수 있다. 일부 실시예들에서, 층들(760a 및 760b)은 저 굴절률 재료들(즉, 도파관들(670, 680, 690) 중 바로 인접한 하나를 형성하는 재료보다 낮은 굴절률을 갖는 재료들)로 형성된다. 바람직하게는, 층들(760a, 760b)을 형성하는 재료의 굴절률은 도파관들(670, 680, 690)을 형성하는 재료의 굴절률보다 0.05 이상으로 크거나 또는 0.10 이하로 작다. 유리하게는, 더 낮은 굴절률 층들(760a, 760b)은 도파관들(670, 680, 690)을 통한 광의 TIR(total internal reflection)(예컨대, 각각의 도파관의 최상부 및 최하부 주 표면들 사이의 TIR)을 용이하게 하는 클래딩 층들로서 기능할 수 있다. 일부 실시예들에서, 층들(760a, 760b)은 공기로 형성된다. 예시되지는 않았지만, 예시된 도파관들의 세트(660)의 최상부 및 최하부는 바로 이웃한 클래딩 층들을

포함할 수 있다는 것이 인지될 것이다.

- [0393] [0052] 바람직하게는, 제조의 용이함 및 다른 고려사항들을 위해, 도파관들(670, 680, 690)을 형성하는 재료는 유사하거나 동일하며, 층들(760a, 760b)을 형성하는 재료는 유사하거나 동일하다. 일부 실시예들에서, 도파관들(670, 680, 690)을 형성하는 재료는 하나 이상의 도파관들 간에 상이할 수 있고, 그리고/또는 층들(760a, 760b)을 형성하는 재료는 여전히 위에서 언급된 다양한 굴절률 관계들을 유지하면서 상이할 수 있다.
- [0394] [0053] 도 9a를 계속 참조하여, 광선들(770, 780, 790)이 도파관들의 세트(660) 상에 입사된다. 광선들(770, 780, 790)은 하나 이상의 이미지 주입 디바이스들(360, 370, 380, 390, 400)(도 6)에 의해 도파관들(670, 680, 690) 내로 주입될 수 있다는 것이 인지될 것이다.
- [0395] [0054] 일부 실시예들에서, 광선들(770, 780, 790)은 상이한 성질들, 예컨대, 상이한 파장들 또는 상이한 파장들의 범위들을 가지며, 이는 상이한 컬러들에 대응할 수 있다. 인-커플링 광학 엘리먼트들(700, 710, 720)은 각각, 입사광이 TIR에 의해 도파관들(670, 680, 690) 중 각각의 하나를 통해 전파되도록 광을 편향시킨다. 일부 실시예들에서, 인-커플링 광학 엘리먼트들(700, 710, 720)은 각각, 하나 이상의 특정 광 파장들을 선택적으로 편향시키면서, 다른 파장들을 하부 도파관 및 연관된 인커플링 광학 엘리먼트로 투과시킨다.
- [0396] [0055] 예컨대, 인-커플링 광학 엘리먼트(700)는, 상이한 제2 및 제3 파장들 또는 파장들의 범위들을 각각 갖는 광선들(1242 및 1244)을 투과시키면서 제1 파장 또는 파장들의 범위를 갖는 광선(770)을 편향시키도록 구성될 수 있다. 유사하게, 투과된 광선(780)은 제2 파장 또는 파장들의 범위의 광을 편향시키도록 구성된 인-커플링 광학 엘리먼트(710)에 충돌하고 그에 의해 편향된다. 광선(790)은 제3 파장 또는 파장들의 범위의 광을 선택적으로 편향시키도록 구성된 인-커플링 광학 엘리먼트(720)에 의해 편향된다.
- [0397] [0056] 도 9a를 계속 참조하면, 편향된 광선들(770, 780, 790)은, 이들이 대응하는 도파관(670, 680, 690)을 통해 전파되도록 편향되는데; 즉, 각각의 도파관의 인-커플링 광학 엘리먼트들(700, 710, 720)은 해당 대응하는 도파관(670, 680, 690) 내로 광을 인-커플링하도록 해당 대응하는 도파관 내로 광을 편향시킨다. 광선들(770, 780, 790)은 광이 TIR에 의해 각각의 도파관(670, 680, 690)을 통해 전파되게 하는 각도들로 편향된다. 광선들(770, 780, 790)은, 도파관의 대응하는 광 분배 엘리먼트들(730, 740, 750)에 충돌할 때까지 TIR에 의해 각각의 도파관(670, 680, 690)을 통해 전파된다.
- [0398] [0057] 이제 도 9b를 참조하면, 도 9a의 복수의 스택된 도파관들의 예의 사시도를 예시한다. 위에서 언급된 바와 같이, 인-커플링된 광선들(770, 780, 790)은 인-커플링 광학 엘리먼트들(700, 710, 720)에 의해 각각 편향되고, 그 후 도파관들(670, 680, 690) 내에서 TIR에 의해 각각 전파된다. 그 후, 광선들(770, 780, 790)은 광 분배 엘리먼트들(730, 740, 750)에 각각 충돌한다. 광 분배 엘리먼트들(730, 740, 750)은, 광선들(770, 780, 790)이 아웃-커플링 광학 엘리먼트(800, 810, 820)를 향해 각각 전파되도록 이들을 편향시킨다.
- [0399] [0058] 일부 실시예들에서, 광 분배 엘리먼트들(730, 740, 750)은 OPE(orthogonal pupil expander)들이다. 일부 실시예들에서, OPE들은 아웃-커플링 광학 엘리먼트들(800, 810, 820)로 광을 편향시키거나 분배하고, 일부 실시예들에서, 광이 아웃-커플링 광학 엘리먼트들로 전파될 때 이 광의 빔 또는 스폿 크기를 또한 증가시킬 수 있다. 일부 실시예들에서, 광 분배 엘리먼트들(730, 740, 750)은 생략될 수 있고, 인-커플링 광학 엘리먼트들(700, 710, 720)은 아웃-커플링 광학 엘리먼트들(800, 810, 820)에 광을 직접 편향시키도록 구성될 수 있다. 예컨대, 도 9a를 참조하면, 광 분배 엘리먼트들(730, 740, 750)은 아웃-커플링 광학 엘리먼트(800, 810, 820)로 각각 대체될 수 있다. 일부 실시예들에서, 아웃-커플링 광학 엘리먼트들(800, 810, 820)은 뷰어의 눈(210)(도 7)에 광을 지향시키는 EP(exit pupil)들 또는 EPE(exit pupil expander)들이다. OPE들은 적어도 하나의 축에서 아이 박스(eye box)의 치수들을 증가시키도록 구성될 수 있고, EPE들은 OPE들의 축과 교차하는, 예컨대, 직교하는 축에서 아이 박스를 증가시키는 것일 수 있다는 것이 인지될 것이다. 예컨대, 각각의 OPE는 OPE에 부딪치는 광의 일부를 동일한 도파관의 EPE로 재지향시키면서 광의 잔여 부분이 도파관을 따라 계속 전파되도록 허용하게 구성될 수 있다. OPE에 다시 충돌할 때, 잔여 광의 다른 부분은 EPE로 재지향되고, 그 부분의 잔여 부분은 도파관을 따라 추가로 계속 전파되는 식이다. 유사하게, EPE에 부딪치면, 충돌하는 광의 일부는 사용자를 향하여 도파관 밖으로 지향되고, 그 광의 잔여 부분은 그것이 EP에 다시 부딪칠 때까지 도파관을 통해 계속 전파되며, 이 때 충돌하는 광의 다른 부분은 도파관 밖으로 지향되는 식이다. 결과적으로, 인커플링된 단일 광빔은 그 광의 일부가 OPE 또는 EPE에 의해 재지향될 때마다 "복제"될 수 있으며, 그리하여 도 6에 도시된 바와 같이 클론 광빔들의 필드를 형성한다. 일부 실시예들에서, OPE 및/또는 EPE는 광빔들의 크기를 수정하도록 구성될 수 있다.

[0400] [0059] 따라서, 도 9a 및 도 9b를 참조하면, 일부 실시예들에서, 도파관들의 세트(660)는 각각의 컴포넌트 컬러에 대해 도파관들(670, 680, 690; 인-커플링 광학 엘리먼트들(700, 710, 720); 광 분배 엘리먼트(예컨대, OPE들)(730, 740, 750); 및 아웃-커플링 광학 엘리먼트들(예컨대, EP들)(800, 810, 820)을 포함한다. 도파관들(670, 680, 690)은 각각의 도파관 사이에 에어 갭/클래딩 층을 갖도록 스택될 수 있다. 인-커플링 광학 엘리먼트들(700, 710, 720)은 (상이한 인-커플링 광학 엘리먼트들이 상이한 파장들의 광을 수신함에 따라) 입사 광을 자신의 도파관으로 재지향 또는 편향시킨다. 그 후, 광은 각각의 도파관(670, 680, 690) 내에서 TIR을 초래할 각도로 전파된다. 도시된 예에서, 광선(770)(예컨대, 청색 광)은 제1 인-커플링 광학 엘리먼트(700)에 의해 편향되고, 그 후 도파관을 따라 계속 바운싱(bounce)하여, 앞서 설명된 방식으로, 광 분배 엘리먼트(예컨대, OPE들)(730) 및 그 후 아웃-커플링 광학 엘리먼트(예컨대, EP들)(800)와 상호작용한다. 광선들(780 및 790)(예컨대, 각각 녹색 및 적색 광)은 도파관(670)을 통과할 것이고, 광선(780)은 인-커플링 광학 엘리먼트(710)에 충돌하고 그에 의해 편향된다. 그 후, 광선(780)은 TIR을 통해 도파관(680)을 따라 바운싱되어, 자신의 광 분배 엘리먼트(예컨대, OPE들)(740)로 그리고 그 후 아웃-커플링 광학 엘리먼트(예컨대, EP들)(810)로 진행된다. 마지막으로, 광선(790)(예컨대, 적색 광)은 도파관(690)을 통과하여 도파관(690)의 광 인커플링 광학 엘리먼트들(720)에 충돌한다. 광 인-커플링 광학 엘리먼트들(720)은, 광선(790)이 TIR에 의해 광 분배 엘리먼트(예컨대, OPE들)(750)로, 그리고 그 후 TIR에 의해 아웃-커플링 광학 엘리먼트(예컨대, EP들)(820)로 전파되도록 그 광선을 편향시킨다. 그 후, 아웃-커플링 광학 엘리먼트(820)는 최종적으로 광선(790)을 뷰어에 아웃-커플링하며, 이 뷰어는 또한 다른 도파관들(670, 680)로부터 아웃-커플링된 광을 수신한다.

[0401] [0060] 도 9c는 도 9a 및 도 9b의 복수의 스택된 도파관들의 예의 하향식 평면도를 예시한다. 예시된 바와 같이, 각각의 도파관의 연관된 광 분배 엘리먼트(730, 740, 750) 및 연관된 아웃-커플링 광학 엘리먼트(800, 810, 820)와 함께, 도파관들(670, 680, 690)은 수직으로 정렬 될 수 있다. 그러나, 본원에서 논의된 바와 같이, 인-커플링 광학 엘리먼트들(700, 710, 720)은 수직으로 정렬되지 않고; 오히려, 인-커플링 광학 엘리먼트들은 바람직하게는, 중첩되지 않는다(예컨대, 하향식 도면에서 보여지는 바와 같이 측방향으로 이격됨). 본원에서 추가로 논의되는 바와 같이, 이러한 중첩되지 않는 공간적 어레이먼트는 일대일 기반으로 상이한 자원들로부터 상이한 도파관으로의 광의 주입을 용이하게 하고, 그리하여 특정 광원이 특정 도파관에 고유하게 커플링되도록 허용한다. 일부 실시예들에서, 중첩되지 않는 공간적으로-분리된 인커플링 광학 엘리먼트들을 포함하는 어레이먼트들은 시프트된 동공 시스템으로서 지칭될 수 있고, 이러한 어레이먼트들의 인커플링 광학 엘리먼트들은 서브 동공들에 대응할 수 있다.

[0402] **메타표면들 및 메타표면들에 기초한 광학 엘리먼트들**

[0403] [0063] 디스플레이 시스템들은 광의 전파를 제어하기 위해 다양한 광학 엘리먼트들을 사용할 수 있다. 그러나, 머리-장착 디스플레이 디바이스(예컨대, 도 2를 참조하여 기술한 디스플레이 시스템(80))를 포함하는 디스플레이 시스템들과 같은 일부 맥락에서, 종래의 광학 엘리먼트들은, 그의 비교적 무거운 중량, 큰 크기, 제조 난제들 및/또는 회절 각도들 및 회절 효율과 같은 광학 성질들의 결핍으로 인해 바람직하거나 적합하지 않을 수 있다.

[0404] [0064] 예컨대, 도 9a 내지 도 9c를 참조하여 위에서 설명된 바와 같이, 다양한 실시예들에 따른 디스플레이 시스템들은 회절 격자들을 포함할 수 있는 광학 엘리먼트들(예컨대, 인커플링 광학 엘리먼트들, 광 분배 엘리먼트들 및 아웃커플링 광학 엘리먼트들)을 포함할 수 있다. 또한, 도 9a 내지 도 9c를 참조하여 위에서 추가로 설명된 바와 같이, 대응하는 도파관에 커플링된 광은 바람직하게는, TIR(total internal reflection)에 의해 도파관 내에서 전파된다. TIR을 달성하기 위해, 회절 격자가 표면 법선에 비해 비교적 높은 회절 각도들을 갖는 것이 바람직할 수 있다. 또한, 양호한 광 세기 및 이미지 밝기를 제공하기 위해 높은 회절 효율들이 바람직하다. 그러나, 가시 광에 대한 높은 회절 각도들 및 높은 회절 효율들을 달성할 수 있는 회절 격자들은 난제로 남아있다. 이들 및 다른 요구들을 해결하기 위해, 본원에서 개시된 광학 엘리먼트들의 실시예들, 예컨대 회절 격자들은 메타표면들을 활용한다.

[0405] [0065] 메타표면들은 반사 또는 투과 시에 광의 편광, 위상 및/또는 진폭을 국부적으로 수정할 수 있는 표면 구조들을 포함할 수 있다. 메타표면들은, 패턴들이 광의 파면을 제어하도록 구성된 서브파장-크기의 및/또는 서브파장-간격의 위상 시프트 엘리먼트들의 어레이를 포함할 수 있어서, 빔 형상화(beam shaping), 렌징(lensing), 빔 벤딩 및 편광 분할을 포함하는 다양한 광학 기능성들이 이들로부터 유도될 수 있게 한다. 광의 파면을 조작하는 데 사용될 수 있는 팩터들은 표면 구조들의 재료, 크기, 기하학적 구조 및 배향을 포함한다. 표면 상에서 뚜렷한 산란 성질들을 갖는 표면 구조들을 배열함으로써, 광학 파면들이 실질적으로 조작될 수 있

는 공간-변형 메타표면들이 생성될 수 있다.

[0406] [0066] 렌즈들 및 파장판들과 같은 종래의 광학 엘리먼트들에서, 파면은 파장보다 훨씬 두꺼운 매체에서 전파 위상(propagation phase)들을 통해 제어된다. 종래의 광학 엘리먼트들과 달리, 메타표면들은 위상 시프트 엘리먼트들로서 서브파장-크기 공명기들을 이용하여 광의 위상 변화들을 대신 유도한다. 메타표면들은 두께가 비교적 얇고 균일한 피치들로 형성되기 때문에, 메타표면들은 반도체 프로세싱 기술들과 같은 박막 프로세싱 기술 뿐만 아니라 나노임프린트 기술들과 같은 직접-인쇄 기술들을 사용하여 표면에 걸쳐 패터닝될 수 있다. 종래의 광학 엘리먼트를 메타표면으로 대체하는 일 예는 도 10a 내지 10c를 참조하여 예시된다. 도 10a는 종래의 광학 엘리먼트, 예컨대 유리 액시콘(1102)의 단면도를 개략적으로 예시한다. 예시된 바와 같이, 예컨대, 유리 렌즈로 형성된 유리 액시콘과 같은 통상적인 종래의 광학 엘리먼트는 두께가 수 밀리미터들일 수 있다. 대조적으로, 도 10b는 금속 또는 반도체 메타표면으로 형성되고 기관, 예컨대 석영 기관 상에 배치될 수 있는 광학 엘리먼트, 예컨대 메타표면 액시콘(1104)의 단면도를 개략적으로 예시한다. 종래의 액시콘(1102)과 비교하여, 메타표면 액시콘(1104)은 약 수십 내지 수백 나노미터 두께일 수 있어, 머리-장착 디스플레이 디바이스와 같이 콤팩트한 광학 엘리먼트들을 필요로 하는 광학 시스템들에 이들을 적합하게 한다. 도 10c는 메타표면 액시콘(1104)이 550-nm 파장에서 시준된 가우시안 LCP(left circularly polarized) 광빔으로 조명될 때 발생하는 투과된 비회절 베셀(nondiffracting Bessel) 빔 프로파일(1106)을 예시한다. 예시된 바와 같이, 원하는 빔 프로파일(1106)은 종래의 액시콘에 비해 수십 배(orders of magnitude) 더 얇을 수 있는 메타표면 액시콘을 사용하여 달성될 수 있다. 격자들과 같은 다양한 다른 광학 엘리먼트들에 대해 유사한 결과들이 획득될 수 있다.

[0407] **기하학적 위상 메타표면들에 기초한 파장판들**

[0408] [0067] 어떠한 이론에도 얽매임 없이, 광빔이 광의 편광 상태들 공간에서 폐쇄된 사이클을 따라 취해질 때, 누적된 경로 길이들로부터 뿐만 아니라 기하학적 위상으로부터 동적 위상이 획득될 수 있다. 기하학적 위상으로부터 획득된 동적 위상은 편광의 국부적 변화들에 기인한다. 원하는 위상 프론트(phase front)를 형성하기 위해 기하학적 위상에 기초한 일부 광학 엘리먼트들은 PBOE(Pancharatnam-Berry phase optical element)들로서 지칭될 수 있다. PBOE들은 고속 축들의 배향이 파장판 엘리먼트들의 공간적 포지션에 의존하는 파장판 엘리먼트들로 구성될 수 있다.

[0409] [0068] 이론에 의해 제한됨 없이, 함수 $\theta(x, y)$ 에 따른 고속 축 배향들을 갖는 기하학적 위상 광학 엘리먼트들, 예컨대, PBOE들로 형성된 반파장판들로 메타표면들을 형성함으로써, 입사되는 원형으로 편광된 광빔은

$\phi_g(x,y) = +/-2\theta(x,y)$ 와 동일한 기하학적 위상을 갖는 대향하는 헬리시티(helicity)의 빔으로 완전히 변형될 수 있다. 0과 π 사이에서 파장판 엘리먼트들의 고속 축들의 국부적 배향을 제어함으로써, 전체 광학 엘리먼트에 걸쳐 비교적 높고 균일한 투과 진폭을 유지하고 그리하여 원하는 파면을 제공하면서, 전체(full) 0 내지 2π 범위를 커버하는 위상 픽업들/리타레이션들이 달성될 수 있다.

[0410] [0069] 기하학적 위상 및 결과적인 위상 픽업/리타레이션 및 흡수에 기초한 파장판의 예가 도 11a 내지 11d를 참조하여 예시된다. 도 11a는 TE(transverse electric) 편광(구조의 길이에 대해 수직으로 편광된 전기장을 가짐) 및 TM(orthogonal transverse magnetic) 편광 하의 입사광(1108)에 의한 하향식 조명 하에서 복수의 나노빔들(1104)을 포함하는 메타표면으로 형성된 예시적인 파장판(1100)을 예시한다. 공명 구조들의 두께는 입사광(1104)의 자유 공간 파장에 비해 작을 수 있다. 예시된 예에서, 나노빔들(1104)은 x-방향으로 120nm 폭 및 z-방향으로 100nm 두께이다. 예시된 예에서, 나노빔들(1104)은 Si로 형성되며, 이는 도 11b 내지 도 11d를 참조하여 설명된 바와 같이 관심있는 파장 범위 내에서 비교적 강한 공명을 지원하는 것으로 밝혀졌다.

[0411] [0070] 도 11b는 도 11a를 참조하여 위에서 예시된 파장판(1100)으로부터 비롯된 시물레이팅된 위상 파면들을 예시한다. 입사 파면의 유한 엘리먼트 시물레이션(1112)에 비해, 유한 엘리먼트 시물레이션(1116)은, 550nm에서의 TE-편광된 광빔의 파면이 0.14π 만큼 지연되는 것을 보여준다. 파면의 시물레이션(1120)은, TM-편광된 광의 파면이 1.15π 만큼 훨씬 더 지연된다는 것을 보여준다. 결과적으로, 두 직교 편광들 사이의 위상 리타레이션은 약 π 이고, 빔 어레이는 반파장판으로서 역할을 한다.

[0412] [0071] 도 11c는 도 11a를 참조하여 위에서 설명된 것과 유사한 파장판으로부터 비롯된 TE-편광된 광빔에 대한 TM-편광된 광의 위상 리타레이션의 시물레이팅된 스펙트럼들을 예시한다. 파장을 490nm로부터 700nm로 스위핑(sweeping)함으로써, 파장판의 위상 리타레이션은 약 0.4π 로부터 1.2π 로 변동된다. 시물레이팅된 스펙트럼들(1128, 1132 및 1136)은 100nm의 나노빔들(1104)의 공칭 두께에 대해, 각각 100nm, 120nm, 140nm의 빔 폭들을

갖는 나노빔 어레이들을 포함하는 블레이즈드 격자(blazed grating)들에 대한 위상 리타데이션을 예시한다. 비교를 위해, 시뮬레이트 스펙트럼(1140)은 100nm 두께 막의 방해적인 자연 복굴절 결정에 대해 0.063π 의 비교적 작은 위상 리타데이션을 보여준다. 정사각형 심볼들은, 120nm-빔들의 어레이에 대한 실험 측정을 예시하며, 이는 시뮬레이션들과 양호한 일치를 보여준다. 삽입된 그림은 실제로 제조된 블레이즈드 격자(1100)의 SEM 이미지를 보여준다.

[0413] [0072] 도 11d는 각각, TM 및 TE 조명 하에서 각각 도 11c의 위상 리타데이션 스펙트럼(1132)에 대응하는, 120 nm의 빔 폭을 갖는 나노빔 어레이를 포함하는 파장판의 시뮬레이팅된 흡수 스펙트럼들(1144 및 1148)을 예시한다. 인서트들(1152 및 1156)은 각각, 600nm의 파장에서 TE 조명의 자기장 분포(|Hy|) 및 TM 조명의 자기장 분포(|Ey|)를 예시한다.

[0414] [0073] 도 11c 및 도 11d를 참조하면, 어떠한 이론에도 얽매임 없이, 예컨대 위상 리타데이션 스펙트럼(1132)에 의해 예시된 바와 같은 위상 리타데이션에서의 실질적인 스윙(swing)은 흡수 스펙트럼(1148)에 의해 표시된 바와 같이 TE 조명 하에서 비교적 강한 공명 및 흡수 스펙트럼(1144)에 의해 표시된 바와 같이 비교적 약한 2-차 TM 공명에 기인할 수 있다. 공명의 차수는 나노빔 내부의 필드 최대치의 수에 의해 결정된다(도 11d, 인서트들). 예시된 바와 같이, 예컨대 흡수 스펙트럼(1148)에 의해 예시된 바와 같은 어레이의 TE 흡수 공명 및 예컨대 위상 리타데이션 스펙트럼(1132)에 의해 예시된 바와 같은 위상 리타데이션에서의 연관된 스윙은 폭을 포함한, 나노빔들(1104)의 피치 크기들을 변경함으로써 부분적으로 스펙트럼으로 튜닝될 수 있다.

[0415] [0074] 이하에서, 도 12a 내지 12h를 참조하여, 기하학적으로 회전된 파장판 엘리먼트들에 기초한 기하학적 PB 위상의 구조(1200)가 설명된다. 특히, π 의 위상 리타데이션을 갖는 반파장판으로 구성된 PB 위상이 설명된다. 8개의 반파장판 엘리먼트들은 균등하게 이격되게 배열될 수 있고 이웃하는 파장판들 사이에 일정한 배향 각도 차이($\Delta \theta$)를 특징으로 한다. 예시적인 목적들로, 하부 열은 좌측 원형 편광, 즉 |LCP> 상태를 갖는 입사 광빔의 편광 벡터의 회전을 개략적으로 도시한다. 중간 행은 도 11a 내지 도 11d를 참조하여 설명된 것들과 유사한 나노빔 어레이들로부터 구성된 반파장판 엘리먼트를 예시하며, 이들의 고속 축은 수직 축에 대해 상이한 각도들(θ)로 배향된다. 상부 열은 파장판 엘리먼트들을 통해 투과된 뒤의 광의 대응하는 편광 벡터들을 개략적으로 예시한다. 파장판의 고속 축의 원형 편광들 및 반-시계방향 배향 각도는 광원의 관점으로부터 정의된다.

[0416] [0075] 여전히 도 12a 내지 도 12h를 참조하면, 입사 광빔은 x 및 y 방향들에서 각각 동일한 진폭들을 갖는 편광 벡터들(1204 및 1208) 및 편광 벡터들 사이의 $\pi/2$ 의 위상 지연(1212)에 의해 설명될 수 있다. 동작에서, 반파장판은 π 의 위상만큼 2개의 수직 편광들 사이의 위상을 시프트함으로써 작동한다. 이 액션의 순 결과는 저속 축을 따라 지향되는 전기장을 플립(flip)하고 고속 축을 따른 전기장을 유지하는 것이다. 이 액션은 또한, 오리지널 편광 벡터가 미러로서 역할을 하는 고속 축을 통해 그의 미러 이미지로 플립되는 액션으로서 간주될 수 있다. 편광 벡터가 적시에 회전하는 나선형 입사 상태(helical incident state)를 고려할 때, 이는 파장판의 액션은 헬리시티를 |LCP>로부터 |RCP>로 또는 그 반대로 스위칭하는 것임을 알 수 있다.

[0417] [0076] 도 12a의 하부 행을 참조하면, 입사 |LCP> 빔의 전기장은 벡터(1204)에 의해 표시된 바와 같이, 초기 시간 $t=t_0$ 에서 양의 y 축에서 상향으로 지향된다. 1/4의 광학 사이클(즉, $\pi/2$) 후에, 광은 벡터(1208)에 의해 표현된 바와 같이, 음의 y-방향을 따라 지향된다. 도 12a의 중간 열에서 파장판의 액션은 고속 축의 평면 및 광의 전파 방향에 배치된 미러에서 벡터들(1204 및 1208)을 미러링하는 것이다. 이 미러의 액션은 벡터(1204)를 양의 x-방향으로 플립하고 벡터(1208)를 오리지널 방향으로 유지하는 것이다. 결과적으로, |LCP> 빔이 |RCP> 빔으로 변형된다.

[0418] [0077] 도 12b 내지 도 12h는 각각, 파장판들의 고속 축들이 $\pi/4$, $\pi/2$, $3\pi/4$, π , $5\pi/4$, $3\pi/2$ 및 $7\pi/4$ 각도(θ)만큼 회전될 때 |LCP> 빔의 편광 벡터가 어떻게 변하는지를 예시한다. 회전 각도에 독립적으로, |RCP> 출력 빔이 생성된다. 그러나, 도 12a를 참조하여 벡터들(1204 및 1208)의 생성된 위상 지연은 $\phi_g=2\theta$ 에 의해 주어진다. 예컨대, 도 12e에 도시된 바와 같이 $\theta=\pi/2$ 일 때, 파장판의 액션은 벡터(1204)를 동일한 방향으로 유지하면서, 벡터(1208)를 음의 y-방향에서 양의 y-방향으로 플립하는 것이다. 이는 LCP의 입사광에 대해 $\phi_g=2\theta=\pi$ 만큼 지연된 |RCP> 빔을 생성한다. 따라서, 예시된 반파장판의 경우, 도 12a에 도시된 상태가 도달되기 전에 1/2의 광학 사이클이 더 걸릴 것이다.

[0419] [0078] 따라서, 예시적인 예로서, 균등하게 이격되고 이웃들 사이에 일정한 배향-각도 차이, 예컨대, $\Delta \theta=\pi/8$ 을 특징으로 하는 8개의 반파장판 엘리먼트들을 통과한 후, 투과된 RCP 파들은 이웃하는 파장판들 사이에서 일정한 위상차 $\Delta \phi_g = \pi/4$ 를 디스플레이한다. 0과 π 사이에서 변동되는 고속-축 배향을 갖는 8개의 파장판

엘리먼트들을 사용함으로써, 전체 $0-2\pi$ 범위를 커버하는 위상 리타레이션/픽업들 달성될 수 있다. 그러나, 가시 광에 대한 높은 회절 각도를 갖는 반파장판 엘리먼트들을 제조하는 것은 난제일 수 있다. 이는, 회절 각도는 다른 것들 중에서도, 주기적으로 반복되는 파장판 엘리먼트들의 주기의 길이에 의존하고 비교적 짧은 길이의 주기 내에 기간 내에 비교적 높은 수의 반파장판 엘리먼트들을 형성하는 것은 공간적 제약들로 인해 어려울 수 있기 때문이다. 이하에서, 위상 리타레이션/픽업들이 달성될 수 있는 회절 격자의 실시예들은 비교적 높은 회절 각도들 및 회절 효율들뿐만 아니라 비교적 넓은 입사각에 걸친 회절 효율들의 균일성으로 전체 $0-2\pi$ 범위를 커버한다.

[0420] **기하학적 위상 메타표면들에 기초한 회절 격자**

[0421] [0079] PBOE들을 포함하는 메타표면들의 애플리케이션은 다양한 다른 애플리케이션들 중에서도 회절 격자들, 예컨대 블레이즈드 격자들, 포커싱 렌즈들 및 액시콘들을 포함한다. 본원에서 설명된 바와 같이, 블레이즈드 격자는 광빔들을 몇 개의 회절 차수들로 스티어링할 수 있다. 블레이즈드 격자는 하나 이상의 회절 차수들, 예컨대 +1 및/또는 -1 회절 차수들에서 높은 격자 효율을 달성하도록 구성될 수 있으며, 이에 따라 광학 파워(optical power)는 원하는 회절 차수(들)에 집중되는 반면, 다른 차수들(예컨대, 0차)의 잔류 파워는 낮다. 본 개시내용에서, 회절 격자들로서 구성된 PBOE들을 포함하는 메타표면들의 다양한 실시예들이 설명된다. 다양한 실시예들에 따른 회절 격자들은 높은 회절 각도, 높은 회절 효율, 광범위한 수용 각도(acceptance angle) 및 수용 각도의 범위 내의 매우 균일한 회절 효율 중 하나 이상을 포함하는 바람직한 광학 성질들의 조합을 갖는다. 이러한 바람직한 광학 성질들은 메타표면들의 엘리먼트들의 재료, 치수들 및 기하학적 구성들을 포함하는 다양한 독창적인 양상들의 조합에 기인할 수 있다.

[0422] [0080] 본원에서 설명된 바와 같이, 가시 광은 적색, 녹색 또는 청색 컬러 범위들을 포함하는 다양한 컬러 범위들에서 하나 이상의 파장들을 갖는 광을 포함할 수 있다. 본원에서 설명된 바와 같이, 적색 광은 약 620-780 nm 범위의 하나 이상의 파장들의 광을 포함할 수 있고, 녹색 광은 약 492-577nm 범위의 하나 이상의 파장들의 광을 포함할 수 있으며, 청색 광은 약 435-493nm 범위의 하나 이상의 파장들의 광을 포함할 수 있다. 따라서, 가시 광은 약 435nm 내지 780nm 범위의 하나 이상의 파장들의 광을 포함할 수 있다.

[0423] [0081] 본원에서 설명된 바와 같이, 평행한, 명목상 평행한 또는 실질적으로 평행한 피쳐들, 예컨대 나노빔들, 라인들, 라인 세그먼트들 또는 유닛 셀들은 신장 방향들에서 약 10% 미만, 약 5% 미만 또는 약 3% 미만만큼 차이 나는 신장 방향들을 갖는 피쳐들을 지칭한다. 게다가, 수직인, 명목상 수직인 또는 실질적으로 수직인 피쳐들은, 약 10% 미만, 약 5% 미만 또는 약 3% 미만만큼 신장 방향에서 90도로부터 벗어나는 신장 방향들을 갖는 피쳐들을 지칭한다.

[0424] [0082] 본원에서 설명된 바와 같이, 회절 격자들과 같이 광을 회절시키도록 구성된 구조들은 투과 모드 및/또는 반사 모드에서 광을 회절시킬 수 있다. 본원에서 설명된 바와 같이, 투과 모드에서 광을 회절시키도록 구성된 구조는, 광-입사 측과 동일한, 구조들의 측 상의 회절된 광의 세기와 비교하여, 광-입사 측과 대향하는, 구조들의 측 상에서 회절된 광의 세기가 더 큰, 예컨대, 적어도 10% 더 큰, 20% 더 큰, 또는 30% 더 큰 구조들을 지칭한다. 대조적으로, 반사 모드에서 광을 회절시키도록 구성된 구조는, 광-입사 측과 대향하는, 구조들의 측 상의 회절된 광의 세기와 비교하여, 광-입사 측과 동일한, 구조들의 측 상에서 회절된 광의 세기가 더 큰, 예컨대, 적어도 10% 더 큰, 20% 더 큰, 또는 30% 더 큰 구조들을 지칭한다.

[0425] [0083] 본원에서 설명된 바와 같이, 빔 또는 나노빔으로서 또한 지칭되는 라인은 볼륨을 갖는 신장된 구조이다. 라인들은 임의의 특정 단면 형상으로 제한되지 않는다는 것이 인지될 것이다. 일부 실시예들에서, 단면 형상은 직사각형이다.

[0426] [0084] 도 13a 및 도 13b는 각각, 일부 실시예들에 따라, 기하학적 위상 광학 엘리먼트들을 갖는 메타표면을 포함하는 회절 격자(1300)의 측 단면도 및 하향식 도를 예시한다. 회절 격자(1300)는 2-레벨 기하학적 위상 메타표면을 포함한다. 도 13a를 참조하여 예시된 측 단면도는 도 13b에 예시된 단면 AA'의 것이다. 회절 격자(1300)는 가시 스펙트럼의 파장을 갖는 광을 회절시키도록 구성된 메타표면(1308)이 형성된 표면을 갖는 기관(1304)을 포함한다. 메타표면(1308)은 제1 배향을 갖고 일반적으로 제1 측방향(예컨대, y-방향)으로 연장되는 하나 이상의 제1 라인들 또는 나노빔들(1312) 및 제2 방향(예컨대, X-방향)으로 일반적으로 연장되는 제2 배향을 갖는 복수의 제2 라인들 또는 나노빔들(1316)을 포함한다. 제1 라인들 또는 나노빔들(1312)은 나노빔들의 제1 세트를 형성하는 것으로 간주될 수 있고, 제2 라인들 또는 나노빔들(1316)은 나노빔들의 제2 세트를 형성하는 것으로 간주될 수 있다. 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316)은 제2 방향으로 서로 인접하게 배치되고, 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316)은 메타표면이 회절시키도록 구성되는 광의 파장 미만의 주기

에서 제2 방향으로 교번적으로 반복된다.

- [0427] [0085] 바람직하게는, 제1 라인들(1312) 각각은 동일한 폭을 갖는다. 일부 실시예들에서, 제2 라인들(1316)은 하나 이상의 제1 라인들(1312)의 인접 쌍들 사이에서 y-방향으로 측 방향으로 스택된다. 이론에 의해 제한됨 없이, 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316)은 바람직하게는, 하나 이상의 제1 라인들(1312)에 의해 회절된 가시 광과 제2 라인들(1316)에 의해 회절된 가시 광 사이의 위상차를 야기하도록 서로에 대해 일정 각도로 배향되며, 여기서, 하나 이상의 제1 라인들(1312)에 의해 회절된 가시 광과 제2 라인들(1316)에 의해 회절된 가시 광 사이의 위상차는 각도의 두 배이다.
- [0428] [0086] 일부 실시예들에서, 도 12a 내지 도 12h를 참조하여 위에서 예시된 파장판들의 조합과 유사하게, 제2 라인들(1316)에 대한 하나 이상의 제1 라인들(1312)의 상대적 배향들(이는 0과 π 사이에서 변동될 수 있음)에 의해 위상차가 야기되지만, 전체 0- 2π 범위를 커버하는 위상 픽업들/리타레이션들이 달성될 수 있다. 일부 실시예들에서, 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316) 중 하나가 서로에 대해 π 만큼 회전될 때 예컨대 서로 수직일 때, 2π 의 위상 픽업/리타레이션이 하나 이상의 제1 라인들(1312)과 제2 라인들(1316) 사이에서 달성될 수 있다. 즉, 도 12a 내지 도 12h와 달리, 전체 0- 2π 범위를 커버하는 위상 픽업들/리타레이션들은 일부 실시예들에 따라, 단 2개의 상이한 방향으로 배향된 라인들을 갖는 2-레벨 기하학적 위상 메타표면들에 기초하여 달성될 수 있다. 유리하게는, 도 12a 내지 도 12h, 즉 도 12a 내지 도 12h를 참조하여 예시된 파장판들의 조합과 달리, 예시된 메타표면(1308)에 의해 점유된 풋프린트는 보다 콤팩트고, 가시 스펙트럼의 파장 이하의 주기를 가지며, 이는 결국, 회절된 빔들(1338, 1342)의 비교적 높은 회절 각도(θ)를 가능하게 한다.
- [0429] [0087] 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316)은 광학적으로 투과성 재료로 형성된다. 본원에서 그리고 본 명세서 전반에 걸쳐 설명된 바와 같이, "투과성" 또는 "투명" 구조, 예컨대, 투과성 기관은, 입사광의 적어도 일부 예컨대, 적어도 20, 30, 50, 70 또는 90%를 통과시킬 수 있다는 것이 인지될 것이다. 따라서, 투명 기관은 일부 실시예들에서 유리, 사파이어 또는 중합체 기관일 수 있다. "반사" 구조, 예컨대 반사 기관은 그로부터 입사광의 적어도 일부, 예컨대, 적어도 20, 30, 50, 70, 90% 이상을 반사시킬 수 있다.
- [0430] [0088] 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316)은, 페이지로부터 돌출하고, 페이지를 따라 연장되며 폭을 갖는 돌출부들, 움기부들, 주름들 또는 나노와이어들인 것으로서 설명될 수 있다. 부가적으로 또는 대안적으로, 인접한 제1 라인들(1312) 사이 그리고/또는 인접한 제2 라인들(1316) 사이의 분리 영역들은 페이지 내로 리세스되고 간격을 갖는 함몰부들, 트로프(trough)들, 리세스들 또는 트렌치들인 것으로서 설명될 수 있다. 일부 실시예들에서, 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316)은 y-z 평면에서 실질적으로 직사각형 단면 형상을 갖는 신장된 직사각형 구조들이다. 그러나, 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316)이 원형, 타원형, 삼각형, 평행 사변형, 마름모꼴, 사다리꼴, 오각형의 형상 또는 임의의 적합한 형상을 취하는 단면 형상을 갖는 다른 실시예들이 가능하다.
- [0431] [0089] 이하에서, 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316)의 치수들 및 기하학적 어레이먼트를 포함하는 다양한 구성들이 기술되며, 이들의 조합된 효과는 비교적 높은 회절 각도, 비교적 높은 회절 효율, 비교적 광범위한 수용 각도 및 수용 각도의 범위 내에서 비교적 균일한 효율 중 하나 이상을 포함하여, 본원에서 설명된 바람직한 광학 성질들을 갖는 기하학적 위상 광학 엘리먼트들에 기초하여 격자를 생성하는 것이다.
- [0432] [0090] 여전히 도 13a 및 도 13b를 참조하면, 동작에서, 입사 광빔(1330), 예컨대 가시 광이, 제1 라인들(1312)에 평행한 방향 예컨대, y-z 평면으로 연장되고 표면(1304S)에 수직인 평면에 대해 측정되는 입사각(α)으로 메타표면(1308) 상에 입사될 때, 격자(1300)는 투과된 광빔(1334)으로서 입사광을 부분적으로 투과시키고 회절 각도(θ_1)에서 +1차수의 회절된 광빔(1342) 및 회절 각도(θ_2)에서 -1차수의 회절된 광빔(1338)으로서 입사 광을 부분적으로 회절시키며, 여기서, 회절 각도들은 α 를 측정한 바로 그 평면, 예컨대, y-z 평면에 대해 측정된다. 회절된 광빔들(1338 및 1342) 중 하나 또는 둘 모두가 도파관으로서 구성된 기관(1304)에서의 내부 전반사의 발생을 위한 임계각(θ_{TIR})을 초과하는 회절 각도로 회절될 때, 회절된 광빔들(1338 및 1342)은 광빔들이, 광 분배 엘리먼트들(730, 740, 750) 및 아웃-커플링 광학 엘리먼트들(800, 810, 820)(도 9b)에 대응할 수 있는 OPE들/EPE들(1346)에 도달할 때까지, TIR(total internal reflection) 하에서 x-축을 따라 그의 각각의 대향하는 방향으로 전파된다.
- [0433] [0091] 다양한 실시예들에 따라, 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316)은 회절 효율이 높은 레벨에 있도록 광자들의 낮은 옴 손실(Ohmic loss)을 제공하는 재료로 형성된다. 어떠한 이론에도 얽매임 없이, 다른 것들 중에서도, 광자들의 옴 손실은, 제1 라인들(1312) 및/또는 제2 라인들(1316)이 금속성인 재료 대 반도

체성 또는 절연성인 재료로 형성되는지에 의존할 수 있다. 본원에서 설명된 바와 같이, 재료가 금속성, 반도체성 또는 절연성인지 여부는 에너지-파 벡터 공간 또는 E-k 공간에서의 재료의 전자 에너지 대역 구조에 의존할 수 있다. 전자 에너지 대역 구조는 가전자대(valence band)으로서 또한 지칭될 수 있는 HOMO(highest occupied molecular orbital) 및 전도대(conduction band)으로서 또한 지칭될 수 있는 LUMO(lowest unoccupied molecular orbital)를 갖는 것으로서 설명될 수 있다. 절연체는 메타표면이 회절시키도록 구성된 파장 범위에 대응하는 에너지를 실질적으로 초과하는, HOMO와 LUMO 사이의 에너지의 차이를 갖는다. 반도체는 메타표면이 회절시키도록 구성된 파장 범위에 대응하는 에너지와 실질적으로 비견 가능한, HOMO와 LUMO 사이의 에너지의 차이를 갖는다. 본원에서 설명된 바와 같이, 금속은 0 또는 음수인, HOMO와 LUMO 사이의 에너지의 차이를 갖는다. 결과적으로, 금속들은 상당한 농도의 자유 또는 옮겨다니는 전자(delocalized electron)들을 갖는다. 자유 또는 옮겨다니는 전자들은 집합적으로 광과 상호작용하여 플라즈몬들을 생성할 수 있으며, 이는 자유 전자들의 플라즈마 오실레이션의 양자화를 일으키는 준입자들을 지칭한다. 치수들 중 적어도 하나, 예컨대, 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316)의 폭이 충분히 작을 때, 예컨대, 입사광의 파장보다 작을 때, 플라즈몬들은 표면들로 국한되고 광과 강하게 상호작용하게 될 수 있어, 표면 플라즈몬을 발생시킨다. 일부 상황들 하에서, 입사 광자들의 주파수가 양의 핵의 복원력에 대해 오실레이팅하는 표면 전자들의 고유 주파수(natural frequency)와 매칭할 때, SPR(surface plasmon resonance)이 발생할 수 있어, 전도 전자들의 공명 오실레이션을 발생시킨다.

[0434] [0092] 어떠한 이론에도 얽매임 없이, 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및/또는 제2 라인들(1316)이 금속으로 형성될 때, 광자들의 음 손실은 SPR 파장들에서 또는 그 근처에서 발생할 수 있는 플라즈몬 공명에 의해 적어도 부분적으로 야기될 수 있다. 따라서, 일부 실시예들에서, 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316) 각각은, 일부 실시예들에 따라, 자유 전자들의 농도가 예컨대 약 $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ 미만, 약 $1 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ 미만, 약 $1 \times 10^{17} / \text{cm}^3$ 미만, 또는 약 $1 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ 미만인 비금속성 재료, 예컨대, 반도체 또는 절연체로 형성된다. 그러나 실시예들은 이에 제한되지 않고, 일부 실시예들에서, 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316) 중 하나 또는 둘 다는 금속들로 형성될 수 있다.

[0435] [0093] 여전히 도 13a 및 도 13b를 참조하면, 본 발명자들은 일부 실시예들에서, 반도체 또는 절연체를 사용하여 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316)을 형성하는 것이 유리할 수 있으며, 이는, 플라즈몬 생성으로부터 발생하는 낮은 레벨의 음 손실을 제공하고 상응하게 회절 효율을 증가시킬 수 있음을 발견하였다. 결과적인 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316)은 투과된 광에 편광-의존적 위상 시프트를 부과하고 그의 위상 및 편광 둘 모두를 수정한다. 어떠한 이론에도 얽매임 없이, 반도체 또는 절연체로 형성될 때, 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316) 각각은 유효 굴절률을 갖는 패브리-페로(Fabry-Perot) 공명기로서 동작하고 투과된 광에 편광-의존적 위상 시프트를 부과하는 도파관으로서 간주될 수 있다. 플라즈몬 생성으로 인한 음 손실을 감소시키고 회절 효율을 증가시키기 위해, 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316)은, 본원에서 논의되는 바와 같이 비교적 낮은 자유 전자 농도, 비교적 높은 벌크 굴절률을 포함하는 소정의 재료 성질들을 갖는 재료로 형성된다.

[0436] [0094] 위에서 논의된 바와 같이, 높은 회절 효율을 제공하기 위해, 다른 이점들을 실현하는 것 외에도, 제1 라인들(1312) 및/또는 제2 라인들(1316)이 비교적 더 낮은 농도의 자유 전자들을 갖는 재료로 형성되게 하는 것이 바람직할 수 있다. 따라서, 반도체 또는 절연체로 형성될 때, 다양한 실시예들 하에서, 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316) 각각은 자유-전자 생성 도펀트들로 의도적으로 도핑되지 않거나, 또는 의도적으로 도핑될 때, 이들은 다양한 실시예들에 따라, 약 $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ 미만, 약 $1 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ 미만, 약 $1 \times 10^{17} / \text{cm}^3$ 미만, 또는 약 $1 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ 미만의 농도의 도펀트, 예컨대, n-형 도펀트로 도핑된다. 어떠한 이론에도 얽매임 없이, 비교적 낮은 도펀트 농도는, 예컨대 다른 이점들 중에서도 플라즈몬 생성 및/또는 표면 플라즈몬 공명으로부터 발생하는 음 손실을 감소시키는 데 유리할 수 있다.

[0437] [0095] 어떠한 이론에도 얽매임 없이, 제1 라인들(1312) 및/또는 제2 라인들(1316)이 반도체 또는 절연체로 형성될 때, 플라즈몬 흡수로부터 발생하는 음 손실이 감소될 수 있지만, 탄성 및 비탄성 전자 트랜지션들을 포함하는, 광자-흡수 전자 트랜지션들로부터 발생하는 광학 흡수로부터 일부 음 손실이 여전히 발생하는 것으로 여겨진다. 예컨대, 반도체 또는 절연체의 LUMO와 HOMO 사이의 대역 갭보다 큰 에너지를 갖는 광자가 흡수되어, 전자-정공 쌍들의 생성을 초래할 때 광학 흡수가 발생할 수 있다. 따라서, 광자-흡수 전자 트랜지션들로부터 발생하는 광학 흡수를 감소시키는 것이 유리할 수 있다. 따라서, 일부 실시예들에서, 제1 라인들(1312) 및/또

는 제2 라인들(1316)은 가시 스펙트럼의 파장을 갖는 입사광에 대해, 흡수 계수 값이 약 $5 \times 10^5 / \text{cm}$ 미만, 약 $1 \times 10^5 / \text{cm}$ 미만, $5 \times 10^4 / \text{cm}$ 미만 또는 $1 \times 10^4 / \text{cm}$ 미만, 약 $5 \times 10^3 / \text{cm}$ 미만, 약 $1 \times 10^3 / \text{cm}$ 미만, 약 $5 \times 10^2 / \text{cm}$ 미만인 재료로 형성되거나, 또는 흡수 계수 값이 위의 값들 중 임의의 것에 의해 정의된 범위 내에 있는 재료로 형성될 수 있다.

[0438] [0096] 어떠한 이론에도 얽매임 없이, 서브파장 피쳐 크기들을 갖는 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316)이 누설 모드 공명(leaky mode resonance)들을 지원할 때, 이들은 광을 한정할 수 있고, 그리하여 TE 및 TM 조명 하에서 생성된 산란된 광파들에서의 위상 리타데이션을 야기할 수 있다. 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316)에서의 광의 한정 효과는 도파관들이 공명기들로서 동작하게 구성됨으로써 발생할 수 있고, 결과적인 회절 효율은 다른 팩터들 중에서도, 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316)의 서브파장 치수들 및 재료들의 굴절률에 의존할 수 있다는 것이 발견되었다.

[0439] [0097] 따라서, 일부 실시예들에서, 제1 라인들(1312) 및/또는 제2 라인들(1316)은 2.0 초과, 2.5 초과, 3.0 초과, 3.3 초과, 3.5 초과, 또는 이들 값들 중 임의의 것 사이의 범위에 있는 값을 갖는 벌크 굴절률($n_{1 \text{ bulk}}$)을 갖는 재료로 형성되게 하는 것이 바람직할 수 있다. 일부 실시예들에서, $n_{1 \text{ bulk}}$ 는 회절 격자(1300)가 회절시키도록 구성된 파장, 예컨대 가시 파장에서 측정된다.

[0440] [0098] 다른 이점들 중에서도, 비교적 높은 굴절률은 소정의 반도체 재료들을 사용하여 제1 라인들(1312) 및/또는 제2 라인들(1316)을 형성함으로써 달성될 수 있다. 일부 실시예들에서, 반도체 재료로 형성될 때, 제1 라인들(1312) 및/또는 제2 라인들(1316)은 원소 IV 족 재료(예컨대, Si, Ge, C 또는 Sn) 또는 IV 족 재료들(예컨대, SiGe, SiGeC, SiC, SiSn, SiSnC, GeSn 등)로 형성된 합금; III-V 족 화합물 반도체 재료들(예컨대, GaP, GaAs, GaN, InAs 등) 또는 III-V 족 재료들로 형성된 합금; II-VI 족 반도체 재료들(CdSe, CdS, ZnSe 등) 또는 II-VI 족 재료들로 형성된 합금으로 형성될 수 있다. 이들 재료들 각각은 결정질, 다결정질 또는 비정질일 수 있다.

[0441] [0099] 일부 실시예들에서, 제1 라인들(1312) 및/또는 제2 라인들(1316)은 실리콘, 예컨대 실리콘, 비정질 실리콘 또는 다결정 실리콘으로 형성된다. 실리콘으로 형성될 때, 실리콘-프로세싱 기술들을 사용하여 보다 쉽게 제조되거나 통합될 수 있다.

[0442] [0100] 다른 이점들 중에서도, 비교적 높은 굴절률은 또한 소정의 절연체들 사용하여 제1 라인들(1312) 및/또는 제2 라인들(1316)을 형성함으로써 달성될 수 있다. 절연체로 형성될 때, 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및/또는 제2 라인들(1316)은 일부 실시예들에 따라 그의 화학량론적 및 아화학량론적 형태들을 포함해서, 전이 금속, 예컨대, 티타늄, 탄탈륨, 하프늄, 지르코늄 등을 포함하는 산화물로 형성될 수 있다. 이러한 산화물들의 예들은 예컨대, 티타늄 산화물, 지르코늄 산화물 및 아연 산화물을 포함한다.

[0443] [0101] 제1 라인들(1312) 및/또는 제2 라인들(1316)은 또한, 일부 다른 실시예들에 따라, 그의 화학량론적 및 아화학량론적 형태들을 포함해서, IV 족 원소 예컨대, 실리콘의 산화물, 질화물 또는 산질화물로 형성될 수 있다. 이러한 절연체의 예들은 예컨대 실리콘 산화물(SiO_x), 실리콘 질화물(SiN_x) 및 실리콘 산질화물(SiO_xN_y)을 포함한다.

[0444] [0102] 일부 실시예들에서, 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316)은 동일한 반도체 또는 절연체 재료로 형성될 수 있고, 이는 메타표면(1308)의 제조를 단순화하는 데 유리할 수 있다. 그러나 다양한 실시예들은 이에 제한되지 않고, 일부 실시예들에서, 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316)은 상이한 반도체 또는 절연 재료들로 형성될 수 있다.

[0445] [0103] 도 13a 및 도 13b를 계속 참조하면, 위에서 설명된 다양한 재료들로 형성되는 것 외에도, 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316)은 광의 위상 시프트들을 유도하는 서브파장-크기의 공명기들로서 역할을 하는 특정 치수들의 결합을 갖는다.

[0446] [0104] 다양한 실시예들에서, 제1 라인들(1312)의 W_{nano1} 및 제2 라인들(1316)의 W_{nano2} 각각은 메타표면(1308)이 회절시키도록 구성된 광의 파장보다 작고, 바람직하게는 가시 스펙트럼의 파장보다 작다. 일부 실시예들에서, W_{nano1} 및 W_{nano2} 각각은 10nm 내지 1 μm , 10nm 내지 500nm, 10nm 내지 300nm, 10nm 내지 100nm 또는 10nm 내지 50nm의 범위에 있는데, 예컨대 30nm이다. 일부 실시예들에 따라, 하나 이상의 제1 라인들(1312) 각각은 동일한 폭(W_{nano1})을 갖는다. 일부 실시예들에 따라, 제2 라인들(1316) 각각은 동일한 폭(W_{nano2})을 갖는다. 일부 실시

예들에 따라, 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316)은 동일한 폭을 갖는데, 즉 $W_{\text{nano1}}=W_{\text{nano2}}$ 이다. 그러나, 일부 다른 실시예들에서, W_{nano1} 및 W_{nano2} 는 실질적으로 상이할 수 있다. 또한, 일부 실시예들에서, 하나 이상의 제1 라인들(1312) 중 다른 라인들 및/또는 제2 라인들(1316) 중 다른 라인들은 상이한 폭들을 가질 수 있다.

[0447] [0105] 일부 실시예들에 따라, 제2 방향에서 하나 이상의 제1 라인들(1312) 중 바로 인접한 라인들은 일정한 간격(s_1)에 의해 분리된다. 또한, 제2 방향에서 서로 바로 인접한, 하나 이상의 제1 라인들(1312) 중 하나 및 제2 라인들(1316) 중 하나는 일정한 간격(s_2)에 의해 분리된다. 일부 실시예들에 따라, s_1 및 s_2 중 하나 또는 둘 모두는 메타표면(1308)이 회절시키도록 구성된 파장보다 작다. 또한, 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316)은 각각 높이들(h_{nano1} 및 h_{nano2})을 갖는다. 간격들(s_1 , s_2) 및 높이들(h_{nano1} 및 h_{nano2})의 특정 조합은, 때로는 FOV(field-of-view) 또는 수각 각도의 범위로 지칭되는 입사각(α)의 원하는 범위($\Delta\alpha$)가 획득되도록 선택될 수 있다. 본원에서 설명된 바와 같이 원하는 범위($\Delta\alpha$)는 α 의 음 및 양의 값들에 걸친 각도의 범위에 의해 설명될 수 있으며, 이 범위 밖에서, 회절 효율은 $\alpha=0$ 에서의 회절 효율에 비해, 10% 초과, 25% 초과, 50% 초과, 또는 75% 초과만큼 떨어진다. 예컨대, $\Delta\alpha$ 내에서 회절된 광의 균일한 세기가 바람직한 경우, 회절 효율이 비교적 평탄한 $\Delta\alpha$ 를 갖는 것이 바람직할 수 있다. 다시 도 13a를 참조하면, 입사 광빔(1330)은 표면 법선, 예컨대 y - z 평면에 대해 각도(α)로 도파관(1304)의 표면 및 메타표면(1308) 상에 입사된다. 일부 실시예들에 따라, 위에서 설명된 바와 같이, $\Delta\alpha$ 는 메타표면(1308)에 대한 각도 대역폭과 연관되어서, $\Delta\alpha$ 내의 광빔(1330)은 표면 법선(예컨대, y - z 평면)에 대해 회절 각도(θ)에서 메타표면(1308)에 의해 효율적으로 회절되게 한다. 특히, θ 가 θ_{TIR} 이거나 이를 초과할 때, 회절된 광은 TIR(total internal reflection) 하에서 기판(1304) 내에서 전파된다.

[0448] [0106] $\Delta\alpha$ 는, 제2 방향에서 하나 이상의 제1 라인들(1312) 중 인접한 라인들 및 제1 방향에서 제2 라인들(1316) 중 바로 인접한 라인들에 의해 생성된 그림자 효과에 의존할 수 있다는 것이 발견되었다. 즉, 입사 광빔(1330)이 소정의 값보다 큰 입사각(α)으로 입사될 때, 피처를 향해 지향되는 입사 광빔은 바로 인접한 피처에 의해 차단될 수 있다. 예컨대, $\Delta\alpha$ 는 s_1/h_{nano1} , s_2/h_{nano1} 및/또는 s_2/h_{nano1} 의 아크탄젠트와 연관될 수 있다. 다양한 실시예에서, 비들(s_1/h_{nano1} , s_2/h_{nano1} 및/또는 s_2/h_{nano1})은, $\Delta\alpha$ 가 20도(예컨대, +/- 10도), 30도(예컨대, +/- 15도), 40도(예컨대, +/- 20도) 또는 50도(예컨대, +/- 25도)를 초과하거나, 또는 이들 값들 중 임의의 것에 의해 정의된 각도들의 범위 내에 있도록 선택된다. 원하는 비들(s_1/h_{nano1} , s_2/h_{nano1} 및/또는 s_2/h_{nano1})은, 예컨대, s_1 및 s_2 각각이 10nm 내지 1 μm , 10nm 내지 300nm, 10nm 내지 100nm 또는 10nm 내지 50nm의 범위에 있는 경우, 예컨대, 30nm인 경우에 실현될 수 있다 물론, s_1 및 s_2 의 비교적 더 낮은 값들은, h_{nano1} 및 h_{nano2} 가 상응하게 비교적 더 낮은 값들을 갖는 경우에 실현될 수 있다.

[0449] [0107] 유리하게는, 일부 실시예들에 따른 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및/또는 제2 라인들(1316)의 재료들의 비교적 높은 굴절률(n_1)은 비교적 작은 두께 또는 높이를 허용한다. 따라서, 다양한 실시예들에서, 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316)은 h_{nano1} 및 h_{nano2} 를 가지며, 이들은 일부 실시예들에 따라, n_1 에 의존하여, 10nm 내지 1 μm , 10nm 내지 500nm, 10nm 내지 300nm, 10nm 내지 100nm 및 10nm 내지 50nm의 범위에 있는데 예컨대 107nm일 수 있다. 예컨대, h_{nano1} 및 h_{nano2} 는 n_1 이 3.3 초과인 경우 10nm 내지 450nm 및 n_1 이 3.3이하인 경우, 10nm 내지 1 μm 일 수 있다. 다른 예로서, 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316)의 높이는 10nm 내지 450nm일 수 있으며, 여기서 나노빔들은 실리콘(예컨대, 비정질 또는 폴리실리콘)으로 형성된다.

[0450] [0108] 다양한 실시예들에 따라, s_1 과 W_{nano1} 의 조합은, s_1 및 W_{nano1} 의 합으로 정의되는 하나 이상의 제1 라인들(1312)의 피치(p_{nano1})가, 10nm 내지 1 μm , 10nm 내지 500nm, 10nm 내지 300nm, 10nm 내지 100nm 또는 10nm 내지 50nm의 범위들로부터 선택된 W_{nano1} , 및 10nm 내지 1 μm , 10nm 내지 300nm, 10nm 내지 100nm 또는 10nm 내지 50nm

의 범위들로부터 선택된 s_1 의 합에 의해 획득된 값을 갖도록 선택될 수 있는데, 예컨대, $p_{\text{nano}1}=95.5\text{nm}$ 이다.

[0451] [0109] 물론, s_1 및 s_2 의 비교적 작은 값들이 실현될 수 있고, $h_{\text{nano}1}$ 및 $h_{\text{nano}2}$ 는 상응하게 비교적 작은 값들을 갖는다. 유리하게는, 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및/또는 제2 라인들(1316)을 형성하기 위해 비교적 높은 굴절률(n_1)을 갖는 재료를 사용하여, s_1 , s_2 , $h_{\text{nano}1}$ 및 $h_{\text{nano}2}$ 의 비교적 작은 값들이 획득될 수 있다. 이는, 본 발명자들이 발견한 바와 같이, $h_{\text{nano}1}$ 및 $h_{\text{nano}2}$ 가 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316)을 형성하는 재료의 벌크 굴절률에 반비례할 수 있기 때문이다. 따라서, 2.0-2.5, 2.5-3.0, 3.0-3.5 및 3.5보다 높은 벌크 굴절률을 갖는 재료들의 경우, $h_{\text{nano}1}$ 및 $h_{\text{nano}2}$ 는 각각, 다양한 실시예들에서, 500nm 내지 1 μm , 300nm 내지 500nm, 100nm 내지 300 및 10nm 내지 100nm의 범위에 있을 수 있다. 따라서, 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316)의 높은 벌크 굴절률(n_1) 및 대응하는 치수들(s_1 , s_2 , $h_{\text{nano}1}$ 및 $h_{\text{nano}2}$)을 갖는 재료의 특정 조합에 의해, 전체 피치(Λ_a)는 또한 아래에서 추가로 설명되는 바와 같이 상응하게 감소될 수 있으며, 이는 결국, 회절 각도(θ)를 증가시킨다.

[0452] [0110] 바람직하게는, $h_{\text{nano}1}$ 및 $h_{\text{nano}2}$ 는 실질적으로 동일하며, 이는 제조에 유리할 수 있다. 그러나, 실시예들은 이에 제한되지 않으며, $h_{\text{nano}1}$ 및 $h_{\text{nano}2}$ 는 실질적으로 상이할 수 있다.

[0453] [0111] 다양한 실시예들에서, 제1 라인들(1312) 및/또는 제2 라인들(1316)은 벌크 굴절률($n_{1 \text{ bulk}}$)이 기관(1304)의 굴절률(n_2)보다 높은(즉, $n_{1 \text{ bulk}} > n_2$) 재료로 형성된다. 일부 실시예들에서, 기관(1304)은 도파관으로서 구성될 수 있고, 도파관들(310, 300, 290, 280, 270)(도 6) 및/또는 도파관들(670, 680 및 690)(도 9a)에 대응할 수 있다. 이러한 애플리케이션들에서, 기관은 바람직하게는, $n_{1 \text{ bulk}}$ 미만과 공기의 굴절률 사이에 있는, 예컨대, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9 이상이지만, $n_{1 \text{ bulk}}$ 미만의 굴절률을 가지며, 이는 그 기관(1316)으로부터 광을 출력함으로써 이미지를 형성하는 디스플레이의 $\Delta\alpha$ 를 증가시키는 이득들을 제공할 수 있다. 기관(1304)을 형성하기 위한 재료들의 예들은 실리카 유리(예컨대, 도핑된 실리카 유리), 실리콘 산질화물, 전이 금속 산화물(예컨대, 하프늄 산화물, 탄탈륨 산화물, 지르코늄 산화물, 니오븀 산화물, 리튬 니오베이트, 알루미늄 산화물(예컨대, 사파이어)), 플라스틱, 중합체, 또는 예컨대, 본원에서 설명된 바와 같은 적합한 굴절률을 갖는 다른 광학적으로 투과성 재료를 포함한다.

[0454] [0112] 어떠한 이론에도 얽매임 없이, 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및/또는 제2 라인들(1316)이 위에서 설명된 바와 같이 서브파장 치수들을 가질 때, 제1 라인들(1312) 및/또는 제2 라인들(1316a)의 굴절률들은 그의 벌크 굴절률 값, 즉 $n_{1 \text{ bulk}}$ 로부터 벗어날 수 있다. 예컨대, 기본 공명 모드에 대해, 제1 라인들(1312) 및/또는 제2 라인들(1316)은 유효 굴절률($n_{1 \text{ eff}}$)을 가질 수 있으며, 이는 약 1(광이 대부분 공기에 있을 때)로부터 약 $n_{1 \text{ bulk}}$ (광이 대부분 라인들 및/또는 세그먼트들에 있을 때)로 변동될 수 있다. 따라서, 일부 실시예에서, 충분한 값으로 $n_{1 \text{ eff}} > n_2$ 인 조건을 만족시키는 것이 바람직하다. 따라서, 일부 실시예들에서, 제1 라인들(1312) 및/또는 제2 라인들(1316) 및 기관(1304)에 대한 재료들은, 제1 라인들(1312) 및/또는 제2 라인들(1316)의 재료의 벌크 굴절률($n_{1 \text{ bulk}}$)과 기관(1304)의 굴절률(n_2) 간의 차이($n_{1 \text{ bulk}} - n_2$)가 충분히 크도록, 예컨대, 0.5 이상, 1.0 이상, 1.5 이상, 2.0 이상, 2.5 이상, 또는 3.0 이상이 되도록 선택된다.

[0455] [0113] 여전히 도 13a 및 도 13b를 참조하면, 메타표면(1308)은 적어도 x-방향에서 반복되는 복수의 메타표면 유닛 셀들(1320)을 형성하는 것으로서 설명될 수 있다. 본원에서 설명된 바와 같이, 메타표면 유닛 셀(1320)은 x-방향에서 가장 작은 반복 치수를 갖는 포프린트로서 정의될 수 있으며, 이는 하나 이상의 제1 라인들(1312)과 제2 라인들(1316)을 포함한다. 예로서, 각각의 유닛 셀(1320)은 하나의 유닛 셀(1320)의 제1 라인들(1312) 중 좌측의 것의 좌측 수직 측으로부터 바로 인접한 유닛 셀(1320)의 제1 라인들(1312)의 좌측의 것의 좌측 수직 측까지 측정되는 유닛 셀 폭(1320a)에 걸치며, 그리하여 예시된 실시예들에서 한 쌍의 제1 라인들(1312) 및 y-방향으로 스택된 제2 라인들의 열(1316)을 포함한다.

[0456] [0114] 본원에서 설명된 바와 같이, 메타표면 유닛 셀들(1320)의 측방향 치수, 또는 유닛 셀들(1320)의 반복 유닛들의 주기는 본원에서 유닛 셀 피치(Λ_a)로서 지칭될 수 있다. 피치(Λ_a)는 x-방향으로 도파관(1304)에

걸친 규칙적 간격들로 적어도 2번 반복된다. 즉, 유닛 셀 피치(Λ_a)는 바로 이웃한 유닛 셀들(1320)의 동일한 포인트들 사이의 거리일 수 있다. 다양한 실시예들에서, Λ_a 는 격자(1300)가 회절시키도록 구성된 파장보다 작을 수 있고, 약 435nm 내지 780nm 범위의 파장 또는 임의의 파장보다 작을 수 있다. 적어도 적색 광을 회절시키도록 구성된 일부 실시예들에서, Λ_a 는 약 620-780nm 범위의 파장(또는 임의의 파장)보다 작을 수 있다. 적어도 녹색 광을 회절시키도록 구성된 일부 다른 실시예들에서, Λ_a 는 약 492-577nm 범위의 파장(또는 임의의 파장)보다 작을 수 있다. 적어도 청색 광을 회절시키도록 구성된 일부 다른 실시예들에서, Λ_a 는 약 435-493nm 범위의 파장(또는 임의의 파장)보다 작을 수 있다. 대안적으로, 다양한 실시예들에 따라, Λ_a 는 10nm 내지 500nm 또는 300nm 내지 500nm를 포함한, 10nm 내지 1 μ m의 범위에 있을 수 있다. 본원에서 개시된 메타표면들 각각은 광을 회절시키기 위해 활용될 수 있고 디스플레이 시스템(250)(도 6)의 부분일 수 있으며, 디스플레이 시스템(1000)은 좁은 대역의 파장들을 갖는 메타표면으로 광을 지향시키도록 구성될 수 있다는 것이 인지될 것이다. 바람직하게는, 주어진 메타표면에 대한 Λ_a 는 디스플레이 시스템의 광원이 메타표면으로 지향시키도록 구성되는 파장들의 대역 중 가장 작은 파장보다 작다.

[0457] [0115] 일부 실시예에서, Λ_a 는 비($m\lambda/(\sin \alpha + n_2 \sin \theta)$) 미만의 값을 가질 수 있으며, 여기서 m은 정수(예컨대, 1, 2, 3...)이고 α , n_2 및 θ 는 각각 본 명세서의 다른 곳에 설명된 값들을 갖는다는 것이 발견되었다. 예컨대, α 는 40도를 초과하는 범위($\Delta\alpha$) 내에 있을 수 있고, n_2 는 1-2의 범위에 있을 수 있으며, θ 는 40-80 도의 범위에 있을 수 있다.

[0458] [0116] 일부 실시예들에서, Λ_a 는 복수의 유닛 셀들에 의해 형성된 격자(1300)의 표면(1304S)에 걸쳐 실질적으로 일정할 수 있다. 그러나, 실시예들은 이에 제한되지 않으며, 일부 다른 실시예들에서, Λ_a 는 표면(1304S)에 걸쳐 변동될 수 있다.

[0459] [0117] 여전히 도 13b를 참조하면, 일부 실시예들에서, 제2 라인들(1316) 각각은 적어도 2, 3, 4 이상의 팩터만큼 하나 이상의 제1 라인들(1312) 각각보다 길이가 더 짧다. 그러나, 제2 라인들(1316)이 하나 이상의 제1 라인들(1312)보다 긴 실시예들이 가능하다. 다양한 실시예들에 따라, 하나 이상의 제1 라인들(1312)은 200 μ m-5 mm, 200 μ m-1 mm 또는 1 mm-5 mm 범위의 길이(L_1)를 가질 수 있다. 다양한 실시예들에 따라, 제2 라인들(1316)은 100nm-500nm, 100nm-300nm 및 300nm-500nm 범위의 길이(L_2)를 가질 수 있다. 일부 실시예들에서, 하나 이상의 제1 라인들(1312)은 메타표면에 의해 형성된 광학 엘리먼트의 총 축방향 치수에 대응하는, 예컨대, 라인들(1312)을 포함하는 메타표면에 의해 형성된 인커플링 또는 아웃커플링 광학 엘리먼트의 길이에 대응하는 길이(L_1)를 가질 수 있다. 일부 실시예들에서, 제2 라인들은 유닛 셀 피치(Λ_a)의 약 40% 내지 약 60%, 예컨대 Λ_a 의 약 50%인 길이(L_2)를 갖는다. 일부 실시예들에서, L_1 은 하나 이상의 제1 라인들(1312)이 5개의 제2 라인들(1316)에 대응하는 y-방향의 거리에 걸치도록 이루어진다. 그러나, 하나 이상의 제1 라인들(1312)은 다양한 실시예들에 따라, 하나 초과, 예컨대, 10개 초과, 20개 초과, 50개 초과 또는 100개 초과, 또는 10개, 20개 및 100개 중 임의의 것 사이의 범위에 있는 임의의 적합한 수의 제2 라인들(1316)에 대응하는 y-방향의 거리에 걸쳐 있을 수 있다는 것이 이해될 것이다.

[0460] [0118] 여전히 도 13a 및 도 13b를 참조하면, 일부 실시예들에서, 제2 라인들(1316) 각각은 동일한 길이를 가져서, 제2 라인들(1316)은 x-방향으로 연장되고 하나 이상의 제1 라인들(1312) 중 어느 것보다도 교차하지 않고 함께 종결(coterminate)된다. 그러나, 제2 라인들(1316)이 상이한 길이들을 갖는 실시예들이 가능하다.

[0461] [0119] 여전히 도 13a의 예시된 실시예를 참조하면, 하나 이상의 제1 라인들(1312)의 연장 방향(y-방향)은 제2 라인들(1316)의 연장 방향(x-방향)에 실질적으로 수직이다. 즉, 제2 라인들(1316)은 (즉, 페이지로의) 입사광의 전파 방향에서 볼 때 $\pi/2$ 의 회전 각도만큼 하나 이상의 제1 라인들(1312)에 대해 회전된다. 그러나, 실시예들이 이에 제한되지 않고, 제2 라인들(1316)은, (즉, 페이지로의) 입사광의 전파 방향에서 볼 때, $\pi/2$ 보다 작은 각도만큼 반시계 방향으로 회전되는 임의의 방향으로 연장될 수 있다. 예컨대, 제2 라인들(1316)은 도

12b 내지 도 12h에 예시된 파장판들의 나노빔들이 도 12a에 예시된 파장판에 대해 회전되는 것과 유사한 방식으로 하나 이상의 제1 라인들(1312)에 대해 회전될 수 있다. 예컨대, 제2 라인들(1316)은 각각 $\pi/4$, $\pi/2$, $3\pi/4$, π , $5\pi/4$, $3\pi/2$ 및 $7\pi/4$ 의 회전 각도(θ)만큼 하나 이상의 제1 라인들(1312)에 대해 회전될 수 있다. 따라서, |LCP> 빔이 제1 및 제2 라인들(1312 및 1316)을 갖는 메타표면(1308) 상에 입사될 때, |RCP> 출력 빔이 생성되며, 여기서 TE 및 TM 편광들에 대응하는 편광 벡터들의 결과적인 위상 지연은 $\phi_g=2\theta$ 의 값을 갖고, 여기서, θ 는 파장판들의 고속 축들이 회전 각도(θ)만큼 회전될 때 회전 각도 변화들이다. 특히, 예시된 실시예에서, 하나 이상의 제1 라인들(1312)에 대해 $\theta=\pi/2$ 만큼 회전된 제2 라인들(1316)은 입사 광빔, 예컨대, |LCP> 빔을 회절시키고, 그로써 회절된 |RCP> 빔이 생성되며, 여기서 회절된 빔은 제2 라인들(1316)에 의해 $\phi_g=2\theta=\pi$ 만큼 지연된다. 따라서, 예시된 실시예와 같이, x-방향으로 교번하는 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316)이 $\Delta\theta=\pi/2$ 의 일정한 배향-각도 차이를 갖는 메타표면(1308)을 통과한 후, 투과된 RCP 파들은 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316)의 인접한 것들 사이에 일정한 위상차 $\Delta\phi_g=\pi$ 를 디스플레이한다. 결과적으로, 고속-축 배향이 0과 π 사이에서 변동되게 함으로써, 전체 0- 2π 범위를 커버하는 위상 픽업들/리타레이션들이 달성될 수 있지만, 도 12a 내지 도 12h의 예시된 예와 비교하여 훨씬 더 콤팩트한 유닛 셀 피치 및 더 높은 회절 각도들을 갖는다.

[0462] **기하학적 위상 메타표면-기반 격자들을 갖는 디스플레이 디바이스**

[0120] 본원에서 개시된 바와 같이, 위에서 설명된 다양한 실시예들에서, 메타표면(1308)은 광이 내부 전반사를 통해 기관(1304)을 통해 전파되도록 입사 광을 인커플링하는 인커플링 광학 엘리먼트로서(예컨대, 인커플링 광학 엘리먼트들(700, 710, 720(도 9a)) 중 하나 이상으로서) 구현될 수 있다. 그러나, 메타표면(1308)이 또한 기관(1304) 내부로부터 메타표면에 충돌하는 광을 편향시키도록 구성될 수 있다는 것을 인식하면, 일부 실시예들에서, 본원에서 개시된 메타표면들은 표면(2000a) 상의 상이한 위치들에 인커플링 광학 엘리먼트를 형성하는 것에 추가로 또는 그 대신에, 아웃커플링 광학 엘리먼트들, 이를테면, 아웃커플링 광학 엘리먼트들(570, 580, 590, 600, 610(도 6) 또는 800, 810, 820(도 9b))을 형성하도록 적용될 수 있다. 일부 다른 실시예들에서, 메타표면(1308)은 광 분배 엘리먼트들(예컨대, OPE)(730, 740, 750)(도 9b)로서 활용될 수 있다. 상이한 도파관들이 상이한 연관된 컴포넌트 컬러들을 갖는 경우, 각각의 도파관과 연관된 아웃커플링 광학 엘리먼트들 및/또는 인커플링 광학 엘리먼트들은 도파관이 전파시키도록 구성된 광의 컬러들 또는 파장들에 특정한 기하학적 크기 및/또는 주기성을 가질 수 있다는 것이 인지될 것이다. 따라서, 상이한 도파관들은 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316)의 상이한 어레이먼트들을 갖는 메타표면들을 가질 수 있다. 특히, 상이한 어레이먼트들은 입사 광빔의 파장 또는 컬러에 의존할 수 있다. 예컨대, 입사 광빔의 컬러에 의존하여, Λ_a 는 격자(1300)가 회절시키도록 구성된 파장에 따라 상이하게 구성될 수 있다. 예컨대, 적어도 적색 광, 녹색 광 또는 청색 광을 회절시키기 위해, 메타표면(1308)은 각각, 약 620-780nm 범위의 파장들보다 작은, 약 492-577nm의 범위의 파장들보다 작은, 그리고 약 435-493nm의 범위의 파장들보다 작은 Λ_a 를 갖도록 구성될 수 있다. Λ_a 를 스케일링하기 위해, 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및/또는 제2 라인들(1316)의 굴절률들, 폭들, 높이들 및 간격들과 같은 파라미터들이 비례적으로 조정될 수 있다. 대안적으로, Λ_a 는 위에서 설명된 바와 같이 $\sin \alpha$, n_2 및 $\sin \theta$ 중 하나 이상을 보상함으로써 입사광의 상이한 파장들에 대해 비교적 균일하게 유지될 수 있다.

[0121] 도 14는 도 13a 및 도 13b를 참조하여 위에서 설명된 회절 격자(1300)의 다양한 실시예들에 따른 예시적인 회절 격자에 대한 회절 효율 대 입사각(α)의 시뮬레이션(1400)을 예시한다. 특히, 시뮬레이션(1400)은 투과 모드 하에서, $n_2=1.77$ 을 갖는 기관 상에 다결정 실리콘으로 형성된 하나 이상의 제1 라인들 및 제2 라인들을 갖는 회절 격자에 대해 시뮬레이션된 T-1차 회절된 TE 편광된 녹색 광($\lambda=520\text{nm}$)의 회절 효율(η)을 디스플레이하며, 여기서 $\Lambda_a=382\text{nm}$, $h_{\text{nano1}}=h_{\text{nano2}}=107\text{nm}$, $W_{\text{nano1}}=W_{\text{nano2}}=30\text{nm}$, $p_{\text{nano1}}=96\text{nm}$ 및 $s_1=66\text{nm}$ 이다. 예시된 바와 같이, FOV(field of view) 또는 입사각($\Delta\alpha$)의 범위는 비교적 넓고 약 40도를 초과하며, 이 범위 밖에서, 회절 효율(η)은 $\alpha=0$ 에서의 약 32%의 효율로부터 약 10% 만큼 떨어진다.

[0122] 도 15a 및 도 15b는 도 13a 및 도 13b를 참조하여 위에서 설명된 회절 격자(1300)를 통해 투과되는 TE 편광된 520nm 파장 광에 대한 위상 파면들의 2-차원 시뮬레이션들(1500 및 1504)을 예시하며, 이는 도 14를 참조하여 위에서 예시된 시뮬레이션(1400)에 대응한다. 특히, 시뮬레이션들(1500 및 1504)은 각각, 입사각(α)이

0도 및 20도인 조명 조건들에 대응한다.

[0466] [0123] 아래에서 보다 상세히 설명되는 바와 같이, 본원에서 개시된 회절 격자들의 제조는 포토리소그래피 및 에칭을 포함하는 패터닝 프로세스들을 수반할 수 있다. 포토리소그래피 프로세스는 포토레지스트 및/또는 하드 마스크(이는 반사방지 코팅으로서 역할을 할 수 있음)와 같은 마스크 층을, 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316)이 형성되는 높은 굴절률 재료의 층 위에 증착하는 것을 포함할 수 있다. 후속적으로, 마스크 층은 먼저, 마스크 층의 패턴으로 현상 및/또는 패터닝될 수 있으며, 이는 높은 굴절률 재료의 하부 층을 패터닝하기 위한 템플릿으로서 역할을 한다. 후속적으로, 템플릿으로서 패터닝된 마스크 층을 사용하여, 높은 굴절률 재료의 하부 층이 제1 및 제2 라인들로 패터닝된다. 다양한 실시예들에서, 패터닝된 마스크 층이 제거되고 그리하여 제1 및 제2 라인들을 남긴다. 그러나, 일부 상황들에서, 패터닝된 제1 및 제2 라인들로부터 패터닝된 마스크 층을 제거하는 것이 어렵거나 바람직하지 않을 수 있다. 예컨대, 일부 마스크 층들에 대한 제거 프로세스는 제1 및 제2 라인들의 표면들 및/또는 노출된 기관의 표면들을 바람직하지 않게 손상시킬 수 있다. 따라서, 본 발명자들은 일부 상황들 하에서, 패터닝된 마스크 층이 남겨질 수 있다는 것을 발견하였다. 이하에서, 도 16a 내지 도 16d를 참조하여, 마스크 층이 남겨진 회절 격자들의 실시예들이 설명된다.

[0467] [0124] 도 16a는 일부 실시예들에 따라, 기하학적 위상 광학 엘리먼트들을 갖는 메타표면을 포함하는 회절 격자(1600)의 측 단면도를 예시하며, 여기서 마스크 층들은 예컨대, 포토리소그래피 및 에칭에 의해 하나 이상의 제1 라인들 및 제2 라인들을 형성한 후 남겨진다. 특히, 비교적 낮은 굴절률을 갖는 마스크 층을 남겨두는 것은 유리하게는, 회절 효율 대 입사각(η vs α) 거동을 포함하는 결과적인 광학 응답에 거의 또는 전혀 영향을 미치지 않을 수 있다는 것이 발견되었다. 도 13a 및 도 13b를 참조하여 위에서 예시된 회절 격자(1300)와 유사하게, 회절 격자(1600)는 가시 스펙트럼의 파장을 갖는 광을 회절시키도록 구성된 메타표면(1608)이 형성된 표면(1304S)을 갖는 기관(1304)을 포함한다. 메타표면(1608)은 제1 측방향(예컨대, y-방향)으로 연장되는 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 방향(예컨대, X-방향)으로 연장되는 복수의 제2 라인들(1316)을 포함한다. 메타표면(1608)의 에레인지먼트는, 도 16a의 메타표면(1608)에서는, 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 라인(1316) 상에, 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316)을 형성하기 위한 에칭용 템플릿으로서 패터닝된 마스크 층(1604)이 있다는 것을 제외하면, 도 13a 및 도 13b를 참조하여 위에서 예시된 메타표면(1308)의 에레인지먼트와 실질적으로 유사할 수 있다. 일부 실시예에 따라, 마스크 층들(1604)은 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316)의 재료의 굴절률보다 낮은, 비교적 낮은 굴절률을 갖는 포토레지스트 또는 하드 마스크 층들일 수 있다. 일부 실시예들에 따라, 하드 마스크 및/또는 ARC(anti-reflective layer)일 수 있는 마스크 층(1604)은 그 값이 약 2.0 미만, 약 1.8 미만, 약 1.6 미만 또는 약 1.4 미만이거나 그 값이 이들 값 중 임의의 것에 의해 정의된 범위 내에 있는 굴절률을 갖는다. 일부 실시예들에 따라, 마스크 층(1604)은 실리콘-함유 또는 실리카-함유 마스크 층으로 형성될 수 있다.

[0468] [0125] 도 16b는, 시플레이팅된 회절 격자에 대해, 마스크 층(1604)이 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316)(도 13a 및 도 13b) 상에 배치된다는 것을 제외하면, 도 13a 및 도 13b를 참조하여 위에서 예시된 회절 격자와 유사한 예시적인 회절 격자에 대한 마스크 층(1604)(도 16a)의 회절 효율(η) 대 두께의 시플레이션(1610)을 예시한다. 특히, 시플레이션(1610)은 투과 모드 하에서, $n_2=1.77$ 을 갖고 두께가 0 내지 90nm의 범위의 SiO_2 로 형성된 마스크 층이 형성되어 있는 기관 상에 실리콘으로 형성된 하나 이상의 제1 라인들 및 제2 라인들을 갖는 회절 격자에 대해 시플레이팅된 TE 편광된 녹색 광($\lambda=520\text{nm}$)에 대한 회절 효율(η)을 디스플레이 하며, 여기서 $\Delta a=382\text{nm}$, $h_{\text{nano}1}=h_{\text{nano}2}=107\text{nm}$, $W_{\text{nano}1}=W_{\text{nano}2}=30\text{nm}$, $p_{\text{nano}1}=96\text{nm}$ 및 $s_1=66\text{nm}$ 이다. 시플레이션(1610)은 각각, $\alpha=0$ 에서 투과된 회절 차수들(T1 및 T-1)에 대응하는 시플레이팅된 회절 효율 곡선들(1614 및 1618)을 예시한다. 시플레이션들(1610)은 90nm까지의 두께를 갖는 마스크 층의 존재가 회절 효율에 거의 무시할 만한 영향(~ 1% 이하)을 미친다는 것을 예시한다. 예컨대, η 는 90nm까지의 두께를 갖는 마스크 층에 대해 $\alpha=0$ 에서 약 1% 미만의 범위에 있다.

[0469] [0126] 도 16c는 시플레이팅된 회절 격자에 대해, 20nm의 고정된 두께를 갖는 마스크 층(1604)이 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316)(도 13a 및 도 13b) 상에 배치된 것을 제외하면, 도 16a를 참조하여 시플레이팅된 예시적인 회절 격자에 대한 회절 효율(η) 대 입사각(α)의 시플레이션들(1620)을 예시한다. 시플레이션들(1620)은 각각 투과된 회절 차수들(T1 및 T-1)에 대응하는 시플레이팅된 회절 효율 곡선들(1614 및 1618)을 예시한다. T-1 회절 차수에 대하여 도 14를 참조하여 위에서 설명된 시플레이션(1400)과 비교하여, 시플레이팅된 회절 효율(1628)은 20nm-두께 마스크 층의 존재가 회절 효율 또는 시야에 거의 무시할 만한 영향(~ 1% 이하)을 미친다는 것을 예시한다. 예컨대, η 는 $\alpha=0$ 에서 약 32%이며, 이는 $+\alpha=21^\circ$ 에서 약 10%만큼 떨어진

다.

- [0470] [0127] 도 16d는 시플레이팅된 회절 격자에 대해, 40nm의 고정된 두께를 갖는 마스크 층(1604)이 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316)(도 13a 및 도 13b) 상에 배치된 것을 제외하면, 도 16a를 참조하여 시플레이팅된 예시적인 회절 격자에 대한 회절 효율(η) 대 입사각(α)의 시플레이션들(1630)을 예시한다. 시플레이션들(1630)은 각각 투과된 회절 차수들(T1 및 T-1)에 대응하는 시플레이팅된 회절 효율 곡선들(1624 및 1628)을 예시한다. T-1 회절 차수에 대하여 도 14를 참조하여 위에서 설명된 시플레이션(1400)과 비교하여, 시플레이팅된 회절 효율(1628)은 20nm-두께 마스크 층의 존재가 회절 효율 또는 시야에 거의 무시할 만한 영향(~ 1% 이하)을 미친다는 것을 예시한다. 예컨대, η 는 $\alpha=0$ 에서 약 32%이며, 이는 $\alpha=21^\circ$ 에서 약 10%만큼 떨어진다.
- [0471] [0128] 이하에서, 도 17a 내지 도 20을 참조하면, 상이한 높은 굴절률 재료들로 형성된 예시적인 회절 격자들에 대한 회절 효율(η) 대 입사각(α)의 시플레이션들이 예시되며, 여기서 회절 격자들은 가시 스펙트럼에서 녹색 광(예컨대, $\lambda=520\text{nm}$)을 회절시키도록 구성된다.
- [0472] [0129] 도 17a 및 도 17b는 비정질 실리콘으로 형성되고 녹색 가시 광을 회절시키도록 구성된 예시적인 회절 격자에 대한 회절 효율(η) 대 입사각(α)의 시플레이션들(1700, 1704)을 예시한다. 특히, 시플레이션들(1700 및 1704)은 표면 법선에 대해 α 에서 회절 격자 상에 입사되는 $\lambda=520\text{nm}$ 의 T-1차 회절된 TE 및 TM 편광된 녹색 광의 회절 효율(η)을 각각 디스플레이한다. 시플레이션들(1700 및 1704)은 투과 모드 하에서, $n_2=1.77$ 을 갖는 기판 상에 비정질 실리콘으로 형성된 하나 이상의 제1 라인들 및 제2 라인들을 갖는 회절 격자에 대해 수행되었으며, 여기서 $\Lambda_a=382\text{nm}$, $h_{\text{nano1}}=h_{\text{nano2}}=90\text{nm}$, $W_{\text{nano1}}=W_{\text{nano2}}=30\text{nm}$, $p_{\text{nano1}}=96\text{nm}$ 및 $s_1=66\text{nm}$ 이다. 시플레이션들에 사용된 복소 굴절률은 $n=5.02 + 0.363i$ 였다. 예시된 바와 같이, TE 편광된 녹색 광에 대해, FOV(field of view) 또는 입사각($\Delta\alpha$)의 범위는 약 $50(<-30$ 내지 $> +20)$ 도에서 비교적 넓으며, 이 범위 밖에서, 회절 효율(η)은 $\alpha=0$ 에서의 약 28%의 효율로부터 약 10% 만큼 떨어진다.
- [0473] [0130] 도 18은 일부 실시예들에 따라, 다결정 실리콘으로 형성되고 $\lambda=520\text{nm}$ 의 녹색 가시 광을 회절시키도록 구성된 예시적인 회절 격자에 대한 회절 효율(η) 대 입사각(α)의 시플레이션(1400)을 예시한다. 시플레이션(1400)은 도 14에 예시된 것과 동일한 시플레이션이지만, 도 17a, 도 19 및 도 20에 대한 쉬운 비교를 위해 상이한 범위의 x-축으로 리플로팅된다. 시플레이션들에 사용된 복소 굴절률은 $n=4.41 + 0.182i$ 였다. 예시된 바와 같이, FOV(field of view) 또는 입사각($\Delta\alpha$)의 범위는 비교적 넓고 약 40도를 초과하며, 이 범위 밖에서, 회절 효율(η)은 $\alpha=0$ 에서의 약 32%의 효율로부터 약 10% 만큼 떨어진다.
- [0474] [0131] 도 19는 일부 실시예들에 따라, 실리콘 탄화물(SiC)로 형성되고 녹색 광을 회절시키도록 구성된 예시적인 회절 격자에 대한 회절 효율(η) 대 입사각(α)의 시플레이션(1900)을 예시한다. 특히, 시플레이션(1900)은 표면 법선에 대해 α 에서 회절 격자 상에 입사되는 $\lambda=520\text{nm}$ 의 T-1차 회절된 TE 편광된 녹색 광의 회절 효율(η)을 디스플레이한다. 시플레이션들(1900)은 투과 모드 하에서, $n_2=1.77$ 을 갖는 기판 상에 실리콘 탄화물(SiC)로 형성된 하나 이상의 제1 라인들 및 제2 라인들을 갖는 회절 격자에 대해 수행되었으며, 여기서 $\Lambda_a=382\text{nm}$, $h_{\text{nano1}}=h_{\text{nano2}}=260\text{nm}$, $W_{\text{nano1}}=W_{\text{nano2}}=65\text{nm}$, $p_{\text{nano1}}=96\text{nm}$ 및 $s_1=31\text{nm}$ 이다. 시플레이션들에 사용된 복소 굴절률은 $n=2.65 + 0.005i$ 였다. 예시된 바와 같이, TE 편광된 녹색 광에 대해, FOV(field of view) 또는 입사각($\Delta\alpha$)의 범위는 약 $40(\sim -20$ 내지 $\sim +20)$ 도에서 비교적 넓으며, 이 범위 밖에서, 회절 효율(η)은 $\alpha=0$ 에서의 약 27%의 효율로부터 약 10% 만큼 떨어진다.
- [0475] [0132] 도 20은 일부 실시예들에 따라, 실리콘 질화물(예컨대, Si_3N_4)로 형성되고 녹색 광을 회절시키도록 구성된 예시적인 회절 격자에 대한 회절 효율(η) 대 입사각(α)의 시플레이션(2000)을 예시한다. 특히, 시플레이션(2000)은 표면 법선에 대해 α 에서 회절 격자 상에 입사되는 $\lambda=520\text{nm}$ 의 T-1차 회절된 TE 편광된 녹색 광의 회절 효율(η)을 디스플레이한다. 시플레이션들(2000)은 투과 모드 하에서, $n_2=1.77$ 을 갖는 기판 상에 실리콘 질화물(예컨대, Si_3N_4)로 형성된 하나 이상의 제1 라인들 및 제2 라인들을 갖는 회절 격자에 대해 수행되었으며, 여기서 $\Lambda_a=382\text{nm}$, $h_{\text{nano1}}=h_{\text{nano2}}=300\text{nm}$, $W_{\text{nano1}}=W_{\text{nano2}}=60\text{nm}$, $p_{\text{nano1}}=96\text{nm}$ 및 $s_1=36\text{nm}$ 이다. 시플레이션들에 사용된 복소 굴절률은 $n=2.20 + 0.002i$ 였다. 예시된 바와 같이, TE 편광된 녹색 광에 대해, FOV(field of view) 또는

입사각($\Delta\alpha$)의 범위는 >40 ($\sim<-30$ 내지 $\sim+10$)도에서 비교적 넓으며, 이 범위 밖에서, 회절 효율(η)은 $\alpha=0$ 에서의 약 21%의 효율로부터 약 10% 만큼 떨어진다.

[0476] [0133] 이하에서, 도 21 내지 도 24를 참조하면, 상이한 높은 굴절률 재료들로 형성된 예시적인 회절 격자들에 대한 회절 효율(η) 대 입사각(α)의 시뮬레이션들이 예시되며, 여기서 회절 격자들은 가시 스펙트럼에서 청색광(예컨대, $\lambda=455\text{nm}$)을 회절시키도록 구성된다.

[0477] [0134] 도 21은 일부 실시예들에 따라, 다결정 실리콘으로 형성되고 청색 광을 회절시키도록 구성된 예시적인 회절 격자에 대한 회절 효율(η) 대 입사각(α)의 시뮬레이션(2200)을 예시한다. 특히, 시뮬레이션(2100)은 표면 법선에 대해 α 에서 회절 격자 상에 입사되는 $\lambda=455\text{nm}$ 의 T-1차 회절된 TE 편광된 청색 광의 회절 효율(η)을 디스플레이한다. 시뮬레이션들(2100)은 투과 모드 하에서, $n_2=1.77$ 을 갖는 기판 상에 다결정 실리콘으로 형성된 하나 이상의 제1 라인들 및 제2 라인들을 갖는 회절 격자에 대해 수행되었으며, 여기서 $\Lambda_a=334\text{nm}$, $h_{\text{nano}1}=h_{\text{nano}2}=75\text{nm}$, $W_{\text{nano}1}=W_{\text{nano}2}=30\text{nm}$, $p_{\text{nano}1}=96\text{nm}$ 및 $s_1=66\text{nm}$ 이다. 시뮬레이션들에 사용된 복소 굴절률은 $n=4.67 + 0.636i$ 였다. 예시된 바와 같이, TE 편광된 녹색 광에 대해, FOV(field of view) 또는 입사각($\Delta\alpha$)의 범위는 >40 ($\sim<-30$ 내지 $\sim +10$)도에서 비교적 넓으며, 이 범위 밖에서, 회절 효율(η)은 $\alpha=0$ 에서의 약 22%의 효율로부터 약 10% 만큼 떨어진다.

[0478] [0135] 도 22는 일부 실시예들에 따라, 비정질 실리콘으로 형성되고 청색 광을 회절시키도록 구성된 예시적인 회절 격자에 대한 회절 효율(η) 대 입사각(α)의 시뮬레이션(2200)을 예시한다. 특히, 시뮬레이션(2200)은 표면 법선에 대해 α 에서 회절 격자 상에 입사되는 $\lambda=455\text{nm}$ 의 T-1차 회절된 TE 편광된 청색 광의 회절 효율(η)을 디스플레이한다. 시뮬레이션들(2200)은 투과 모드 하에서, $n_2=1.77$ 을 갖는 기판 상에 비정질 실리콘으로 형성된 하나 이상의 제1 라인들 및 제2 라인들을 갖는 회절 격자에 대해 수행되었으며, 여기서 $\Lambda_a=334\text{nm}$, $h_{\text{nano}1}=h_{\text{nano}2}=60\text{nm}$, $W_{\text{nano}1}=W_{\text{nano}2}=30\text{nm}$, $p_{\text{nano}1}=96\text{nm}$ 및 $s_1=66\text{nm}$ 이다. 시뮬레이션들에 사용된 복소 굴절률은 $n=5.363 + 1.015i$ 였다. 예시된 바와 같이, TE 편광된 녹색 광에 대해, FOV(field of view) 또는 입사각($\Delta\alpha$)의 범위는 >40 ($\sim<-30$ 내지 $\sim +10$)도에서 비교적 넓으며, 이 범위 밖에서, 회절 효율(η)은 $\alpha=0$ 에서의 약 18%의 효율로부터 약 10% 만큼 떨어진다.

[0479] [0136] 도 23은 일부 실시예들에 따라, 실리콘 탄화물로 형성되고 청색 광을 회절시키도록 구성된 예시적인 회절 격자에 대한 회절 효율(η) 대 입사각(α)의 시뮬레이션(2300)을 예시한다. 특히, 시뮬레이션(2300)은 표면 법선에 대해 α 에서 회절 격자 상에 입사되는 $\lambda=455\text{nm}$ 의 T-1차 회절된 TE 편광된 청색 광의 회절 효율(η)을 디스플레이한다. 시뮬레이션들(2300)은 투과 모드 하에서, $n_2=1.77$ 을 갖는 기판 상에 실리콘 탄화물로 형성된 하나 이상의 제1 라인들 및 제2 라인들을 갖는 회절 격자에 대해 수행되었으며, 여기서 $\Lambda_a=334\text{nm}$, $h_{\text{nano}1}=h_{\text{nano}2}=220\text{nm}$, $W_{\text{nano}1}=W_{\text{nano}2}=60\text{nm}$, $p_{\text{nano}1}=96\text{nm}$ 및 $s_1=36\text{nm}$ 이다. 시뮬레이션들에 사용된 복소 굴절률은 $n=2.67 + 0.01i$ 였다. 예시된 바와 같이, TE 편광된 녹색 광에 대해, FOV(field of view) 또는 입사각($\Delta\alpha$)의 범위는 약 40 (~-18 내지 $\sim+18$)도에서 비교적 넓으며, 이 범위 밖에서, 회절 효율(η)은 $\alpha=0$ 에서의 약 30%의 효율로부터 약 10% 만큼 떨어진다.

[0480] [0137] 도 24는 일부 실시예들에 따라, 실리콘 질화물로 형성되고 청색 광을 회절시키도록 구성된 예시적인 회절 격자에 대한 회절 효율(η) 대 입사각(α)의 시뮬레이션(2400)을 예시한다. 특히, 시뮬레이션(2400)은 표면 법선에 대해 α 에서 회절 격자 상에 입사되는 $\lambda=455\text{nm}$ 의 T-1차 회절된 TE 편광된 청색 광의 회절 효율(η)을 디스플레이한다. 시뮬레이션들(2400)은 투과 모드 하에서, $n_2=1.77$ 을 갖는 기판 상에 실리콘 질화물로 형성된 하나 이상의 제1 라인들 및 제2 라인들을 갖는 회절 격자에 대해 수행되었으며, 여기서 $\Lambda_a=334\text{nm}$, $h_{\text{nano}1}=h_{\text{nano}2}=260\text{nm}$, $W_{\text{nano}1}=W_{\text{nano}2}=60\text{nm}$, $p_{\text{nano}1}=96\text{nm}$ 및 $s_1=36\text{nm}$ 이다. 시뮬레이션들에 사용된 복소 굴절률은 $n=2.24 + 0.007i$ 였다. 예시된 바와 같이, TE 편광된 녹색 광에 대해, FOV(field of view) 또는 입사각($\Delta\alpha$)의 범위는 약 20 (~-8 내지 $\sim+12$)도에서 비교적 넓으며, 이 범위 밖에서, 회절 효율(η)은 $\alpha=0$ 에서의 약 21%의 효율로부터 약 10% 만큼 떨어진다.

- [0481] [0138] 도 25는 일부 다른 실시예들에 따라, 기하학적 위상 광학 엘리먼트들을 갖는 메타표면을 포함하는 회절 격자(2500)의 하향식 도를 예시한다. 본원에서 개시된 메타표면들의 일부 실시예들은 각각이 상이한 방향으로 연장되는 나노빔들의 2 내지 4개의 세트들로 형성될 수 있다는 것이 인지될 것이다. 도 13a 내지 도 13b는 나노빔들의 2개의 세트들을 갖는 메타표면들을 예시하고, 도 25는 나노빔들의 4개의 세트들을 갖는 메타표면을 예시한다. 특히, 도 25의 회절 격자(2500)는 4-레벨 기하학적 위상 메타표면을 포함한다. 도 13a 및 도 13b를 참조하여 위에서 설명된 회절 격자(1300)와 유사하게, 회절 격자(2500)는 가시 스펙트럼의 파장을 갖는 광을 회절시키도록 구성된 메타표면이 형성된 기관, 예컨대, 도파관을 포함한다. 메타표면은 제1 측방향(예컨대, y-방향)으로 연장되는 하나 이상의 제1 라인들(2512) 및 제2 방향(예컨대, x-방향)으로 연장되는 복수의 제2 라인들(2516)을 포함한다. 하나 이상의 제1 라인들(2512) 및 제2 라인들(2516)은 제2 방향으로 서로 인접하게 배치되고, 여기서 제1 라인들(2512) 및 제2 라인들(2516)은 메타표면이 회절시키도록 구성되는 가시 스펙트럼의 파장 미만의 주기에서 제2 방향으로 교번적으로 반복된다. 일부 실시예들에서, 제2 라인들(2516)은 제1 라인들(2512)의 인접 쌍들 사이에서 y-방향으로 측 방향으로 스택된다. 회절 격자(2500)의 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316)의 다양한 피쳐들은 다음의 차이들을 제외하면, 도 13a 및 도 13b를 참조하여 위에서 설명된 회절 격자(1300)의 대응하는 피쳐들과 유사하다.
- [0482] [0139] 도 13a 및 도 13b를 참조하여 위에서 설명된 회절 격자(1300)와 달리, 회절 격자(2500)는 각각이 제3 방향으로 연장되는 복수의 제3 라인들(2514) 및 각각이 제4 방향으로 연장되는 복수의 제4 라인들(2518) 중 하나 또는 둘 모두를 더 포함한다. 제1, 제2, 제3 및 제4 방향들 각각은 서로 상이할 수 있다. 복수의 제3 라인들(2514)은 제3 세트의 나노빔들을 형성하는 것으로 간주될 수 있고 복수의 제4 라인들(2518)은 제4 세트의 나노빔들을 형성하는 것으로 간주될 수 있다. 제3 라인들(2514)은 제2 라인들(2516)의 제1 측 상에 배치되고 하나 이상의 제1 라인들(2512)과 제2 라인들(2516) 사이에서 제2 방향(예컨대, x-축 방향)으로 개재된다. 제4 라인들(2518)은 제1 측에 대향하는, 제2 라인들(2516)의 제2 측 상에 배치되고 다른 하나 이상의 제1 라인들(2512)과 제2 라인들(2516) 사이에서 제2 방향(예컨대, x-방향)으로 개재된다.
- [0483] [0140] 도 13a 및 도 13b를 참조하여 위에서 설명된 회절 격자(1300)와 달리, 회절 격자(2500)는 단지 하나의 제1 라인(2512)만을 가질 수 있다. 일부 다른 실시예들에서, 회절 격자(2500)는 복수의 제1 라인들(2512), 예컨대, 도 13a 및 도 13b를 참조하여 위에서 설명된 회절 격자(1300)와 같은 한 쌍의 제1 라인들을 가질 수 있다.
- [0484] [0141] 일부 실시예들에서, 제3 라인들(2514)은 동일한 길이를 갖고 그리고/또는 제4 라인들(2518)은 동일한 길이를 가져서, 제3 라인들(2514) 및/또는 제4 라인들(2518)은 각각 제3 및 제4 방향들에서 함께 종결된다. 그러나, 제3 라인들(2514) 중 상이한 라인들 및/또는 제4 라인들(2518) 중 상이한 라인들이 함께 종결되지 않는 다른 실시예들이 가능하다. 또한, 일부 실시예들에서, 제3 라인들(2514) 및 제4 라인들(2518)을 함께 종결시키는 것은 동일한 길이를 갖는다. 그러나, 다른 실시예에서, 제3 라인들(2514) 및 제4 라인들(2518)을 함께 종결시키는 것은 상이한 길이들을 갖는다.
- [0485] [0142] 일부 실시예들에서, 제3 라인들(2514) 중 인접한 라인들은 제1 방향(예컨대, y-방향)으로 일정한 간격으로 분리되고 그리고/또는 제4 라인들(2518) 중 인접한 라인들은 제1 방향으로 일정한 간격으로 분리된다. 그러나, 제3 라인들(2514) 및/또는 제4 라인들(2518)이 일정한 간격들로 분리되지 않는 다른 실시예들이 가능하다. 또한, 일부 실시예들에서, 일정하게-이격된 제3 라인들(2514) 및 일정하게-이격된 제4 라인들(2518)은 동일한 일정한 간격을 갖는다. 그러나, 다른 실시예에서, 일정하게-이격된 제3 라인들(2514) 및 일정하게-이격된 제4 라인들(2518)은 상이한 간격들을 갖는다.
- [0486] [0143] 일부 실시예들에서, 제3 라인들(2514)은 동일한 폭을 갖고 그리고/또는 제4 라인들(2518)은 동일한 폭을 갖는다. 그러나, 다른 실시예에서, 제3 라인들(2514) 및/또는 제4 라인들(2518)은 상이한 폭들을 갖는다. 또한, 일부 실시예들에서, 동일한 폭을 갖는 제3 라인들(2514) 및 동일한 폭을 갖는 제4 라인들(2518)의 폭들은 동일하다. 그러나, 일부 다른 실시예들에서, 동일한 폭을 갖는 제3 라인들(2514) 및 동일한 폭을 갖는 제4 라인들(2518)의 폭들은 상이하다. 또한, 일부 실시예들에서, 제3 라인들(2514) 및 제4 라인들(2518)은 제1 라인들(2512) 및 제2 라인(2416) 중 하나 또는 둘 모두와 동일한 폭을 갖는다.
- [0487] [0144] 일부 실시예들에서, 제3 라인들(2514)은, (즉, 페이지로의) 입사광의 전파 방향에서 볼 때, 하나 이상의 제1 라인들(2512)에 대해 제2 라인들(2516)의 최소 회전 각도보다 작은 각도만큼 하나 이상의 제1 라인들(2512)에 대해 반시계 방향으로 회전되는 제3 방향으로 연장된다. 일부 실시예들에서, 제2 라인들(2516)은 하나 이상의 제1 라인들(2512)에 대해 90도 또는 $\pi/2$ 만큼 회전되고, 제3 라인들(2514)은 하나 이상의 제1 라인

들(2512)에 대해 45도 또는 $\pi/4$ 만큼 회전된다. 또한, 제4 라인들(2518)은, 입사광의 전파 방향에서 볼 때, 하나 이상의 제1 라인들(2512)에 대해 제2 라인들(2516)의 최소 회전 각도보다 더 큰 각도만큼 하나 이상의 제1 라인들(2512)에 대해 반시계 방향으로 회전되는 제4 방향으로 연장된다. 일부 실시예들에서, 제2 라인들(2516)은 하나 이상의 제1 라인들(2512)에 대해 90도 또는 $\pi/2$ 만큼 회전되고, 제3 라인들(2514)은 하나 이상의 제1 라인들(2512)에 대해 135도 또는 $3\pi/4$ 만큼 회전된다.

[0488] [0145] 일부 실시예들에서, 도 12a 내지 도 12h를 참조하여 위에서 예시된 도파관들의 조합과 유사하게, 하나 이상의 제1 라인들(2512), 제2 라인들(2516), 제3 라인들(2514) 및 제4 라인들(2518)에 의해 야기되는 위상차들은 0과 π 사이에서 변동될 수 있다. 제3 라인들(2514), 제4 라인들(2518) 및 제2 라인들(2516)이 하나 이상의 제1 라인들(2512)에 대해 $\pi/4$, $3\pi/4$ 및 π 만큼 회전될 때, 일부 실시예들에 따라, $\pi/2$, $3\pi/2$ 및 2π 의 위상 픽업들/리타레이션들이 각각 달성될 수 있어서, 전체 0- 2π 범위를 커버하는 위상 픽업들/리타레이션들이 달성될 수 있게 한다. 결과적으로, 고속-축 배향이 0과 π 사이에서 변동되게 함으로써, 전체 0- 2π 범위를 커버하는 위상 픽업들/리타레이션들이 달성될 수 있지만, 도 12a 내지 도 12h의 예시된 예와 비교하여 훨씬 더 콤팩트한 유닛 셀 피치 및 더 높은 회절 각도들을 갖는다.

[0489] **기하학적 위상 메타표면들에 기초한 디스플레이 디바이스들**

[0490] [0146] (예컨대, 도 9a 및 도 9b를 다시 참조하여) 디스플레이 시스템의 다양한 실시예들에서, 도파관들의 세트(1200)는 송신 모드에서 동작하도록 구성된 메타표면 회절 격자들을 포함할 수 있다. 다양한 실시예들에서, 도파관들의 세트(1200)는 각각의 컴포넌트 컬러(R, G, B)에 대응하는 도파관들(670, 680, 690)을 포함하며, 이들에는 결국, 도 13a 및 도 13b 및 도 25를 참조하여 위에서 설명된 회절 격자들(1300, 2500)을 포함하거나 이에 대응할 수 있는 인커플링 광학 엘리먼트들(700, 710, 720) 각각의 것들이 그 내부에 또는 그 위에 형성되어 있다. 도파관들(670, 680, 690)은 부가적으로, 도 13a 및 도 13b를 참조하여 위에서 설명된 EPE/OPE(1346)를 포함하거나 이에 대응하는 광 분배 엘리먼트들(예컨대, OPE들)(730, 740, 750) 및/또는 아웃커플링 광학 엘리먼트들(예컨대, EPE들)(800, 810, 820)의 각각의 것들이 그 내부에 또는 그 위에 형성되어 있다. 동작에서, 일부 실시예들에서, 입사 광빔(1330), 예컨대 가시 광이 입사각(α)으로 메타표면(1308) 상에 입사될 때, 격자(1300, 2500)는 입사 광을 회절 각도(θ_2)에서 회절된 광빔(1342, 1338)으로 회절시킨다. 회절된 광빔들(1338 및 1342) 중 하나 또는 둘 모두가 굴절률(n_2)을 갖는 도파관으로서 구성된 기관(1304)에 대한 TIR(total internal reflection)의 발생을 위해 임계 각도(θ_{TIR})를 초과하는 회절 각도들에서 회절될 때, 즉, 조건들 $\theta_2 > \theta_{TIR}$ 및 $\theta_1 > \theta_{TIR}$ 중 하나 또는 둘 모두가 만족될 때, 회절된 광빔들(1338 및 1342) 중 하나 또는 둘 모두는 내부 전반사에 의해 x-축을 따라 그의 각각의 대향하는 방향으로 전파된다. 후속적으로, 일부 실시예들에서, 회절된 광빔(1346)은 그것이 도 9a 및 도 9b를 참조하여 위에서 설명된 OPE(orthogonal pupil expander)(1346) 또는 EPE(exit pupil expander)(1346)에 도달할 때까지 TIR 모드 하에서 기관(1304) 내로 커플링된다.

[0491] [0147] 도 13a 및 도 13b 및 도 25를 참조하여 위에서 예시된 격자들(1300, 2500)이 투과 모드에서 동작하도록 구성되지만, 다른 실시예들이 가능하다. 일부 다른 실시예들에서, 도 9a 및 도 9b를 다시 참조하면, 일부 디스플레이 디바이스들은 반사 모드에서 동작하도록 구성된 회절 격자들을 갖는 도파관들의 세트(1200)를 포함한다. 이들 실시예들에서, 도파관들의 세트(1200)는 각각의 컴포넌트 컬러(R, G, B)에 대응하는 도파관들(670, 680, 690)을 포함하며, 이들에는 결국, 그의 단면도가 도 26과 관련하여 설명된 회절 격자(2600)를 포함하거나 이에 대응하는 인커플링 광학 엘리먼트들(700, 710, 720) 각각의 것들이 그 내부에 또는 그 위에 형성되어 있다. 회절 격자(2600)는 반사 모드에서 광을 회절시키도록 구성된 메타표면(2608)을 포함하며, 여기서 도 13a 및 도 13b 및 도 25를 참조하여 위에서 설명된 회절 격자들(1300, 2500)과 달리, 동작에서, 메타표면(2608)의 한 측상에 입사되는 광은 광-입사 측과 동일한, 메타표면(2608)의 측을 향해 회절된다. 회절 격자(2600)는 가시 스펙트럼의 파장을 갖는 광을 회절시키도록 구성된 메타표면(1308)이 형성된 표면(1304S)을 갖는 기관(1304)을 포함한다. 메타표면(2608)은, 표면(1304S) 상의 재료 조성물들, 치수들 및 측면 어레인지먼트들이 각각 도 13a 및 도 13b 및 도 25를 참조하여 위에서 설명된 회절 격자들(1300, 2500)의 것들과 유사한, 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 복수의 제2 라인들(1316)을 포함한다. 특히, 하향식 도면이 예시되지 않지만, 메타표면(1308)은 제1 측방향(예컨대, y-방향)으로 연장되는 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 방향(예컨대, x-방향)으로 연장되는 복수의 제2 라인들(1316)을 포함하며, 여기서 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316)은 제2 방향으로 서로 인접하게 배치되고, 가시 스펙트럼의 파장 미만의 주기에서 제2 방향으로 교번적으로 반복된다.

[0492] [0148] 이론에 의해 제한됨 없이, 일부 실시예들에서, 도 13a 및 도 13b를 참조하여 위에서 설명된 메타표면

(1308)과 유사하게, 격자(2600)의 메타표면(2608)에서, 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316)은 하나 이상의 제1 라인들(1312)에 의해 회절된 가시 광과 제2 라인들(1316)에 의해 회절된 가시 광 사이의 위상차를 야기하도록 서로에 대해 일정 각도로 배향되며, 여기서, 하나 이상의 제1 라인들(1312)에 의해 회절된 가시 광과 제2 라인들(1316)에 의해 회절된 가시 광 사이의 위상차는 각도의 두 배이다.

- [0493] [0149] 예시되진 않았지만, 도 25를 참조하여 위에서 설명된 회절 격자(2500)와 유사하게, 일부 다른 실시예들에서, 회절 격자(2600)는 각각이 제3 방향으로 연장되는 복수의 제3 라인들(2514) 및 각각이 제4 방향으로 연장되는 복수의 제4 라인들(2518) 중 하나 또는 둘 모두를 더 포함한다. 또한, 일부 실시예들에서, 예시된 회절 격자(2600)는 단지 하나의 제1 라인들(2512)을 갖는다.
- [0494] [0150] 도 13a 및 도 13b 및 도 25를 참조하여 위에서 설명된 하나 이상의 제1 라인들(1312), 제2 라인들(1316), 제3 라인들(2514) 및 제4 라인들(2518)의 다른 다양한 가능한 어레이지먼트들은 도 26의 회절 격자(2600)에서 구현될 수 있으며, 그것의 상세한 설명은 생략된다.
- [0495] [0151] 도 13a 및 도 13b 및 도 25를 참조하여 위에서 설명된 격자들(1300 및 2500)과 달리, 격자(2600)에서, 광 투과성 스페이서 층(2604)은 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316) 상에 또는 그 위에, 예컨대, 상에 직접 형성될 수 있다. 또한, 반사 층(2612)은 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316) 상에 또는 그 위에, 예컨대 상에 직접 그리고/또는 스페이서 층(2604) 상에 또는 그 위에, 예컨대 상에 직접 형성될 수 있다.
- [0496] [0152] 일부 실시예들에서, 스페이서 층(2604)은 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316)이 스페이서 층(2604)에 임베딩되도록, 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316) 상에 직접 그리고 이와 접촉하게 형성된다. 스페이서 층(2604)은 높이(d)만큼 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316)의 높이보다 큰 높이 또는 두께(hspacer)를 갖는다. 높이(d)는 일부 실시예들에 따라 5nm 내지 1 μ m, 5nm 내지 500nm 또는 10nm 내지 300nm의 범위 내에 있을 수 있다. 일부 실시예들에서, 스페이서 층(2604)은 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316)이 형성되는 벌크 재료의 굴절률($n_{1 \text{ bulk}}$)보다 낮은 굴절률(n_{spacer})을 갖는다. 일부 실시예들에서, n_{spacer} 는 또한 기판(1304)의 굴절률(n_2)보다 낮다. 다양한 실시예에서, n_{spacer} 는 1 내지 2, 1.1 내지 1.7, 또는 1.1 내지 1.5, 예컨대 1.2의 굴절률을 갖는다. 다양한 실시예들에서, 스페이서 층(2604)은 폴리(메틸 메타크릴레이트)(PMMA), 스핀-온 유리, e-빔 레지스트 또는 포토-레지스트 및 중합체를 포함해서, 스핀-코팅에 의해 증착될 수 있는 재료로 형성될 수 있다. 스핀-코팅에 의해 증착될 때, 스핀-코팅된 재료(as-spin-coated materia)는 점성 흐름을 겪을 수 있기 때문에, 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316) 위의 스페이서 층(2604)의 두께는, 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316)이 존재하지 않는 구역들, 예컨대 스페이서 층(2604)이 기판(1304) 상에 직접 형성되는 구역들에서의 스페이서 층(2604)의 두께와 비해 얇을 수 있다는 것이 인지될 것이다.
- [0497] [0153] 일부 실시예들에서, 반사 층(2612)은 스페이서 층(2604) 상에 직접 형성된다. 이 실시예에서, 반사 층(2612)은 그 위에 형성된 스페이서 층(2604)에 의해 하나 이상의 제1 라인들(2612) 및 제2 라인들(2616)로부터 분리된다. 그러나, 일부 다른 실시예들에서, 반사 층(2612)은 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316) 상에 직접 형성될 수 있다. 이들 실시예에서, 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316)은 반사 층(2612)에 임베딩될 수 있는데; 즉, 반사 층(2612)은 하나 이상의 제1 라인들(1312) 사이 및/또는 제2 라인들(1316) 사이의 공간들을 채울 수 있다.
- [0498] [0154] 반사 층(2612)은 알루미늄, 은, 금 및 구리와 같은 금속 또는 금속성 재료와 같이 광 예컨대, 가시 광을 실질적으로 반사하는 재료로 형성될 수 있다. 일부 다른 실시예들에서, 반사 층(2612)은 반사성 중합체와 같은 다른 광-반사성 재료로 형성될 수 있다. 공간 층(2604) 상에 직접 형성될 때, 반사 층(2612)의 높이 또는 두께(h_r)는 실질적으로 비-투과성일 정도로 충분히 두껍고 기공들이 없을 수 있는데, 예컨대, 150nm보다 두껍고, 500nm보다 두껍거나 1 μ m보다 두껍거나 이들 두께들 사이의 범위에 있을 수 있다. 반사 층(2612)이 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316) 상에 직접 형성되는 실시예들에서, 반사 층(2612)의 두께는 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들을 매립하기에 충분할 수 있고, 각각의 두께(h_{nano1} 및 h_{nano2})보다 클 수 있다.
- [0499] [0155] 도 27은 도 26을 참조하여 위에서 설명된 회절 격자(2600)의 다양한 실시예들에 따른 예시적인 회절 격자에 대한 회절 효율 (η) 대 입사각(α)의 시뮬레이션(2700)을 예시한다. 특히, 시뮬레이션(2700)은 투과 모드 하에서, $n_2=1.77$ 을 갖는 기판 상에 다결정 실리콘으로 형성된 하나 이상의 제1 라인들 및 제2 라인들을 갖는

회절 격자에 대해 시뮬레이션된 T-1차 회절된 TE 편광된 녹색 광($\lambda=520\text{nm}$)의 회절 효율(η)을 디스플레이하며, 여기서 $\Delta a=382\text{nm}$, $h_{\text{nano1}}=h_{\text{nano2}}=50\text{nm}$, $W_{\text{nano1}}=W_{\text{nano2}}=30\text{nm}$, $P_{\text{nano1}}=95.5\text{nm}$ $s_1=65.5\text{nm}$ 및 $d=50\text{nm}$ 이다. 예시된 바와 같이, FOV(field of view) 또는 입사각($\Delta\alpha$)의 범위는 비교적 넓고 약 45도(-25 내지 +20 도)를 초과하며, 이 범위 밖에서, 회절 효율(η)은 $\alpha=0$ 에서의 약 40%의 효율로부터 약 10% 만큼 떨어진다.

[0500] **기하학적 위상 메타표면들을 제조하는 방법**

[0501] [0156] 이하에서, 기하학적 위상 메타표면들을 제조하는 방법이 설명된다. 일부 실시예들에서, 기하학적 위상 메타표면들은 하위 인덱스 기판(1304) 상에 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316)을 형성하기 위한 높은 인덱스 재료의 증착을 이용하는 것에 이어, 리소그래피 및 에칭 프로세스들을 사용하여 패터닝함으로써 제조될 수 있다. 일부 다른 실시예들에서, 기하학적 위상 메타표면들은 하위 인덱스 기판(1304) 상에 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316)의 높은 인덱스 재료의 증착을 이용하는 것에 이어, 나노임프린트 기술을 사용하여 패터닝함으로써 제조될 수 있다.

[0502] [0157] 도 28a 내지 도 28d는 일부 실시예들에 따라, 리소그래피 및 에칭을 사용하여 기하학적 위상 메타표면을 갖는 회절 격자의 다양한 제조 스테이지에서의 중간 구조들(2800A-2800D)의 단면도들을 각각 예시한다. 도 28a의 중간 구조(2800A)를 참조하면, 방법은 그 위에 메타표면(1308)을 형성하기에 적합한 표면(1304S)을 갖는 기판(1304)을 제공하는 것을 포함한다. 기판(1304)은 굴절률(n_2) 및 도 13a 및 도 13b를 참조하여 위에서 설명된 다양한 다른 재료 속성들을 갖는 광 투과성 재료를 포함한다. 이 방법은 부가적으로, 굴절률($n_{1\text{ bulk}}$) 및 도 13a 및 도 13b를 참조하여 위에서 설명된 다양한 다른 재료 속성들을 갖는 높은 인덱스 층(1310)을, 표면(1304S) 상에 형성하는 단계를 포함한다. 높은 인덱스 층(1310)은 패터닝될 때, 도 13a 및 도 13b를 참조하여 위에서 설명된 바와 같이 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316)을 형성하기에 적합하다. 높은 인덱스 층(1310)은 일부 실시예들에 따라, 플라즈마-기반 CVD 프로세스들, 이를테면, PECVD(plasma-enhanced chemical vapor deposition) 및 열-기반 CVD 프로세스들, 이를테면, LPCVD(low pressure chemical vapor deposition)를 포함하는 임의의 적합한 기술, 이를테면, CVD(chemical vapor deposition)를 사용하여 증착될 수 있다. 높은 인덱스 층(1310)은 또한, 다른 기술들 중에서도 PVD(physical vapor deposition), 증발 및 원자 층 증착을 사용하여 증착될 수 있다. 방법은 부가적으로, 높은 인덱스 층(1310) 상에 마스크 층(1604A)을 형성하는 것을 포함한다. 마스크 층(1604A)은 하부의 높은 인덱스 층(1310)의 후속 에칭을 위한 템플릿을 제공하기에 적합한 재료들의 하나 이상의 층들로 형성되거나 이를 포함할 수 있다. 일부 실시예들에서, 마스크 층(1604A)은 포토레지스트일 수 있으며, 이는 스핀-코팅된 후에, 포스트-베이킹이 이어질 수 있다. 일부 다른 실시예들에서, 마스크 층(1604)은 높은 인덱스 층(1310) 상에 형성된 하드 마스크 층 및 하드 마스크 층 상에 형성된 포토레지스트 층을 포함하는 복수의 층들을 포함할 수 있다. 예컨대 포토레지스트 층이 하부의 높은 인덱스 층(1310)으로의 후속 에칭 패턴 전사 동안 충분한 에칭 선택성을 제공하지 않을 때 하드 마스크 층이 포함될 수 있다. 하드 마스크 층은 또한 후속 노출 프로세스 동안 반사를 감소시키기 위해 반사 방지 코팅으로서 역할을 할 수 있다. 일부 실시예들에서, 하드 마스크 층은 스핀-코팅된 중합체 또는 높은 인덱스 층(1310)을 증착시키기 위한 증착 기술들 중 임의의 것 의해 증착된 막일 수 있다. 포함될 때, 하드 마스크 층은 상부의 포토레지스트 층보다 더 높은 에칭 선택성을 제공할 수 있다. 일부 실시예들에서, 포토레지스트는 포지티브 포토레지스트 또는 네거티브 포토레지스트일 수 있다. 포지티브 포토레지스트는 광에 노출된 포토레지스트의 일부가 포토레지스트 현상제에 용해되는 포토레지스트 유형인 반면, 네거티브 레지스트는 광에 노출된 포토레지스트의 일부가 포토레지스트 현상제에 불용성인 포토레지스트의 유형이다.

[0503] [0158] 일부 실시예들에서, 포토레지스트 및/또는 하드 마스크 층은 실리콘 또는 실리콘 산화물을 함유하는 재료로 형성될 수 있으며, 이는 포토레지스트 및/또는 하드 마스크 층이 하부의 높은 인덱스 층(1310)의 에칭을 통해 비교적 온전하게 유지되도록 높은 인덱스 층(1310)에 대해 충분한 에칭 선택성을 가질 수 있다. 이들 실시예들에서, 실리콘 또는 실리콘 산화물-함유 포토레지스트 및/또는 하드 마스크 층은 도 16a를 참조하여 위에서 설명된 바와 같이 패터닝 후에 하나 이상의 제1 라인들 및/또는 제2 라인들의 상부에 남아있을 수 있다.

[0504] [0159] 도 28b의 중간 구조(2800B)를 참조하면, 증착 및 증착후 베이킹 후에, 방법은, 포토레지스트의 일부들을 광의 패턴에 선택적으로 노출시킴으로써 마스크 층(1604)의 포토레지스트 층을 패터닝하는 것을 포함한다. 광, 예컨대, 코히어런트(coherent) UV 광 또는 전자 빔에 대한 노출은 포토레지스트에서 화학적 변화들 예컨대, 중합체 교차결합(polymeric crosslinking)을 유발하며, 이는 포지티브 포토레지스트의 경우 포토레지스트의 노출된 부분들이 현상액에 의해 선택적으로 제거될 수 있게 하고, 네거티브 포토레지스트의 경우 포토레지스트의

노출되지 않은 부분들이 현상액에 의해 선택적으로 제거될 수 있게 한다. 선택적 제거 시에, 결과적인 패터닝된 마스크 포토레지스트가 높은 인덱스 층(1310) 상에서 유지되고, 그리하여 포함되는 경우, 예컨대, 에칭에 의해 하부의 하드 마스크 층을 후속 패터닝하기 위한 템플릿으로서 역할을 한다. 결과적인 중간 구조(2800C)는 패터닝된 포토레지스트 및 선택적으로, 포함되는 경우, 패터닝된 하드 마스크 층을 포함하는 패터닝된 마스크 층(1604)을 도시한다.

[0505] [0160] 도 28c의 중간 구조(2800C)를 참조하면, 패터닝된 마스크 층(1604)은 도 13a 및 도 13b를 참조하여 위에서 보다 상세히 설명된 바와 같이, 하부의 높은 인덱스 층(1310)을 제1 측방향(예컨대, y-방향)으로 연장되는 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 방향(예컨대, x-방향)으로 연장되는 복수의 제2 라인들(1316)로 에칭하기 위한 템플릿으로서 사용될 수 있다. 다양한 실시예들에서, 높은 인덱스 층(1310)은 에칭, 예컨대, 이방성 건식-에칭될 수 있다. 사용된 에칭 프로세스는 마스크 층(1604) 및/또는 기관(1304)에 대해 적합한 선택성을 가질 수 있어서, 마스크 층(1604)을 조기에 제거하지 않고 그리고/또는 기관(1304)의 노출 부분들을 바람직하지 않게 손상시키지 않고 높은 인덱스 층(1310)의 부분들이 제거되게 한다.

[0506] [0161] 중간 구조(2800D)를 참조하면, 일부 실시예들에서, 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316) 상의 마스크 층(1604)이 그로부터 제거된다. 마스크 층(1604)의 레지스트 부분은 예컨대, 애싱(ashing)으로 지칭되는 프로세스에서 액체 레지스트 스트리퍼 또는 산소-기반 플라즈마를 사용함으로써 제거될 수 있다. 원하는 경우 그리고 포함되는 경우, 하부의 하드 마스크 층은 후속적으로, 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316) 또는 기관(1304)에 실질적으로 영향을 미치지 않으면서 하드 마스크를 선택적으로 제거하는 습식 또는 건식 에칭 프로세스를 사용하여 제거될 수 있다. 그러나, 일부 실시예, 예컨대, 도 16a를 참조하여 위에서 설명된 실시예에서, 마스크 층(1604), 예컨대 포토레지스트/하드 마스크 또는 하드 마스크는 제거되지 않고 남겨질 수 있다.

[0507] [0162] 도 29a 내지 도 29d는 일부 실시예들에 따라, 나노임프린트 기술들을 사용하여 기하학적 위상 메타표면을 갖는 회절 격자의 다양한 제조 스테이지에서의 중간 구조들(2900A-2900D)의 단면도들을 각각 예시한다. 일부 실시예들에서, 도 29a, 29c 및 29d의 중간 구조들(2900A, 2900C 및 2900D)을 각각 형성하는 방법은 도 28a, 28c 및 28d의 중간 구조들(2800A, 2800C 및 2800D)을 형성하는 방법과 각각 유사하다. 그러나, 도 29b의 중간 구조(2900B)를 형성하는 방법은 도 28b의 중간 구조(2800B)를 형성하는 방법과 상이하며, 그 차이는 아래에서 설명된다.

[0508] [0163] 도 29b의 중간 구조(2900B)를 참조하면, 도 28b를 참조하여 위에서 설명된 방법과 달리, 광 또는 전자빔을 사용하여 포토레지스트의 부분들을 선택적으로 노출 및 제거함으로써 포토레지스트 층을 패터닝하는 대신, 예시된 실시예에서, 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316)의 형성에 따라 미리 정의된 토폴로지 패턴들을 갖는 나노임프린트 템플릿(2904) 또는 나노임프린트 몰드가 마스크 층(1604A)의 임프린트 레지스트와 접촉하게 된다. 일부 실시예들에서, 템플릿(2904)은 소정의 온도 하에서, 예컨대, 임프린트 레지스트의 유리 트랜지션 온도 초과로 열가소성 중합체로 형성된 임프린트 레지스트 내로 가압되고, 그리하여 템플릿(2904)의 패턴을 연화된 임프린트 레지스트로 전사한다. 냉각된 후에, 템플릿(2904)은 임프린트 레지스트로부터 분리되고, 패터닝된 레지스트는 높은 인덱스 층(1310) 상에 남겨진다. 일부 다른 실시예들에서, 임프린트 레지스트 내로 가압된 후에, 임프린트 레지스트는 UV 광 하에서 교차결합에 의해 경화된다.

[0509] [0164] 예시되진 않았지만, 반사-모드 메타표면들, 예컨대, 도 26을 참조하여 설명된 메타표면(2608)은 도 28d 또는 도 29d에 도시된 중간 구조들의 부가적인 프로세싱을 통해 형성될 수 있다. 예컨대, 스페이스 층(2604) 또는 반사 층이 하나 이상의 제1 라인들(1312)과 제2 라인들(1316) 사이의 개방 볼륨들에 증착될 수 있다. 일부 다른 실시예들에서, 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316)은 블랭킷 스페이스 층(2604) 또는 블랭킷 반사 층에서 트렌치들을 에칭하고 후속적으로 트렌치들을 하나 이상의 제1 라인들(1312) 및 제2 라인들(1316)의 높은 인덱스 재료로 충전함으로써 형성될 수 있다.

[0510] [0165] 다양한 실시예들에 따라 메타표면들이 형성되어 있는 도파관들로서 구성된 기관(1304)이 본원에서 개시된 시스템(250)(도 6)과 같은 디스플레이 시스템들을 형성하는 데 사용될 수 있다는 것이 인지될 것이다. 예컨대, 메타표면들은 본원에서 설명된 바와 같이 인커플링, 광 분배 및/또는 아웃커플링 광학 엘리먼트들로서 활용될 수 있다. 일부 실시예들에서, 메타표면의 제조 후에, 도파관(2000)은 공간 광 변조기로부터 도파관 내로 이미지 정보를 주입하기 위한 광 파이프와 같은 광 파이프에 광학적으로 커플링될 수 있다. 광 파이프는 일부 실시예들에서 광섬유일 수 있다. 광 파이프들의 예들은 이미지 주입 디바이스들(360, 370, 380, 390, 400)(도 6) 및 스캐닝 광섬유들을 포함한다. 일부 실시예들에서, 각각이 메타표면들(1308)을 갖는 복수의 도파관들이 제공

될 수 있고, 이들 도파관들 각각은 하나 이상의 이미지 주입 디바이스들에 광학적으로 커플링될 수 있다.

[0511] **비대칭 광학 엘리먼트들을 갖는 기하학적 위상 메타표면들**

[0166] 전술한 바와 같이, PBOE들을 포함하는 메타표면들의 애플리케이션들은 광빔을 몇 개의 회절 차수들로 스티어링할 수 있는 회절 격자들, 예컨대 블레이즈드 격자로서 그것의 용도를 포함한다. 예컨대, 도 13a 및 도 13b와 관련하여 위에서 설명된 바와 같이, 회절 격자(1300)는 복수의 회절 차수들에 대해 최대 격자 효율을 달성하도록 구성될 수 있다. 예컨대, 도 13a 및 도 13b와 관련하여 전술한 바와 같이, PBOE들에 기초한 블레이즈드 격자(1300)는 투과된 광빔(1334)으로서 입사광을 부분적으로 투과시키도록 그리고 회절 각도 θ_1 에서 +1차수의 회절된 광빔(1342)으로서 그리고 회절 각도(θ_2)에서 -1차수의 회절된 광빔(1338)으로서 입사광을 부분적으로 회절시키도록 구성되며, 여기서 회절 각도들은 α 를 측정하기 위해 동일한 평면 예컨대, $y-z$ 평면에 대해 측정된다. 회절된 광빔들(1338 및 1342) 중 하나 또는 둘 모두가 도파관으로서 구성된 기관(1304)에서의 내부 전반사(TIR)의 발생을 위한 임계각(θ_{TIR})을 초과하는 회절 각도로 회절될 때, 회절된 광빔들(1338 및 1342)은 광 분배 엘리먼트들(1214, 1224, 1234) 및 아웃-커플링 광학 엘리먼트들(1250, 1252, 1254)(도 9b)에 대응할 수 있는 OPE들/EPE들(1346)에 도달할 때까지, TIR 하에서 x -축을 따라 그의 각각의 대향하는 방향들로 전파된다. 그러나, 일부 애플리케이션들에 대해, 회절된 광을 복수의 회절 차수들 중 하나, 예컨대 +1 회절 차수 (1338) 또는 -1 회절 차수(1338) 중 하나로 집중시키면서, 복수의 회절 차수들 중 남은 하나, 예컨대, +1 회절 차수(1338) 또는 -1 회절 차수 1338 중 남은 하나를 감소시키는 것이 바람직할 수 있다. 예컨대, 도 13a/도 13b를 다시 참조하면, 광빔들이 한 측 상에 배치된 OPE들/EPE들(1346)에 도달할 때까지 회절된 광빔들(1338 및 1342)이 TIR(total internal reflection) 하에서 x -축을 따라 전파되도록 하는 도파관으로서 기관(1304)이 구성될 때, 회절된 광을 단일 차수 회절로 집중시키는 것은 실제로 뷰어에게 출력되도록 이용 가능한 더 많은 양의 광을 제공한다.

[0167] 도 30a 및 도 30b를 참조하면, 특정 회절 순서로 광을 스티어링하도록 구성된 2-상 레벨의 비대칭 기하학적 위상 메타표면들이 예시된다. 도 30a 및 도 30b는 각각, 파장을 갖는 가시 광을 회절시키도록 구성된 메타표면(3008)을 포함하는 회절 격자(3000)의 측 단면도 및 하향식 뷰를 예시하며, 여기서 메타표면은 복수의 반복 유닛 셀들(1320a)을 포함한다. 각각의 유닛 셀은, 제1 나노빔들(3012) 중 적어도 2개가, 서로 상이한 폭들을 갖는다는 점에서 비대칭인 둘 이상의 제1 나노빔들(3012)을 포함하는 나노빔들의 제1 세트를 포함한다. 각각의 유닛 셀은 또한 비대칭 제2 나노빔들(3016)(이들 중 적어도 2개는 상이한 폭을 가짐)을 포함하는 복수의 제2 나노빔들(3016)을 포함하는 나노빔들의 제2 세트를 포함한다. 제2 나노빔들은 제1 나노빔들에 인접하게 배치되고 서브-파장 간격만큼 서로 분리되며, 여기서 제1 나노빔들(3012) 및 제2 나노빔들(3016)은 상이한 배향들을 갖는다. 유리하게는, 이들 비대칭 나노빔들을 갖는 메타표면들은, 광이 복수의 회절 차수들 중 하나, 예컨대 +1 회절 차수 (1342) 또는 -1 회절 차수(1338) 중 하나로 보다 효율적으로 스티어링(복수의 회절 차수들 중 남은 하나, 예컨대, +1 회절 차수(1342) 또는 -1 회절 차수 1338 중 남은 하나를 감소시키면서)되도록 광을 회절시킬 수 있다는 것이 발견되었다.

[0168] 일부 실시예들에서, 회절 격자(3000)는 2-레벨 기하학적 위상 메타표면을 포함한다. 도 30a를 참조하여 예시된 측 단면도는 도 30b의 AA' 라인을 따라 취해진 단면의 측 단면도이다. 회절 격자(3000)는 가시 스펙트럼의 파장을 갖는 광을 회절시키도록 구성된 메타표면(3008)이 형성된 표면을 갖는 기관(1304)을 포함한다. 메타표면(3008)은 제1 배향을 갖고 일반적으로 제1 측방향(예컨대, y -방향)으로 연장되는 제1 라인들 또는 나노빔들(3012) 및 제2 방향(예컨대, x -방향)으로 일반적으로 연장되는 복수의 제2 라인들 또는 나노빔들(3016)을 포함한다. 제1 라인들 또는 나노빔들(3012)은 나노빔들의 제1 세트를 형성하는 것으로 간주될 수 있고, 제2 라인들 또는 나노빔들(3016)은 나노빔들의 제2 세트를 형성하는 것으로 간주될 수 있다. 제1 라인들(3012) 및 제2 라인들(3016)은 제2 방향으로 서로 인접하게 배치되고, 제1 라인들(3012) 및 제2 라인들(3016)은 주기에서, 예컨대, 메타표면이 회절시키도록 구성되는 광의 파장 미만의 주기에서 제2 방향으로 교번적으로 반복된다. 유리하게는, US 9,507,064의 구조들과 같은 구조들과 비교하여, 공간-변형 배향들을 갖는 메타표면들은 다수의 편광들, 예컨대 TE 및 TM 편광들을 갖는 광을 효율적으로 회절시킬 수 있다.

[0169] 예컨대, 다양한 재료의 굴절률들을 포함하는 회절 격자(3000)의 물리적 및 광학적 성질들 뿐만 아니라 격자의 동작 원리들은 위에서 설명된 다양한 실시예들, 예컨대, 도 13a/도 13b와 관련하여 위에서 설명된 회절 격자(1300)와 유사하다는 것이 인지될 것이다. 또한, 회절 격자(3000)의 유닛 셀 피치(Λ_a) 뿐만 아니라 제1 나노빔들(3012) 및 제2 나노빔들(3016)의 치수들, 예컨대 높이, 길이 및 폭은 위에서 설명된 다양한 실시예들과

유사하며, 이들의 상세한 설명은 간결성을 위해 본원에서 생략된다.

- [0516] [0170] 그러나, 위에서 설명된 일부 실시예들과 달리, 제1 나노빔들(3012) 중 적어도 하나는 다른 제1 나노빔들(3012)과 다른 것과 상이한 폭을 가지며, 제2 나노빔들(3016) 중 적어도 하나는 다른 제2 나노빔들(3016)과 다른 것과 상이한 폭을 갖는다. 예시된 실시예에서, 유닛 셀은 서로 상이한 제1 폭($W_{\text{nano1-1}}$) 및 제2 폭($W_{\text{nano1-2}}$)을 갖는 제1 나노빔들(3012)의 쌍을 포함하는 나노빔들의 제1 세트를 포함한다. 유닛 셀은 부가적으로 서로 상이한 제3 폭($W_{\text{nano2-1}}$) 및 제4 폭($W_{\text{nano2-2}}$)을 갖는 복수의 제2 나노빔들(3016)을 포함하는 나노빔들의 제2 세트를 포함한다. 따라서, 예시된 실시예에서, 나노빔들의 제1 세트는 2개의 상이한 폭들을 갖는 교번하는 나노빔들을 포함하고, 나노빔들의 제2 세트는 2개의 상이한 폭들을 갖는 교번하는 나노빔들을 포함한다. 그러나, 실시예들은 이에 제한되지 않으며, 나노빔들의 제1 세트 및/또는 제2 세트는 다른 폭들을 갖는 부가적인 나노빔들을 가질 수 있다.
- [0517] [0171] 이하에서, 제1 라인들(3012) 및 제2 라인들(3016)의 치수들 및 기하학적 어레이지먼트를 포함하는 다양한 구성들이 기술되며, 이들의 조합된 효과는 복수의 회절 차수들 중 하나로 회절된 광을 스티어링하면서 복수의 회절 차수들 중 다른 것(들)을 감소시키는 것뿐만 아니라, 비교적 높은 회절 각도, 비교적 높은 회절 효율, 비교적 광범위한 수용 각도 및 수용 각도의 범위 내에서 비교적 균일한 효율 및 TE 및 TM 편광들 둘 다에 대한 비교적 높은 효율 중 하나 이상을 포함하여, 위에서 설명된 다양한 바람직한 광학 성질들을 달성하는 것이다.
- [0518] [0172] 상세하게, 도 30a를 참조하면, 동작에서, 입사 광빔(1330), 예컨대 가시 광이, 제1 라인들(1312)에 평행한 방향 예컨대, y - z 평면으로 연장되고 표면(1304S)에 수직인 평면에 대해 측정되는 입사각(α)으로 메타표면(3008) 상에 입사될 때, 격자(3000)는 투과된 광빔으로서 입사광을 부분적으로 투과시키고 회절 각도(θ_1)에서 +1차수의 회절된 광빔(1342)으로서 입사광을 부분적으로 회절시키면서, 회절 각도(θ_2)에서 -1차수의 회절된 광빔(명확성을 위해 도시되지 않음)을 실질적으로 억제하며, 여기서 회절 각도들은 α 를 측정하기 위해 동일한 평면 예컨대, y - z 평면에 대해 측정된다. 위에서 설명된 것과 유사하게, +1차수의 회절된 광빔(1342)이 도 30a와 관련하여 구성된 기관(1304)에서 내부 전반사(TIR)의 발생을 위해 임계각(θ_{TIR})을 초과하는 회절 각도에서 회절될 때, 회절된 광빔들은, 광빔들이 OPE들/EPE들(1346)(명확성을 위해 도시되지 않음, 예컨대, 도 13a 및 도 13b 참조)에 도달할 때까지 TIR 하에서 x -축을 따라 전파된다.
- [0519] [0173] 다양한 실시예들에서, 제1 라인들(1312)의 W_{nano1} 및 제2 라인들(1316)의 W_{nano2} 각각은 메타표면(1308)이 회절시키도록 구성된 광의 파장보다 작고, 바람직하게는 가시 스펙트럼의 파장보다 작다. 일부 실시예에서, $W_{\text{nano1-1}}$, $W_{\text{nano1-2}}$, $W_{\text{nano2-1}}$ 및 $W_{\text{nano2-2}}$ 각각은 10nm 내지 1 μm , 10nm 내지 500nm, 10nm 내지 300nm, 10nm 내지 100nm 또는 10nm 내지 50nm의 범위에 있는데, 예컨대 30nm이다. 일부 실시예들에서, $W_{\text{nano1-1}}$ 은 $W_{\text{nano2-1}}$ 과 실질적으로 동일하고 $W_{\text{nano1-2}}$ 는 $W_{\text{nano2-2}}$ 와 실질적으로 동일하다. 일부 다른 실시예들에서, $W_{\text{nano1-1}}$, $W_{\text{nano2-1}}$, $W_{\text{nano1-2}}$ 및 $W_{\text{nano2-2}}$ 각각은 상이할 수 있다.
- [0520] [0174] 일부 실시예들에 따라, 제2 방향(x -방향)에서 제1 라인들(1312) 중 바로 인접한 라인들은 간격(s_{1-1})에 의해 분리된다. 또한, 제1 라인들(1312) 중 하나는 상이한 일정한 간격들(s_{1-2} 및 s_{1-3})에 의해 대향하는 측들의 제2 라인들(1316) 중 하나로부터 분리된다. 일부 실시예들에 따라, s_{1-1} , s_{1-2} 및 s_{1-3} 각각은 메타표면(3008)이 회절시키도록 구성된 파장보다 작다.
- [0521] [0175] 일부 실시예들에 따라, 제1 방향(y -방향)에서 제2 라인들(3016) 중 바로 인접한 것들은 2개의 상이한 폭들($W_{\text{nano2-1}}$ 및 $W_{\text{nano2-2}}$)을 갖는 교번적으로 반복되는 제2 라인들(3016)과 교번적으로 반복되는 간격들(s_{2-1} 및 s_{2-2})에 의해 분리된다. 일부 실시예들에 따라, s_{2-1} 및 s_{2-2} 각각은 메타표면(3008)이 회절시키도록 구성된 파장보다 작다.
- [0522] [0176] 도 30a를 계속 참조하면, 제1 라인들(3012) 및 제2 라인들(3016)은 동일하거나 상이할 수 있고, 예컨대 도 13a/도 13b와 관련하여 위에서 설명된 치수들과 유사한 높이(h_{nano})를 가지며, 치수들 및 예컨대, 시야(FOV)에 대한 기술적 효과들과 관한 설명들은 간결성을 위해 본원에서는 설명되지 않는다. 또한, 상이한 나노빔들의 간격 대 높이의 원하는 비들은, 예컨대, 간격들(s_{1-1} , s_{1-2} , s_{1-3} , s_{2-1} 및 s_{2-2}) 각각이 10nm 내지 1 μm , 10nm 내지

300nm, 10nm 내지 100nm 또는 10nm 내지 50nm의 범위에 있는 경우, 예컨대, 30nm인 경우에 실현될 수 있다 물론, s_{1-1} , s_{1-2} , s_{1-3} , s_{2-1} 및 s_{2-2} 의 비교적 더 낮은 값들은, h_{nano1} 및 h_{nano2} 가 상응하게 비교적 더 낮은 값들을 갖는 경우에 실현될 수 있다.

[0523] [0177] 다양한 실시예들에 따라, s_{1-1} 과 $W_{nano1-1}$ 또는 $W_{nano1-2}$ 중 하나의 조합은, s_{1-1} 및 $W_{nano1-1}$ 또는 $W_{nano1-2}$ 중 하나의 합으로서 정의되는 제1 라인들(3012)의 피치(p_{nano1})가, 10nm 내지 $1\mu m$, 10nm 내지 500nm, 10nm 내지 300nm, 10nm 내지 100nm 또는 10nm 내지 50nm의 범위들로부터 선택된 $W_{nano1-1}$, $W_{nano1-2}$ 및 10nm 내지 $1\mu m$, 10nm 내지 300nm, 10nm 내지 100nm 또는 10nm 내지 50nm의 범위들로부터 선택된 s_{1-1} 의 합에 의해 획득된 값을 갖도록 선택될 수 있다. 예컨대, 일부 실시예들에서 $p_{nano1}=95.5nm$ 이다.

[0524] [0178] 물론, s_{1-1} , s_{1-2} , s_{1-3} , s_{2-1} 및 s_{2-2} 의 비교적 작은 값들이 실현될 수 있고, h_{nano} 는 상응하게 비교적 작은 값들을 갖는다. 유리하게는, 제1 라인들(1312) 및/또는 제2 라인들(1316)을 형성하기 위해 비교적 높은 굴절률(n_1)을 갖는 재료를 사용하여, s_{1-1} , s_{1-2} , s_{1-3} , s_{2-1} 및 s_{2-2} , h_{nano} 의 비교적 작은 값들이 획득될 수 있다. 이는, 본 발명자들이 발견한 바와 같이, 수량 h_{nano} 가 제1 라인들(3012) 및 제2 라인들(3016)을 형성하는 재료의 벌크 굴절률에 반비례할 수 있기 때문이다. 따라서, 2.0-2.5, 2.5-3.0, 3.0-3.5 및 3.5보다 높은 벌크 굴절률을 갖는 재료들의 경우, h_{nano} 는 각각, 다양한 실시예들에서, 500nm 내지 $1\mu m$, 300nm 내지 500nm, 100nm 내지 300 및 10nm 내지 100nm의 범위에 있을 수 있다. 따라서, 제1 라인들(3012) 및 제2 라인들(3016)의 높은 벌크 굴절률(n_1) 및 대응하는 치수들(s_{1-1} , s_{1-2} , s_{1-3} , s_{2-1} 및 s_{2-2} , h_{nano})을 갖는 재료의 특정 조합에 의해, 전체 피치(Λ_a)는 또한 아래에서 추가로 설명되는 바와 같이 상응하게 감소될 수 있으며, 이는 결국, 회절 각도(θ)를 증가시킨다.

[0525] [0179] 도 31a 및 도 31b는 다결정 실리콘으로 형성되고 녹색 가시 광을 회절시키도록 구성된 예시적인 회절 격자에 대한 회절 효율(η) 대 입사각(α)의 시뮬레이션들(3100, 3104)을 예시한다. 특히, 시뮬레이션들(3100 및 3004)은 각각, 표면 법선에 대해 α 에서 회절 격자 상에 입사되는, $\lambda=520nm$ 의 T+1(3114, 도 31a) 및 T-1(3118, 도 31a)차 회절된 TE 편광된 녹색 광 및 $\lambda=520nm$ 의 T+(3124, 도 31b) 및 T-1(3128, 도 31b)차 TM 편광된 녹색 광의 회절 효율(η)을 디스플레이한다. 시뮬레이션들(3100 및 3104)은 투과 모드 하에서, $n_2=1.77$ 을 갖는 기판 상에 다결정 실리콘으로 형성된 제1 라인들 및 제2 라인들을 갖는 회절 격자에 대해 수행되었으며, 여기서 $\Lambda_a=382nm$, $h_{nano1}=107nm$, $W_{nano1-1}=W_{nano2-1}=30nm$ 및 $W_{nano1-2}=W_{nano2-2}=45nm$, $s_{1-1}=58nm$, $s_{1-2}=23nm$, $s_{1-3}=35nm$, $s_{2-1}=s_{2-2}=58nm$ 이다.

[0526] [0180] 도 31a에 예시된 바와 같이, TE 편광된 광에 대해, 회절 격자(3000)는 비교적 효율적으로, 입사광을 T+1차 회절된 빔(3114)으로 회절시키면서, T-1차 회절된 빔(3118)을 감소시키며, 대응하는 회절 효율들은 각각, $\alpha=0$ 에서 50% 및 약 10%를 초과한다. T+1차 TE 편광된 녹색 광에 대해, FOV(field of view) 또는 입사각($\Delta\alpha$)의 범위는 약 50(~20 내지 > +20)도에서 비교적 넓으며, 이 범위 밖에서, 회절 효율(η)은 $\alpha=0$ 에서 50%를 초과하는 효율로부터 약 10% 이상만큼 떨어진다. 도 31b에 예시된 바와 같이, TM 편광된 광에 대해, 회절 격자(3000)는 T+1차 회절된 빔(3124)과 T-1차 회절된 빔들(3128) 사이에서 비교적 균등하게 입사광을 회절시키며, 대응하는 회절 효율은 $\alpha=0$ 에서 20%보다 낮다.

[0527] [0181] 도 32a 및 도 32b는 각각, 일부 실시예들에 따라, TE 및 TM 편광된 녹색 광에 대해, 비정질 실리콘으로 형성된 예시적인 회절 격자에 대한 시뮬레이션된 회절 효율(η) 대 입사각(α)을 예시한다. 특히, 시뮬레이션들(3200 및 3204)은 각각, 표면 법선에 대해 α 에서 회절 격자 상에 입사되는, $\lambda=520nm$ 의 T+(3214, 도 32a) 및 T-1(3218, 도 32a)차 회절된 TE 편광된 녹색 광 및 $\lambda=520nm$ 의 T+1(3224, 도 32b) 및 T-1(3228, 도 32b)차 TM 편광된 녹색 광의 회절 효율(η)을 디스플레이한다. 시뮬레이션들(3200 및 3204)은 투과 모드 동작하에서, $n_2=1.77$ 을 갖는 기판 상에 비정질 실리콘으로 형성된 제1 라인들 및 제2 라인들을 갖는 회절 격자에 대해 수행되었으며, 여기서 $\Lambda_a=382nm$, $h_{nano}=85nm$, $W_{nano1-1}=W_{nano2-1}=25nm$ 및 $W_{nano1-2}=W_{nano2-2}=40nm$, $s_{1-1}=63nm$, $s_{1-2}=25nm$, $s_{1-3}=38nm$, $s_{2-1}=s_{2-2}=63nm$ 이다.

[0528] [0182] 도 32a에 예시된 바와 같이, TE 편광된 광에 대해, 회절 격자(3000)는 비교적 효율적으로, 입사광을

T+1차 회절된 빔(3214)으로 회절시키면서, T-1차 회절된 빔(3218)을 감소시키며, $\alpha=0$ 에서 각각 약 42% 및 약 13%의 대응하는 회절 효율들을 갖는다. T+1차 TE 편광된 녹색 광에 대해, FOV(field of view) 또는 입사각 ($\Delta\alpha$)의 범위는 $> 40(<-30$ 내지 $> +10)$ 도에서 비교적 넓으며, 이 범위 밖에서, 회절 효율(η)은 $\alpha=0$ 에서 40%를 초과하는 효율로부터 약 10% 이상만큼 떨어진다. 도 32b에 예시된 바와 같이, TM 편광된 광에 대해, 회절 격자(3000)는 T+1차 회절된 빔(3224)과 T-1차 회절된 빔들(3228) 사이에서 비교적 균등하게 입사광을 회절시키며, 대응하는 회절 효율은 $\alpha=0$ 에서 15%를 초과한다.

[0529] [0183] 도 33a 및 도 33b는 각각, 일부 실시예들에 따라, TE 및 TM 편광된 녹색 광에 대해, 비정질 실리콘으로 형성된 예시적인 회절 격자에 대한 시뮬레이션된 회절 효율(η) 대 입사각(α)을 예시한다. 특히, 시뮬레이션들(3300 및 3304)은 각각, 표면 법선에 대해 α 에서 회절 격자 상에 입사되는, $\lambda=520\text{nm}$ 의 T+(3314, 도 33a) 및 T-(3318, 도 33a)차 회절된 TE 편광된 녹색 광 및 $\lambda=520\text{nm}$ 의 T+(3324, 도 32b) 및 T-(3328, 도 32b)차 TM 편광된 녹색 광의 회절 효율(η)을 디스플레이한다. 시뮬레이션들(3300 및 3304)은 투과 모드 하에서, $n_2=1.77$ 을 갖는 기판 상에 비정질 실리콘으로 형성된 제1 라인들 및 제2 라인들을 갖는 회절 격자에 대해 수행 되었으며, 여기서 $\Lambda_a=382\text{nm}$, $h_{\text{nano1}}=85\text{nm}$, $W_{\text{nano1-1}}=W_{\text{nano2-1}}=30\text{nm}$ 및 $W_{\text{nano1-2}}=W_{\text{nano2-2}}=45\text{nm}$, $s_{1-1}=58\text{nm}$, $s_{1-2}=23\text{nm}$, $s_{1-3}=35\text{nm}$, $s_{2-1}=s_{2-2}=58\text{nm}$ 이다.

[0530] [0184] 도 33a에 예시된 바와 같이, TE 편광된 광에 대해, 회절 격자(3000)는 비교적 효율적으로, 입사광을 T+1차 회절된 빔(3314)으로 회절시키면서, T-1차 회절된 빔(3318)을 감소시키며, $\alpha=0$ 에서 각각 약 39% 및 약 13%의 대응하는 회절 효율들을 갖는다. T+1차 TE 편광된 녹색 광에 대해, FOV(field of view) 또는 입사각 ($\Delta\alpha$)의 범위는 $> 40(<-30$ 내지 $> +10)$ 도에서 비교적 넓으며, 이 범위 밖에서, 회절 효율(η)은 $\alpha=0$ 에서 35%를 초과하는 효율로부터 약 10% 이상만큼 떨어진다. 도 33b에 예시된 바와 같이, TM 편광된 광에 대해, 회절 격자(3000)는 T+1차 회절된 빔(3324)과 T-1차 회절된 빔들(3328) 사이에서 비교적 균등하게 입사광을 회절시키며, 대응하는 회절 효율은 $\alpha=0$ 에서 15%를 초과한다.

[0531] [0185] 본 발명의 다양한 예시적 실시예들이 본원에서 설명된다. 비-제한적인 의미로 이들 예들에 대한 참조가 행해진다. 그 예들은, 본 발명의 더 넓게 적용 가능한 양상들을 예시하기 위해 제공된다. 다양한 변화들이 설명된 발명에 대해 행해질 수 있으며, 등가물들이 본 발명의 실제 사상 및 범위를 벗어나지 않으면서 대체될 수 있다.

[0532] [0186] 예컨대, 다수의 깊이 평면들에 걸쳐 이미지들을 제공하는 AR 디스플레이들과 함께 유리하게 활용되지만, 본원에서 개시된 증강 현실 콘텐츠는 또한 단일 깊이 평면 상에 그리고/또는 가상 현실 디스플레이들로 이미지들을 제공하는 시스템들에 의해 디스플레이될 수 있다. 멀티플렉싱된 이미지 정보(예컨대, 상이한 컬러들의 광)가 도파관 내로 지향되는 일부 실시예들에서, 다수의 메타표면들이 도파관 상에 제공될 수 있는데, 예컨대, 광의 각각의 컬러에 대해 하나의 메타표면이 활성이다. 일부 실시예들에서, 메타표면들을 형성하는 돌출부들의 피치 또는 주기성 및/또는 기하학적 크기들은 메타표면에 걸쳐 변동될 수 있다. 이러한 메타표면은, 상이한 파장들의 광이 메타표면들에 충돌하는 위치들에서의 기하학적 구조들 및 피치들에 의존하여, 그 광을 재지향시키는 데 활성일 수 있다. 일부 다른 실시예들에서, 메타표면 피치들의 기하학적 구조들 및 피치들은, 심지어 유사한 파장들의 편향된 광선들이 상이한 각도들에서 메타표면으로부터 멀어지게 전파되도록 변동되게 구성된다. 다수의 분리된 메타표면들이 기판 표면에 걸쳐 배치될 수 있으며, 일부 실시예들에서, 메타표면들 각각은 동일한 기하학적 구조들 및 피치들을 갖거나, 또는 일부 다른 실시예들에서, 메타표면들 중 적어도 일부는 다른 메타표면들과 상이한 기하학적 구조들 및/또는 피치들을 갖는다는 것이 또한 인지될 것이다.

[0533] [0187] 또한, 웨어러블 디스플레이와 같은 디스플레이들에 유리하게 적용되지만, 메타표면들은 콤팩트한 로우-프로파일 광 지향 엘리먼트가 요구되는 다양한 다른 디바이스들에 적용될 수 있다. 예컨대, 금속 표면들은 일반적으로, 광학 플레이트들(예컨대, 유리 플레이트들), 광섬유들, 현미경들, 센서들, 시계들, 카메라들 및 이미지 프로젝션 디바이스들의 광 지향 부분들을 형성하도록 적용될 수 있다.

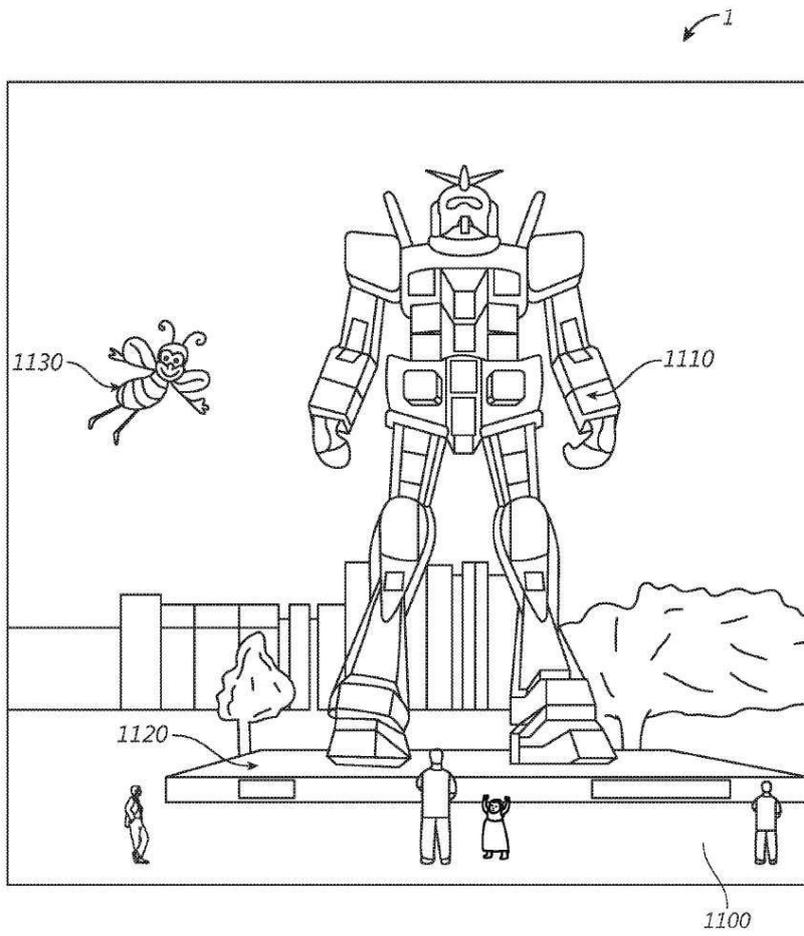
[0534] [0188] 부가적으로, 다수의 수정들은, 특정 상황, 재료, 재료의 조성, 프로세스, 프로세스 동작(들) 또는 단계(들)를 본 발명의 목적(들), 사상 또는 범위에 적응시키도록 행해질 수 있다. 추가로, 본원에서 설명되고 예시된 개별 변동들 각각은, 본 발명들의 사상 또는 범위를 벗어나지 않으면서 다른 여러 개의 실시예들 중 임의의 실시예의 특징들로부터 쉽게 분리될 수 있거나 이들과 결합될 수 있는 이산 컴포넌트들 및 특징들을 갖는다는 것이 당업자들에 의해 인지될 것이다. 그러한 모든 수정들은, 본 개시내용과 연관된 청구항들의 범위 내에 있

는 것으로 의도된다.

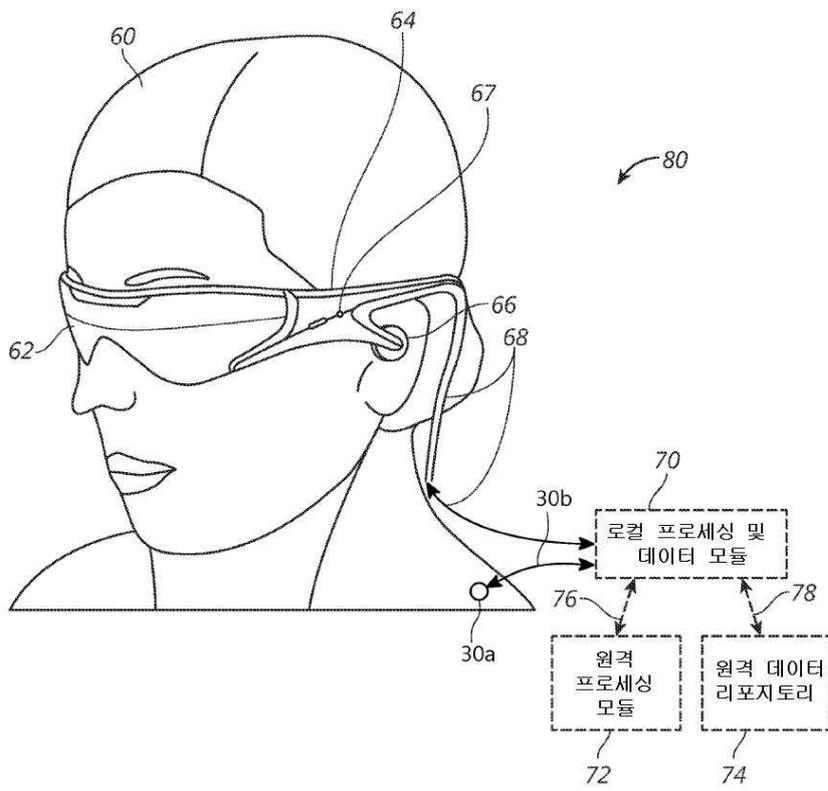
- [0535] [0189] 본 발명은, 본 발명의 디바이스들을 사용하여 수행될 수 있는 방법들을 포함한다. 방법들은, 그러한 적절한 디바이스를 제공하는 동작을 포함할 수 있다. 그러한 제공은 사용자에게 의해 수행될 수 있다. 즉, "제공하는" 동작은 단지, 사용자가 본 방법에서 필수적인 디바이스를 제공하도록 획득, 액세스, 접근, 포지셔닝, 셋-업, 활성화, 파워-업 또는 달리 동작하는 것을 요구한다. 본원에서 인용된 방법들은, 논리적으로 가능한 임의의 순서의 인용된 이벤트들뿐만 아니라 인용된 순서의 이벤트들로 수행될 수 있다.
- [0536] [0190] 본 발명의 예시적인 양상들은, 재료 선택 및 제조에 대한 세부사항들과 함께 위에서 기술되었다. 본 발명의 다른 세부사항들에 대해, 이들은, 위에서-참조된 특허들 및 공개공보들과 관련하여 인지될 뿐만 아니라 당업자들에 의해 일반적으로 알려지거나 인지될 수 있다. 이들은 공통적으로 또는 논리적으로 이용되는 바와 같은 부가적인 동작들의 관점에서 본 발명의 방법-기반 양상들에 적용될 수 있다.
- [0537] [0191] 설명의 용이함을 위해, 피처들의 상대적 포지션들을 나타내는 다양한 단어들 이 본원에서 사용된다. 예컨대, 다양한 피처들은, "상위"의 또는 "하위"의 다른 피처들 "상에", "위에" 또는 그의 "측"에 있는 것으로서 설명될 수 있다. 상대적 포지션의 다른 단어들 이 또한 사용될 수 있다. 이러한 상대적 포지션의 모든 이러한 단어들은, 전체적으로 피처들에 의해 형성된 어그리게이트 구조 또는 시스템이 설명 목적들을 위한 기준 포인트로서 소정에 배향에 있다고 가정하지만, 사용 중에, 구조가 옆으로 포지셔닝되고, 뒤집히거나 또는 임의의 수의 다른 배향들에 있을 수 있다는 것이 인지될 것이다.
- [0538] [0192] 부가적으로, 본 발명이 다양한 특징들을 선택적으로 포함하는 여러 개의 예들을 참조하여 설명되었지만, 본 발명은, 본 발명의 각각의 변동에 대해 고려된 바와 같이 설명되거나 표시된 것으로 제한되지 않을 것이다. 다양한 변화들이 설명된 발명에 대해 행해질 수 있으며, (본원에서 인용되었는지 또는 일부 간략화를 위해 포함되지 않았는지 여부에 관계없이) 등가물들이 본 발명의 실제 사상 및 범위를 벗어나지 않으면서 대체될 수 있다. 부가적으로, 다양한 값들이 제공되는 경우, 그 범위의 상한과 하한 사이의 모든 각각의 개재 값 및 그 언급된 범위 내의 임의의 다른 언급된 또는 개재 값이 본 발명 내에 포함되는 것으로 해석된다.
- [0539] [0193] 또한, 설명된 본 발명의 변동들의 임의의 선택적인 특징이 본원에 설명된 특징들 중 임의의 하나 이상에 독립적으로 또는 그에 결합하여 기술되고 청구될 수 있다는 것이 고려된다. 단수 아이템에 대한 참조는, 복수의 동일한 아이템들이 존재하는 가능성을 포함한다. 보다 구체적으로, 본원 및 본원에 연관된 청구항들에서 사용된 바와 같이, 단수 형태들은, 명확하게 달리 언급되지 않으면 복수의 지시 대상들을 포함한다. 즉, 단수들의 사용은 본 개시내용과 연관된 청구항들뿐 아니라 위의 설명의 청구대상 아이템 중 "적어도 하나"를 허용한다. 이 청구항들이 임의의 선택적인 엘리먼트를 배제하도록 작성될 수 있다는 것에 추가로 주의한다. 따라서, 이런 서술은 청구항 엘리먼트들의 나열과 관련하여 "오로지", "오직" 등 같은 그런 배타적인 용어의 사용, 또는 "부정적" 제한의 사용을 위한 선행 기초로서 역할을 하도록 의도된다.
- [0540] [0194] 그런 배타적 용어의 사용 없이, 본 개시내용과 연관된 청구항들에서 "포함하는"이라는 용어는, 주어진 수의 엘리먼트들이 그런 청구항들에 열거되는지, 또는 특징의 부가가 그 청구항들에 기술된 엘리먼트의 성질을 변환하는 것으로 간주될 수 있는지 여부에 무관하게 임의의 부가적인 엘리먼트의 포함을 허용할 수 있다. 본원에 구체적으로 정의된 바를 제외하고, 본원에 사용된 모든 기술적 및 과학적 용어들은 청구항 유효성을 유지하면서 가능한 한 일반적으로 이해되는 의미로 넓게 제공되어야 한다.
- [0541] [0195] 본 발명의 범위는 제공된 예들 및/또는 본원 명세서로 제한되는 것이 아니라, 오히려 본 개시내용과 연관된 청구항 문언의 범위에 의해서만 제한된다. 실제로, 본원에서 설명된 신규한 장치, 방법들 및 시스템들은 다양한 다른 형태들로 구현될 수 있으며; 또한, 본원에서 설명된 방법들 및 시스템들의 형태에서 다양한 생략들, 대체들 및 변경들이 본 개시내용의 사상을 벗어나지 않고 이루어질 수 있다. 예컨대, 블록들이 주어진 어레이먼트로 제시되지만, 대안적인 실시예들은 상이한 컴포넌트들 및/또는 회로 토폴로지들로 유사한 기능성들을 수행할 수 있고, 일부 블록들은 삭제, 이동, 부가, 세분, 결합 및/또는 수정될 수 있다. 이들 블록들 각각은 다양한 상이한 방식들로 구현될 수 있다. 위에서 설명된 다양한 실시예들의 엘리먼트들 및 동작들의 임의의 적합한 조합이 추가의 실시예들을 제공하도록 결합될 수 있다. 위에서 설명된 다양한 특징들 및 프로세스들은 서로 독립적으로 구현될 수 있거나, 또는 다양한 방식들로 결합될 수 있다. 본 개시내용의 특징들의 모든 적합한 조합들 및 서브조합들은 본 개시내용의 범위 내에 속하는 것으로 의도된다.

도면

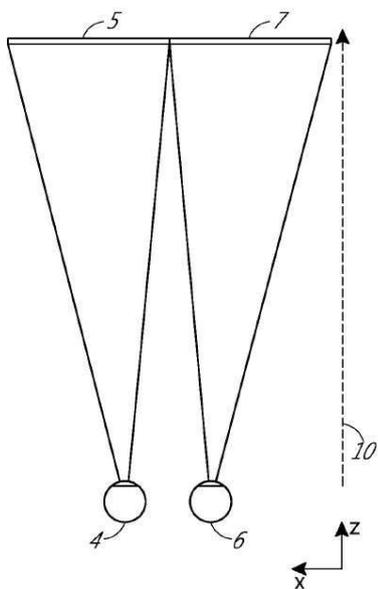
도면1



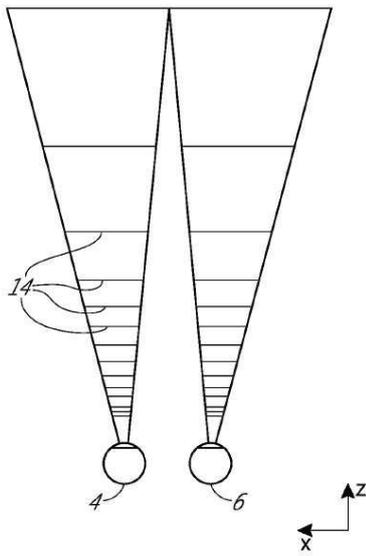
도면2



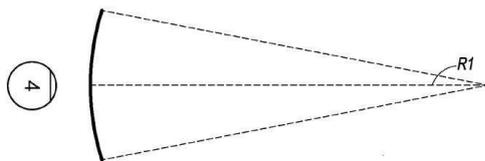
도면3



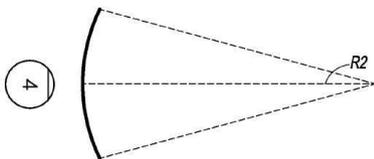
도면4



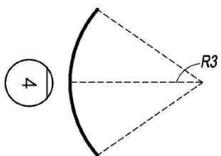
도면5a



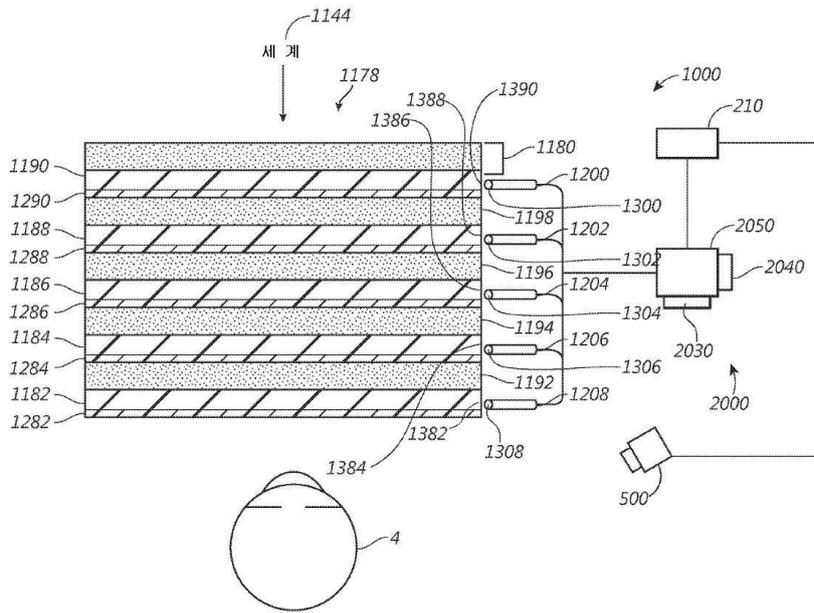
도면5b



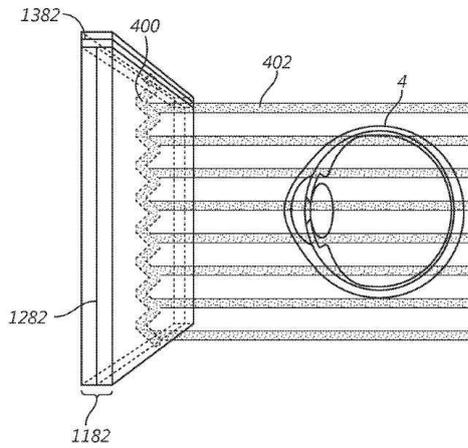
도면5c



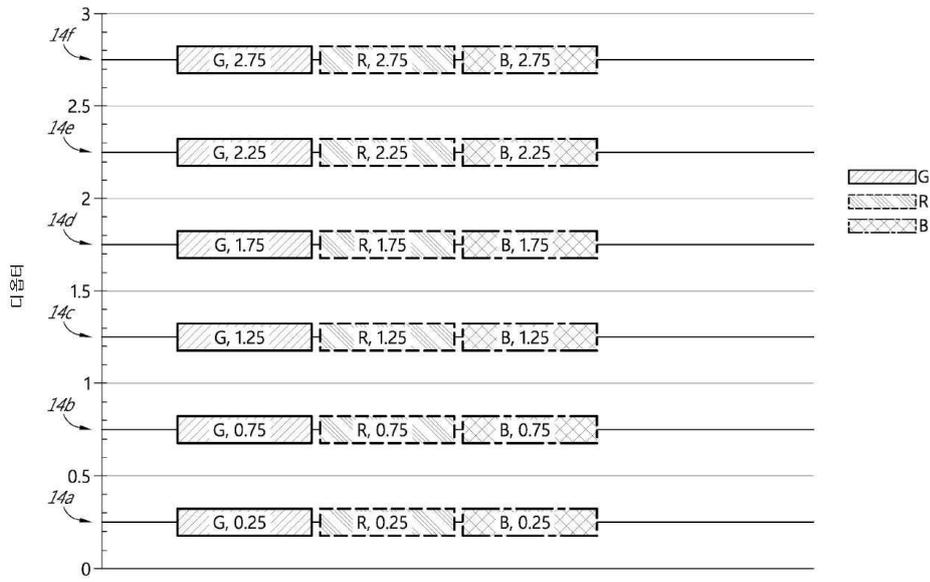
도면6



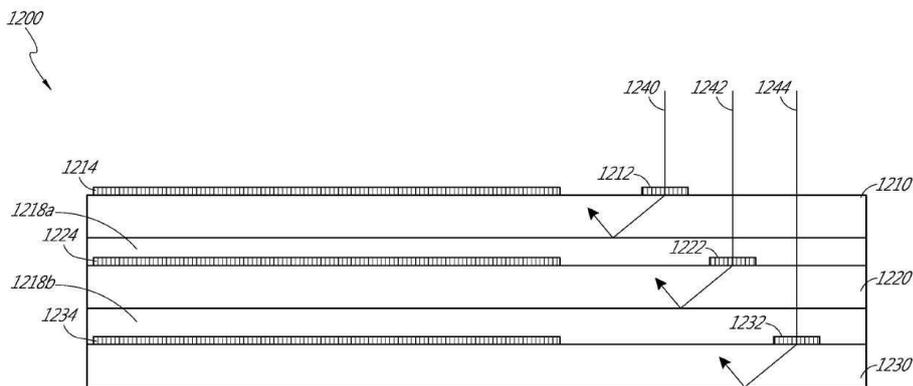
도면7



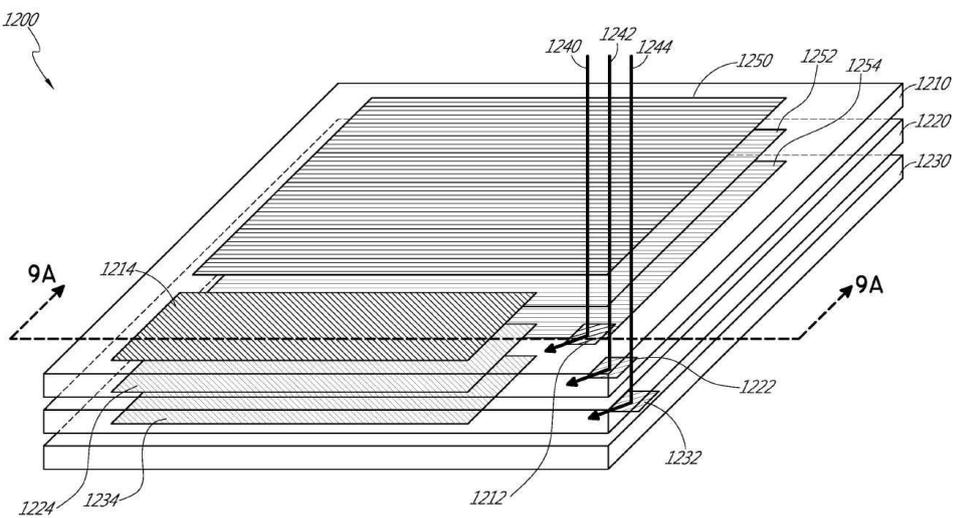
도면8



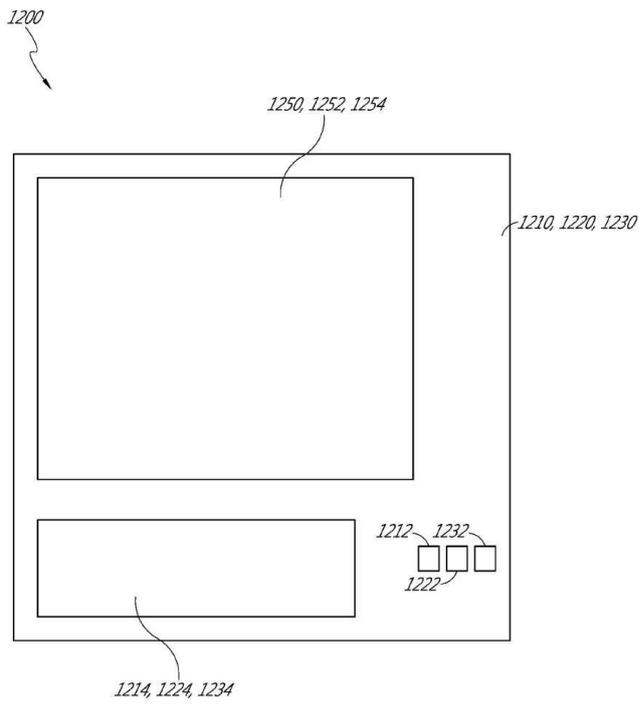
도면9a



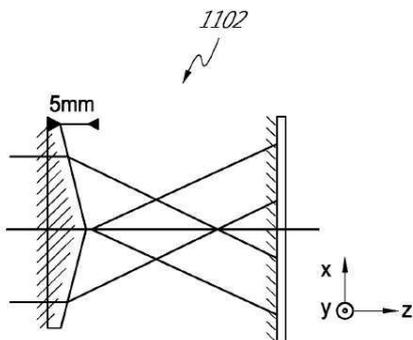
도면9b



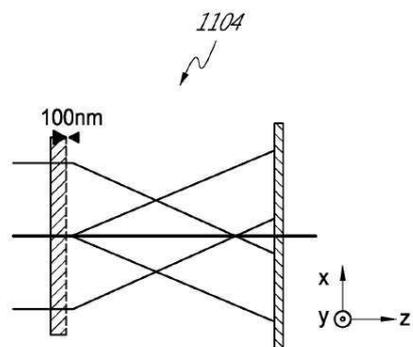
도면9c



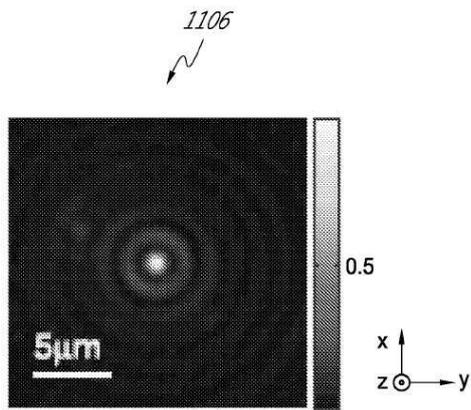
도면10a



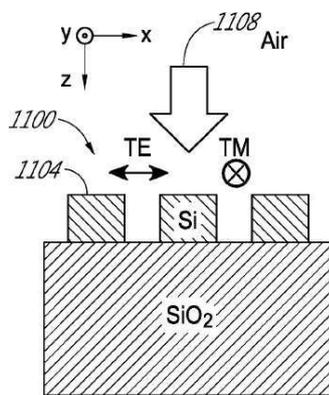
도면10b



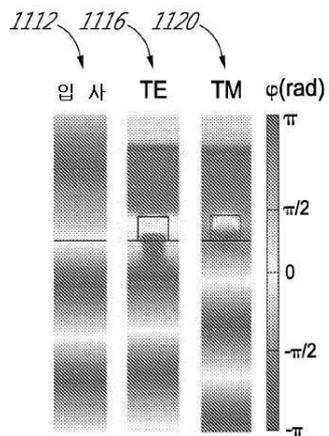
도면10c



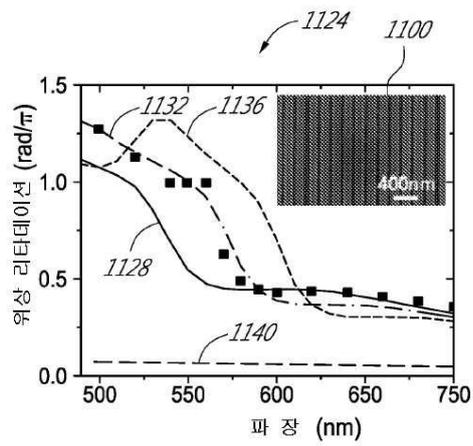
도면11a



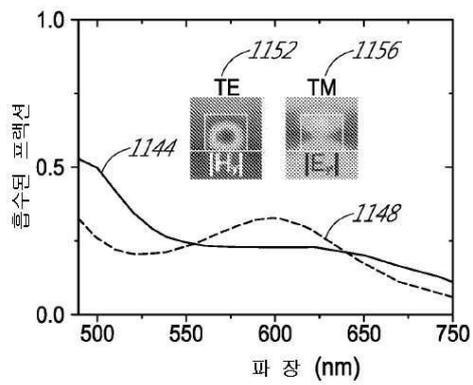
도면11b



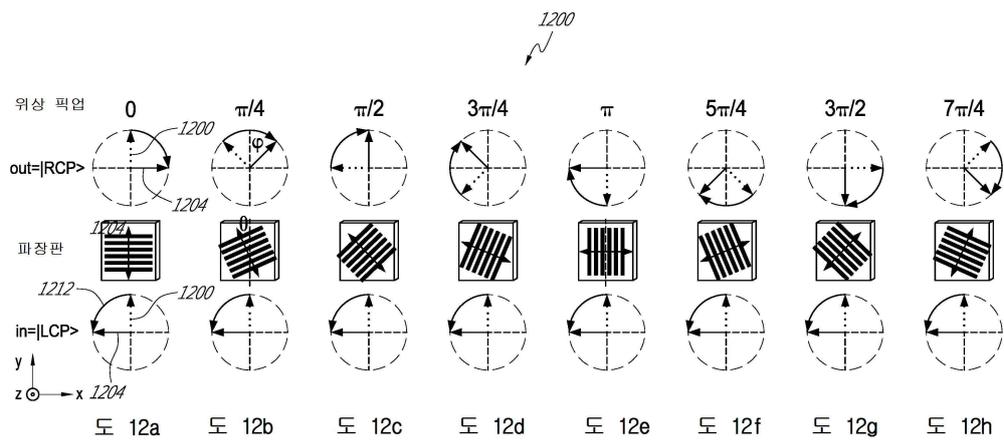
도면11c



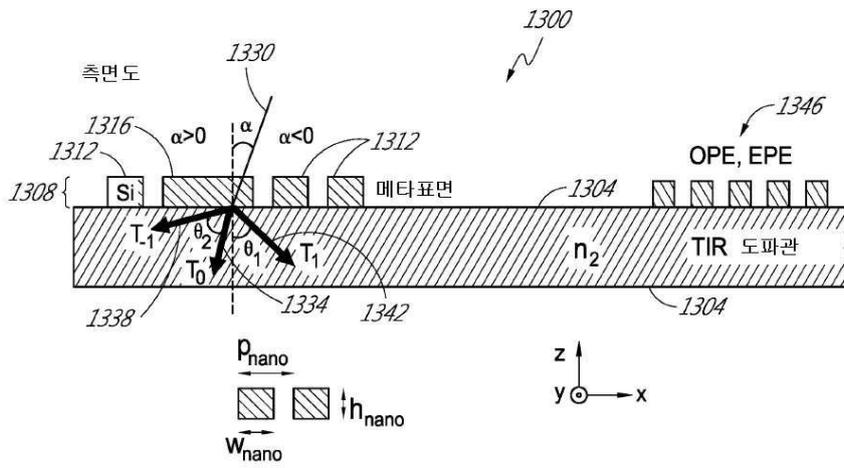
도면11d



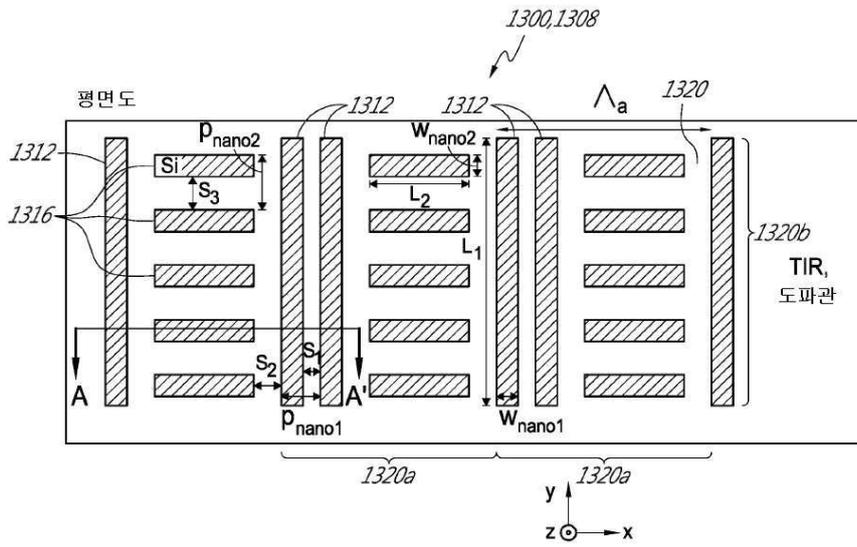
도면12



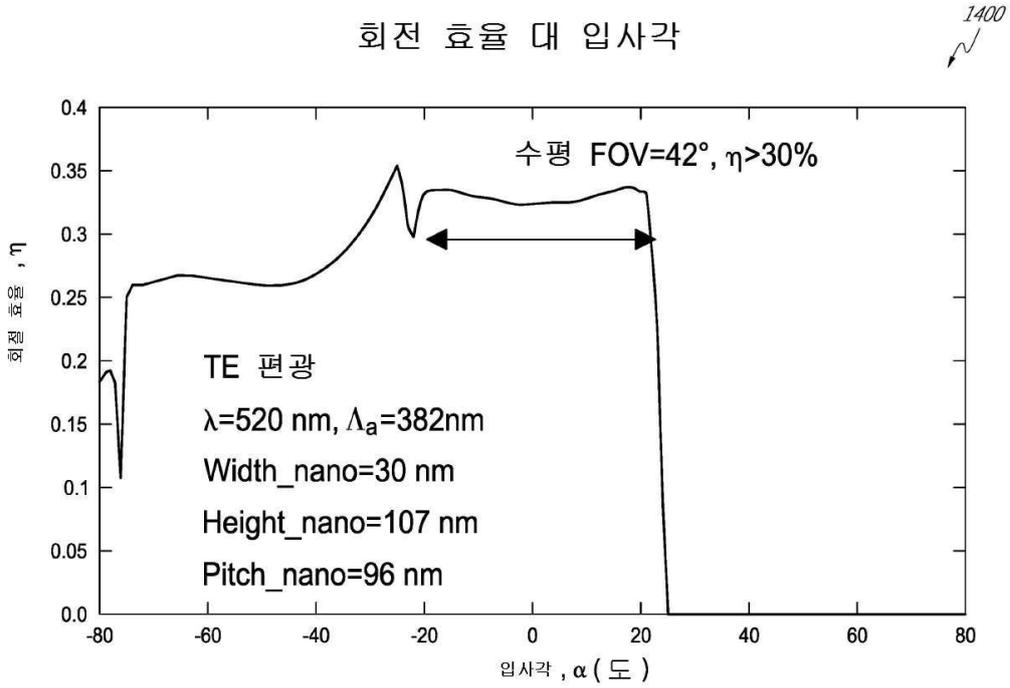
도면13a



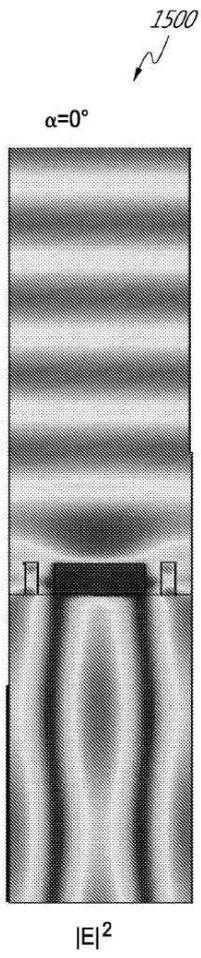
도면13b



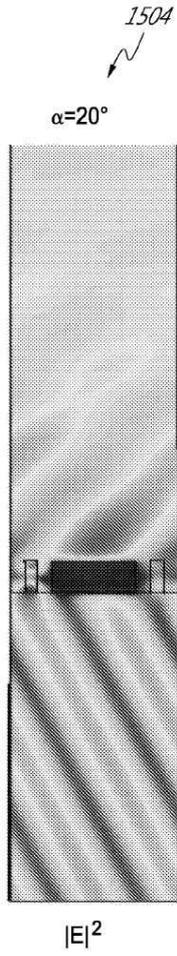
도면14



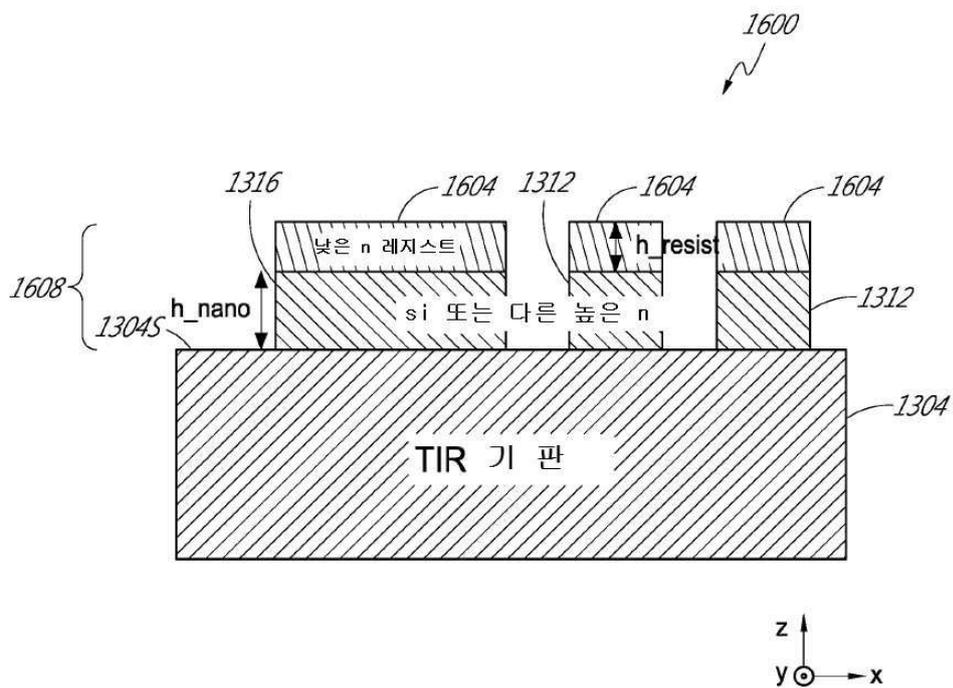
도면15a



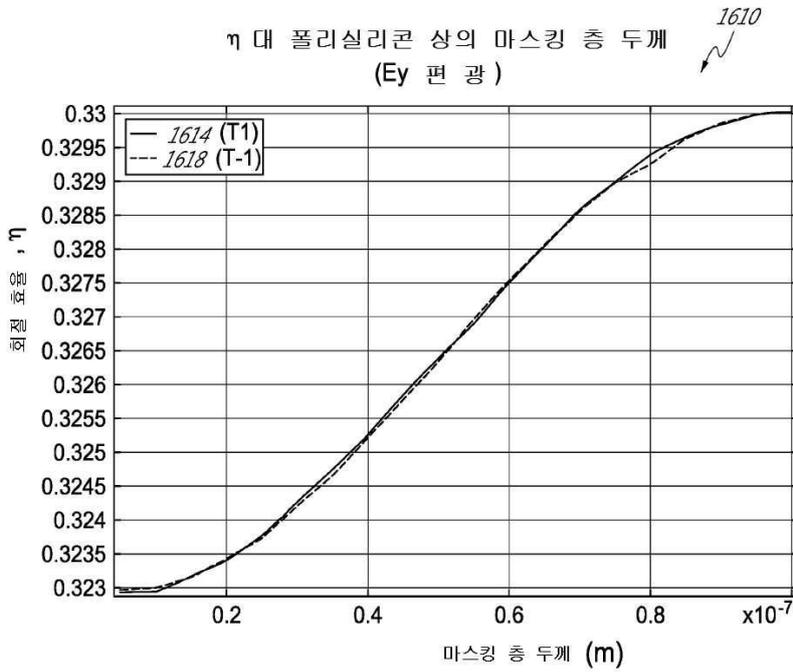
도면15b



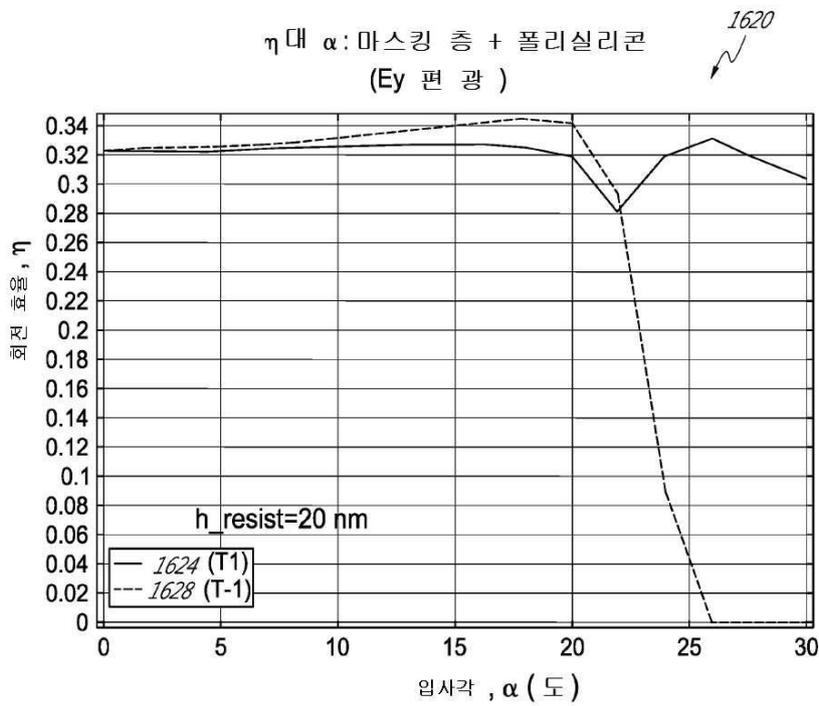
도면16a



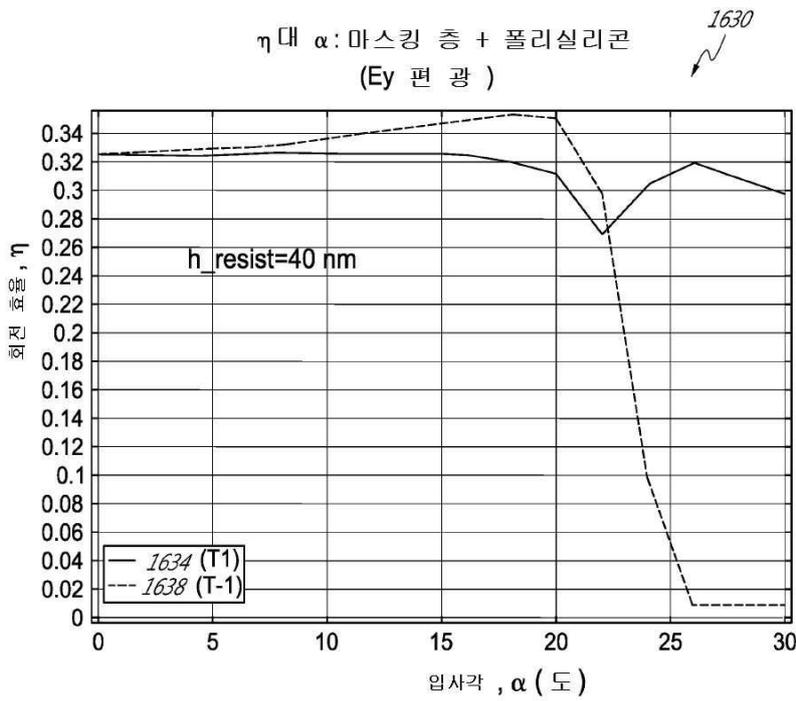
도면16b



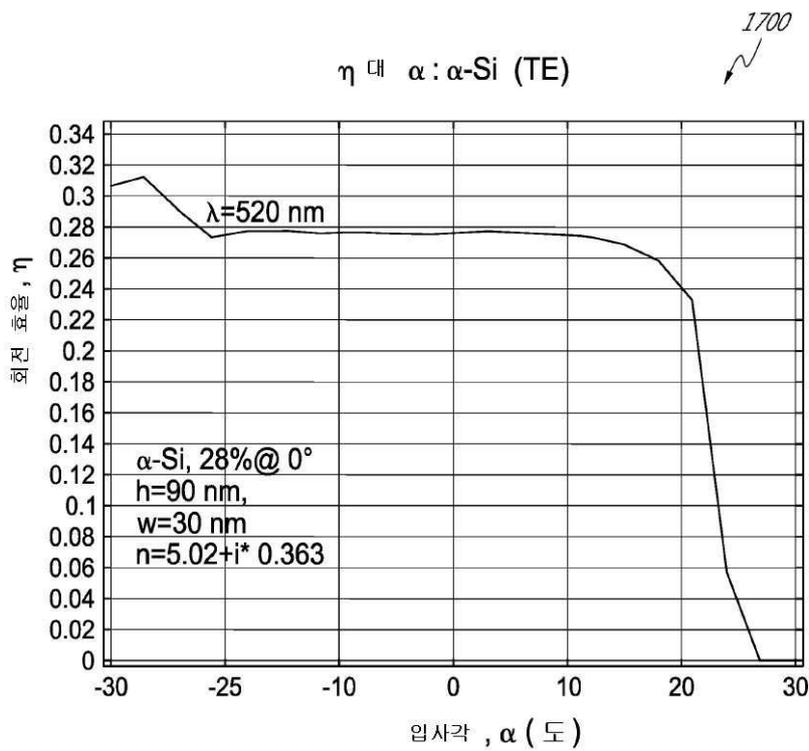
도면16c



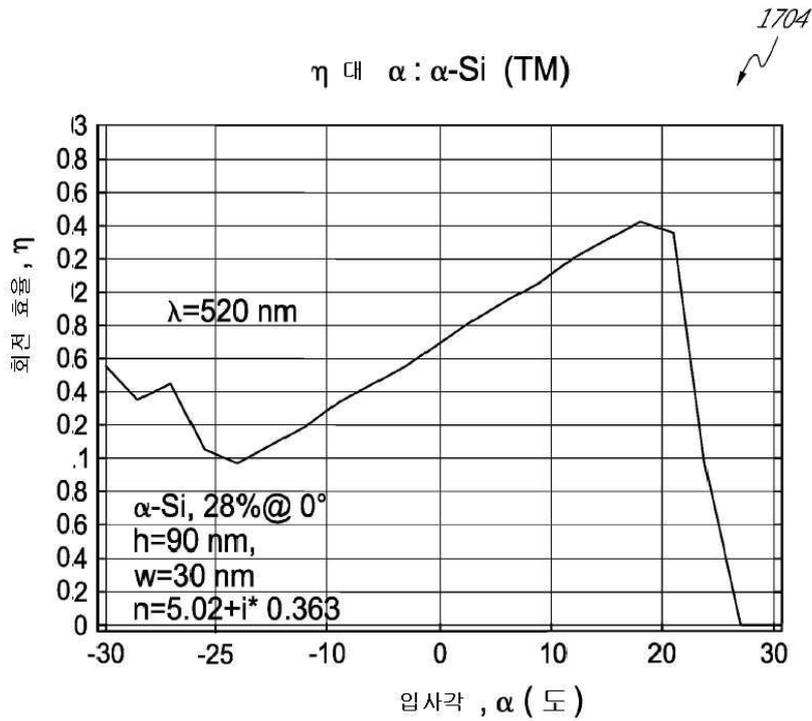
도면16d



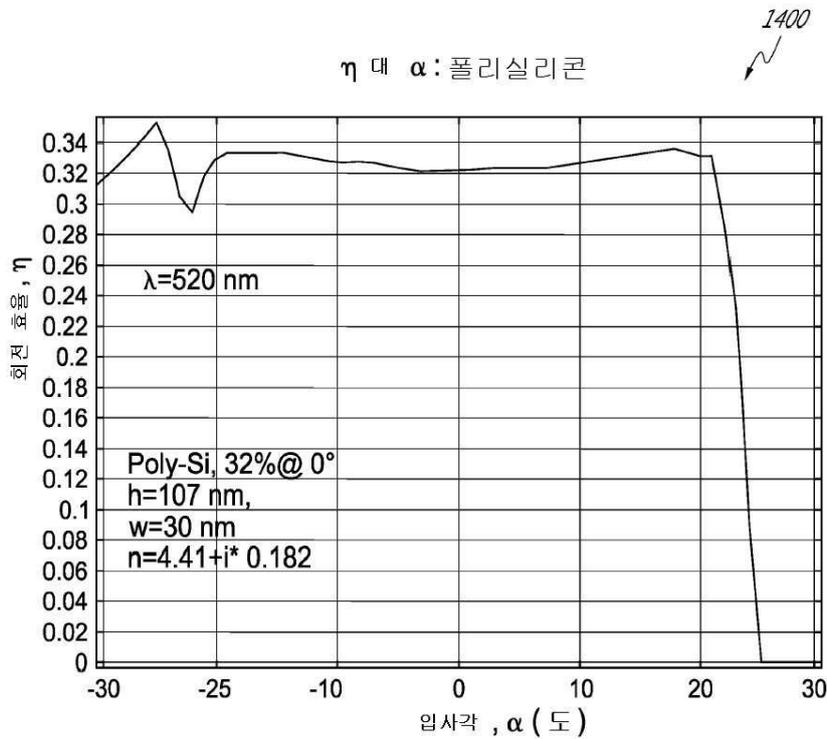
도면17a



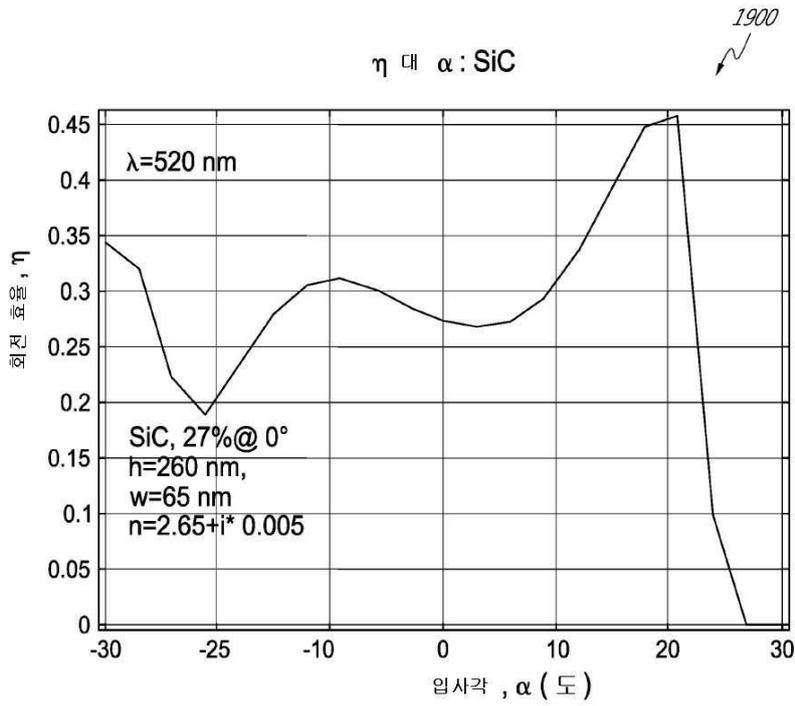
도면17b



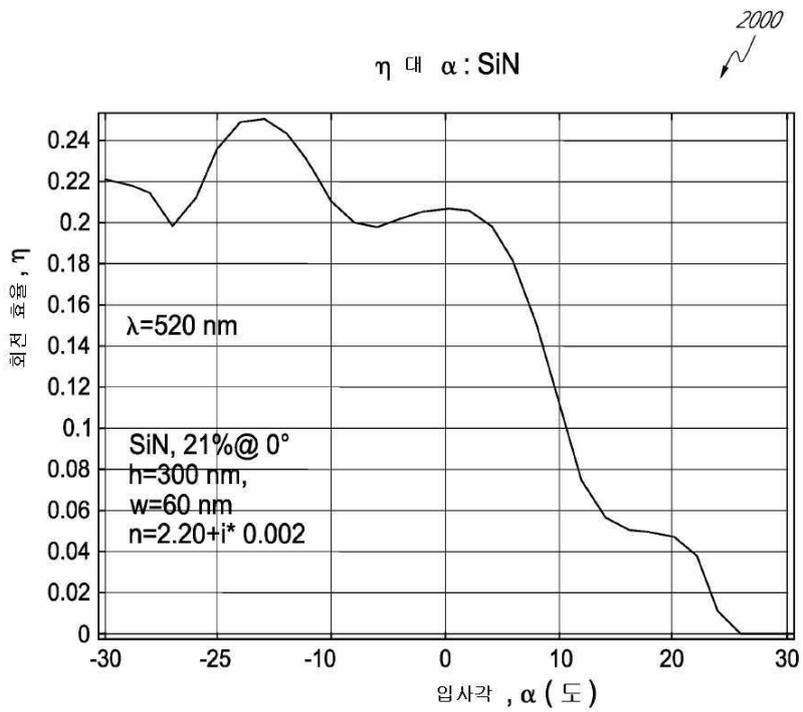
도면18



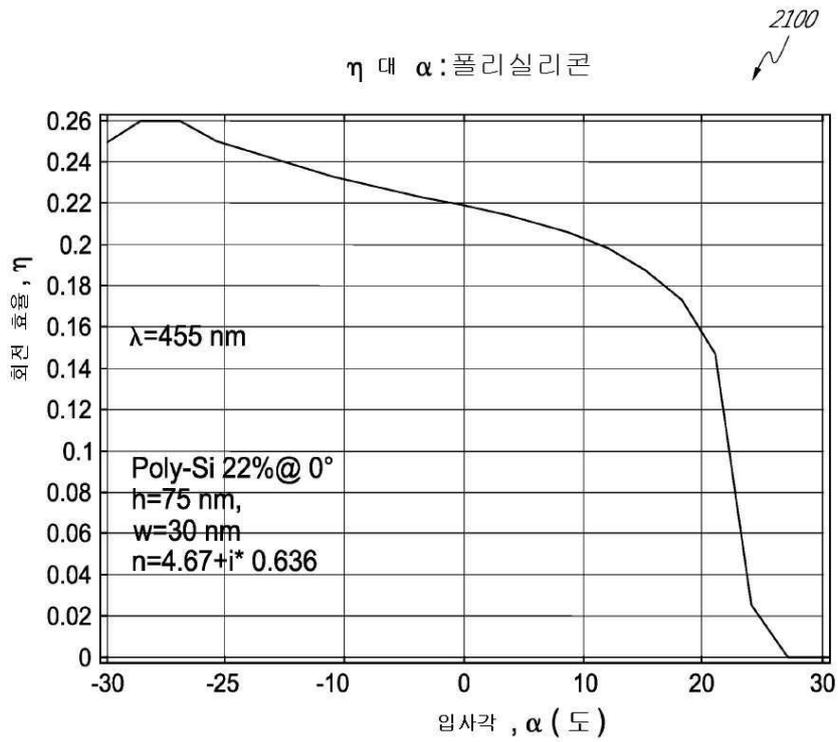
도면19



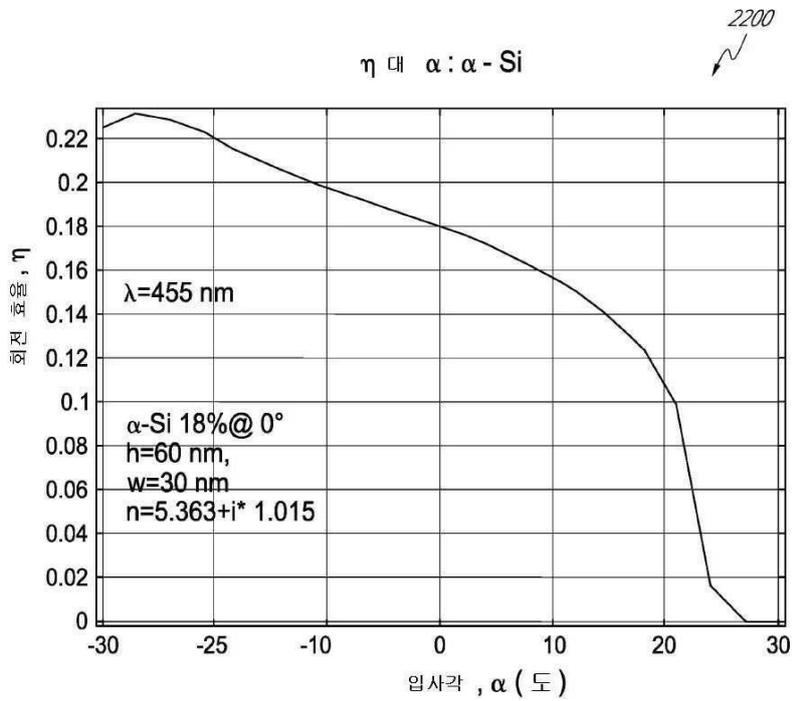
도면20



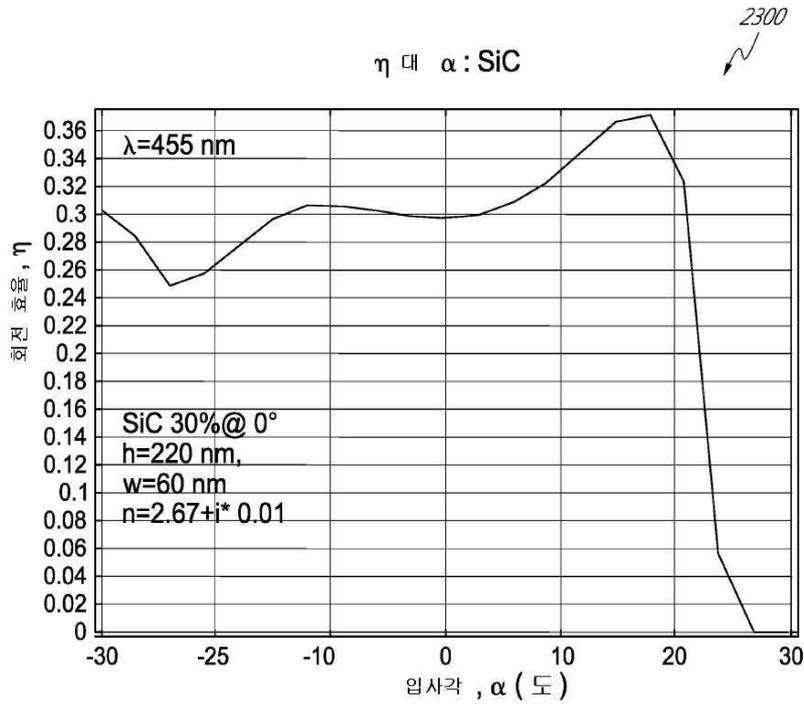
도면21



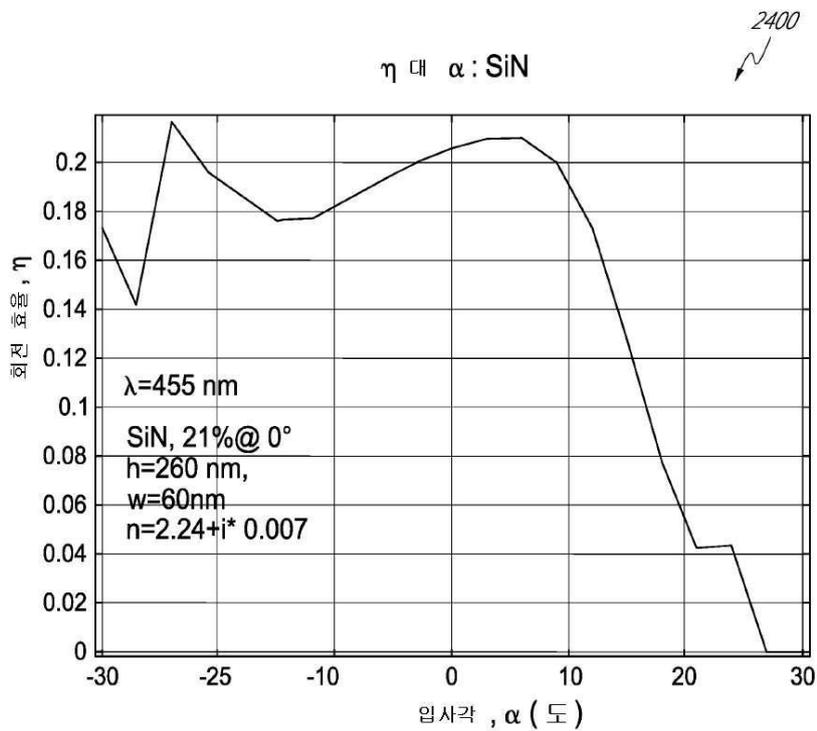
도면22



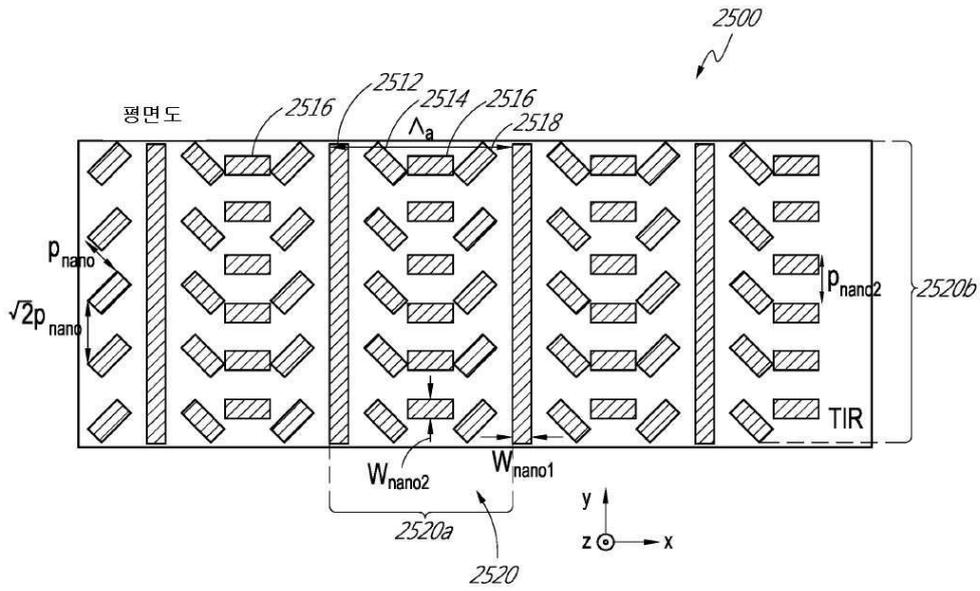
도면23



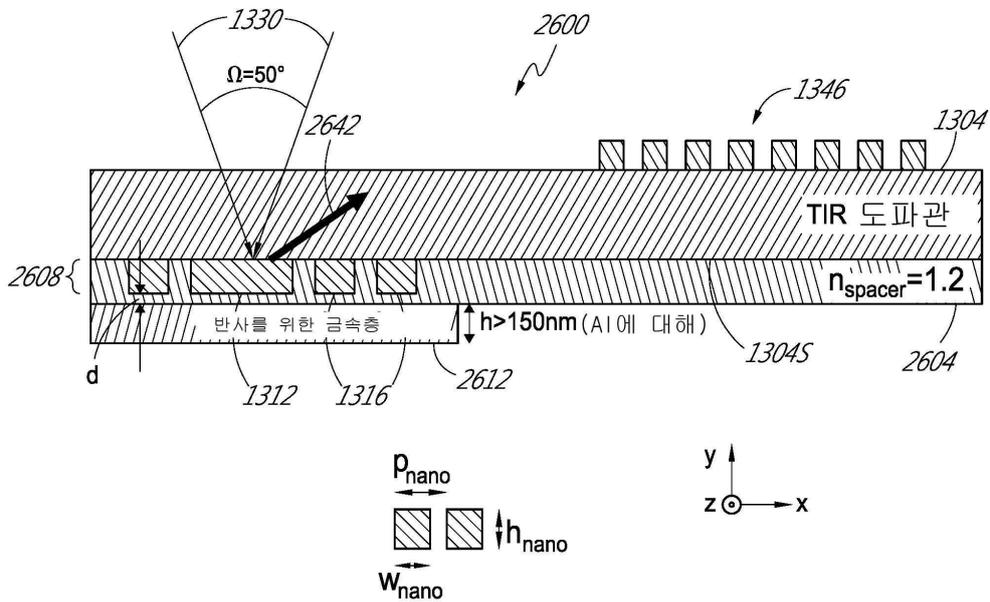
도면24



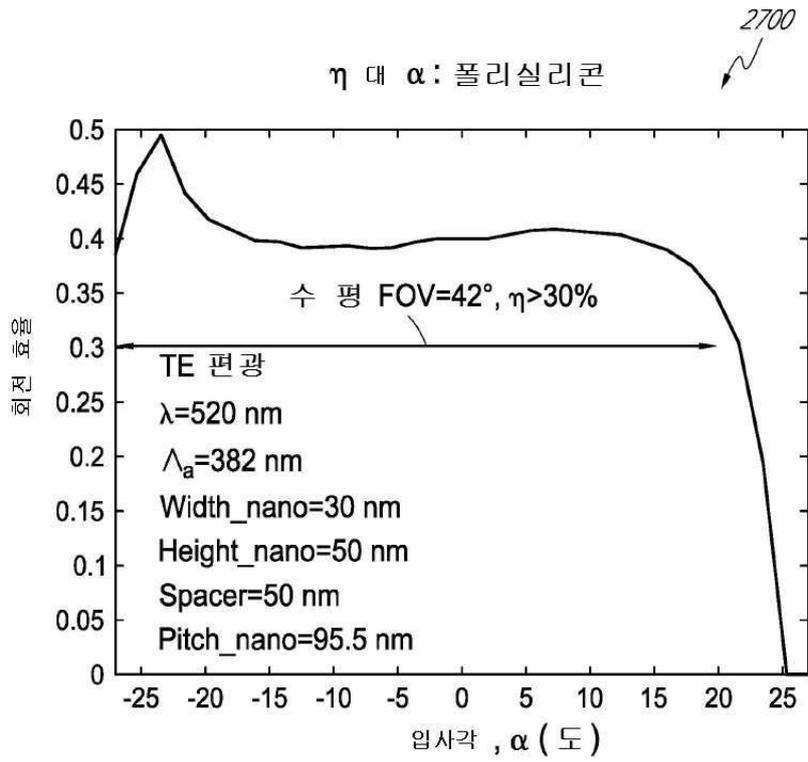
도면25



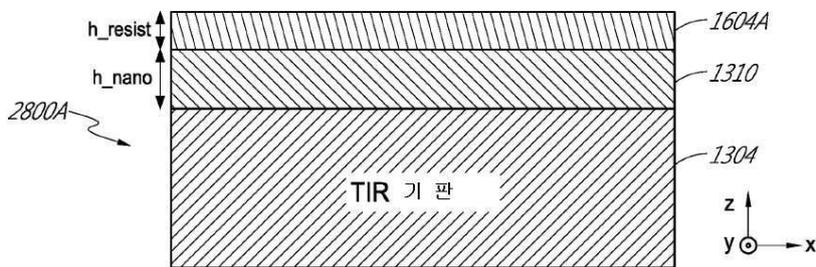
도면26



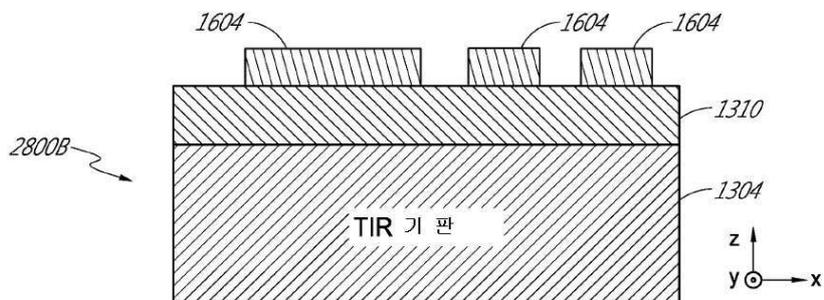
도면27



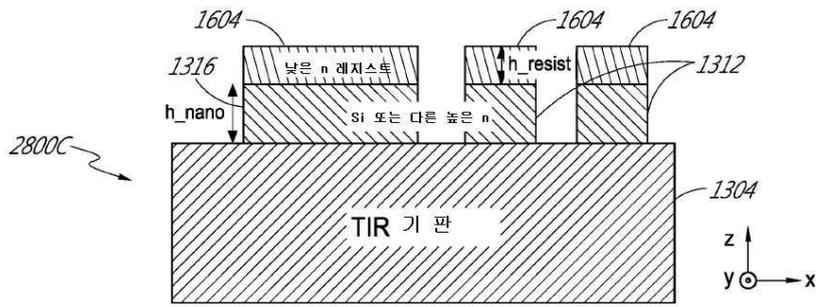
도면28a



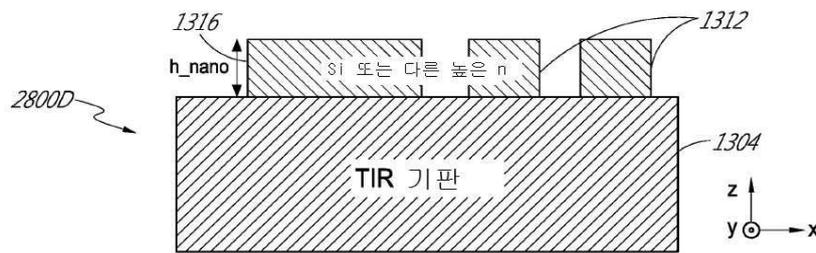
도면28b



도면28c



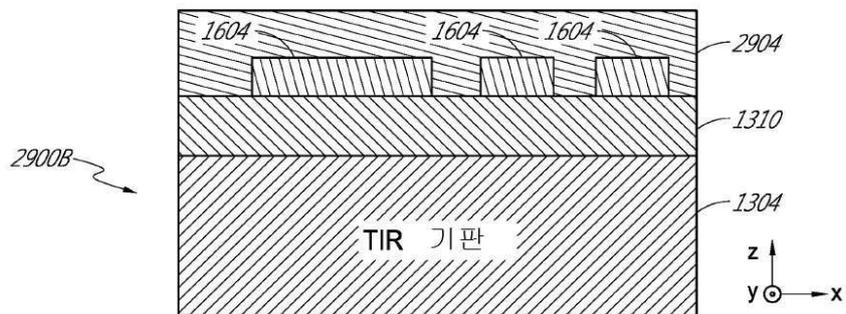
도면28d



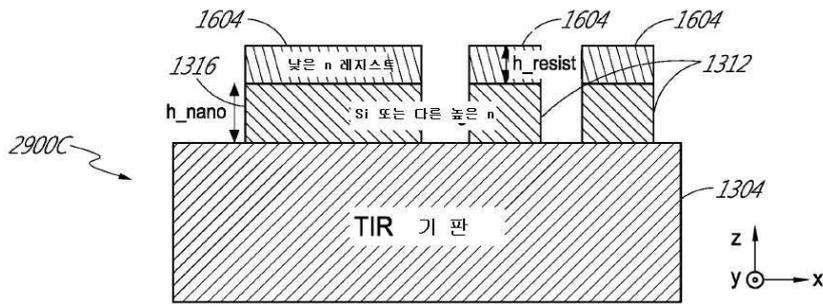
도면29a



도면29b



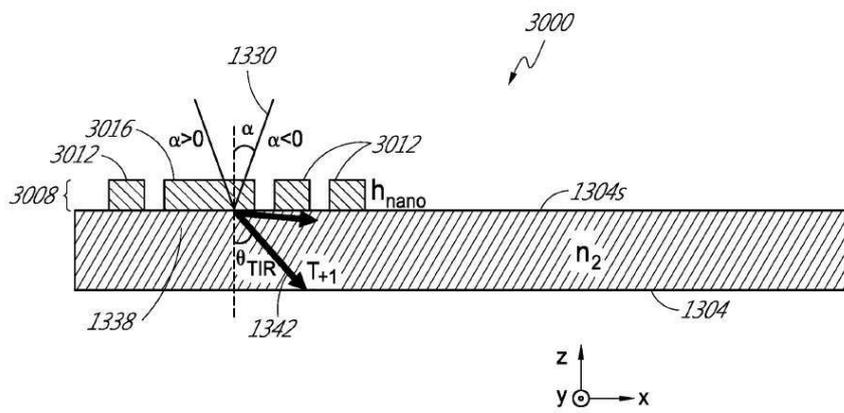
도면29c



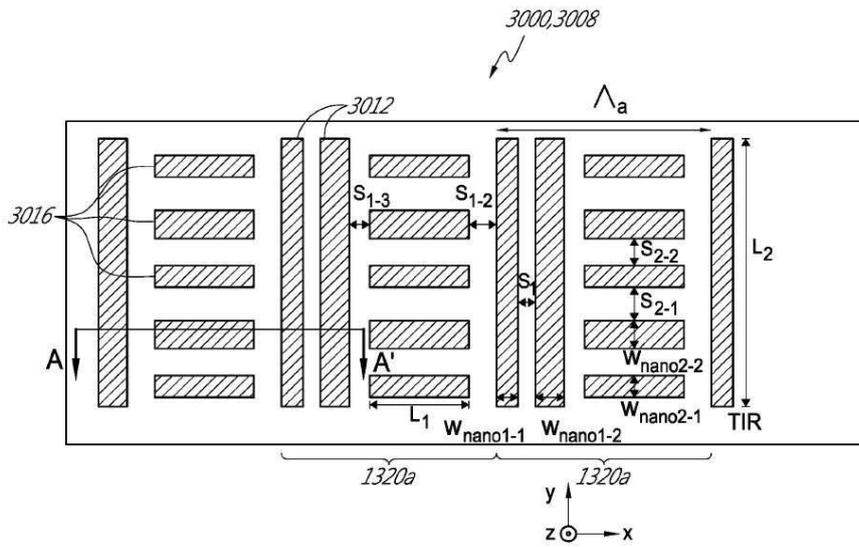
도면29d



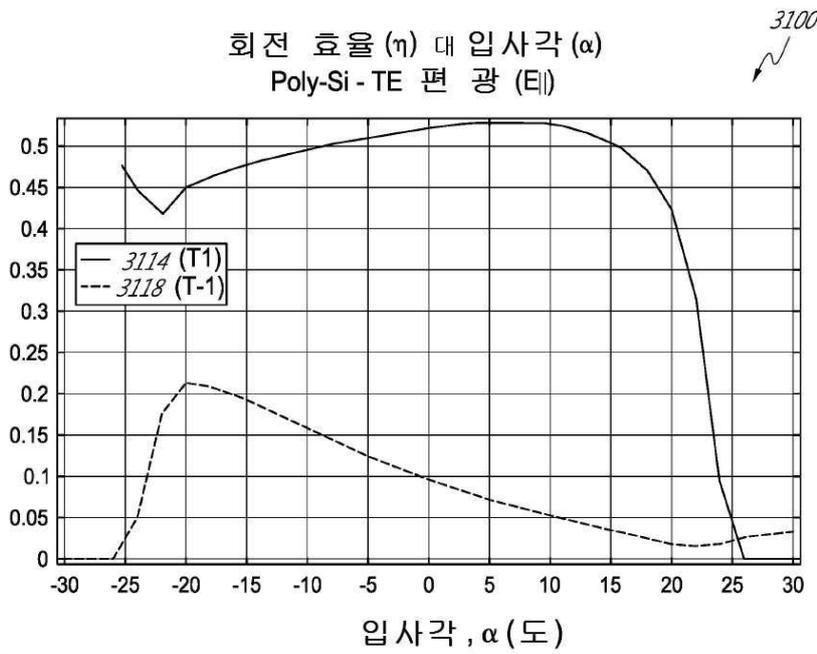
도면30a



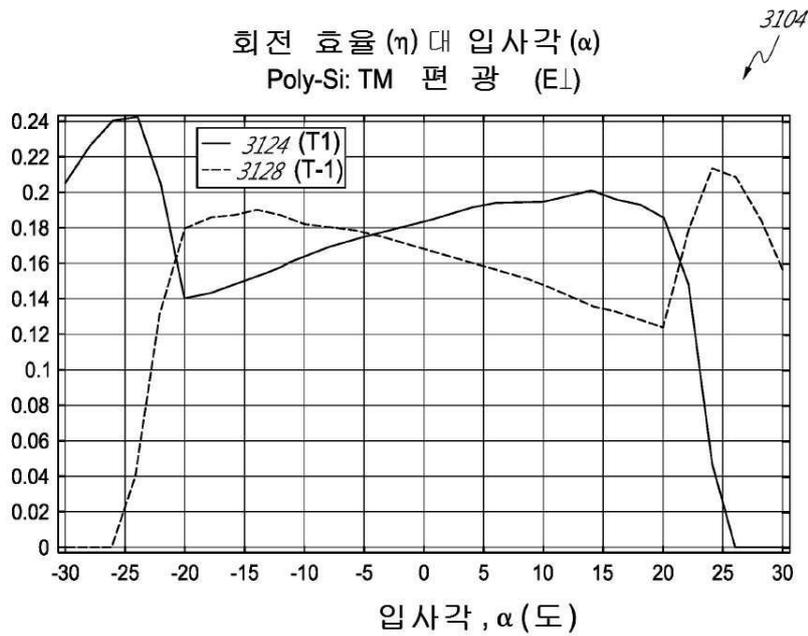
도면30b



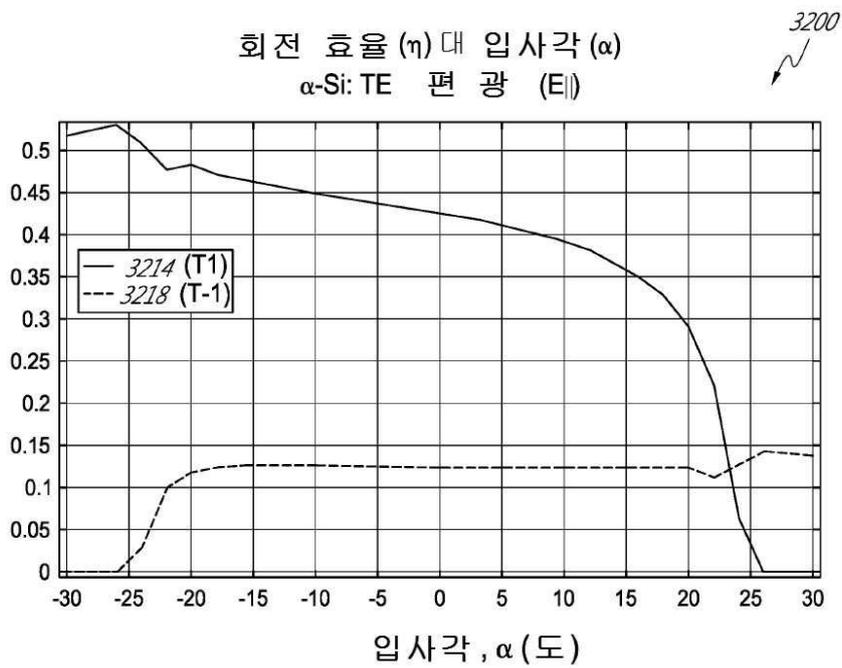
도면31a



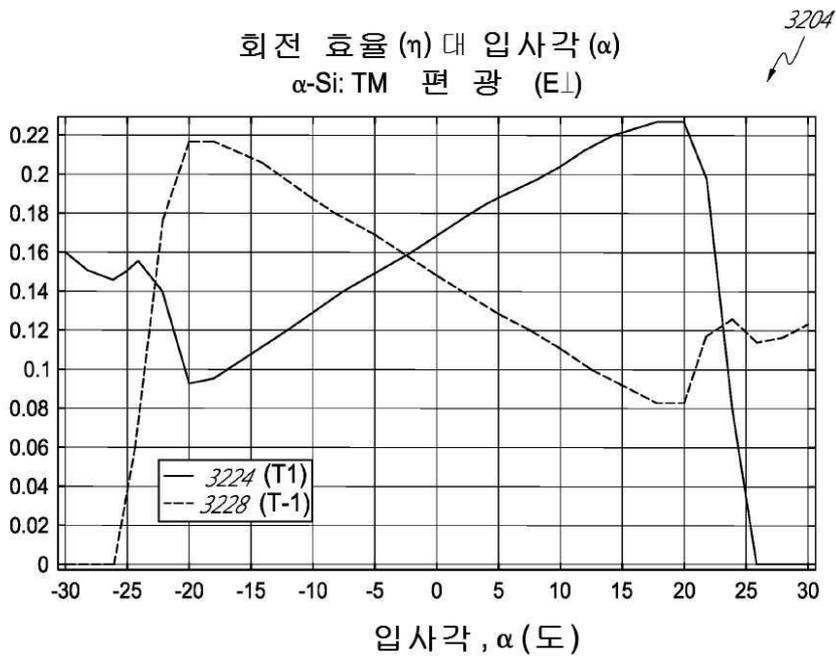
도면31b



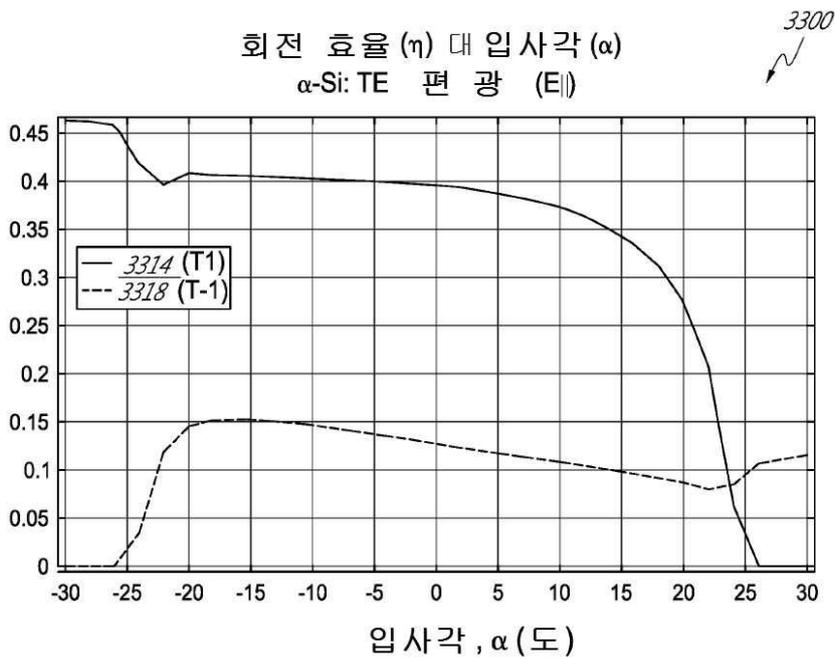
도면32a



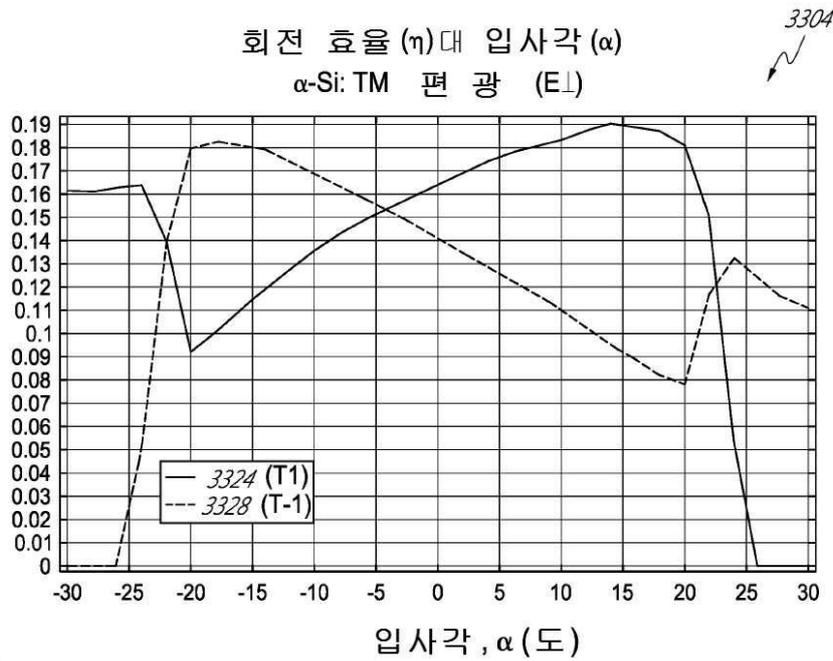
도면32b



도면33a



도면33b



【심사관 직권보정사항】

【직권보정 1】

【보정항목】 청구범위

【보정세부항목】 청구항 1

【변경전】

광학 시스템으로서,

가시 스펙트럼의 파장을 갖는 광을 회절시키도록 구성된 메타표면(metasurface)을 포함하고,

상기 메타표면은 복수의 반복 유닛 셀들을 포함하며,

각각의 유닛 셀은 나노빔들의 2 내지 4 세트들로 구성되고,

나노빔들의 제1 세트는 하나 이상의 제1 나노빔들에 의해 형성되며;

나노빔들의 제2 세트는 상기 하나 이상의 제1 나노빔들에 인접하게 배치되고 서브-파장 간격만큼 서로 분리되는 복수의 제2 나노빔들에 의해 형성되고,

상기 하나 이상의 제1 나노빔들은 제1 배향 방향으로 신장되고, 상기 복수의 제2 나노빔들은 제2 배향 방향으로 신장되며, 상기 제1 배향 방향과 상기 제2 배향 방향은 서로 상이하고,

상기 유닛 셀들은 약 10nm 내지 1 μ m 이하의 주기로 반복되고,

상기 하나 이상의 제1 나노빔들 및 상기 제2 나노빔들은, 제1 굴절률을 갖는 하위 층 및 상기 제1 굴절률보다 낮은 제2 굴절률을 갖는 상위 층을 포함하는 이중층을 포함하며, 상기 상위 층은 마스크 층인,

광학 시스템.

【변경후】

광학 시스템으로서,

가시 스펙트럼의 파장을 갖는 광을 회절시키도록 구성된 메타표면(metasurface)을 포함하고,

상기 메타표면은 복수의 반복 유닛 셀들을 포함하며,

각각의 유닛 셀은 나노빔들의 2 내지 4 세트들로 구성되고,

나노빔들의 제1 세트는 하나 이상의 제1 나노빔들에 의해 형성되며;

나노빔들의 제2 세트는 상기 하나 이상의 제1 나노빔들에 인접하게 배치되고 서브-과장 간격만큼 서로 분리되는 복수의 제2 나노빔들에 의해 형성되고,

상기 하나 이상의 제1 나노빔들은 제1 배향 방향으로 신장되고, 상기 복수의 제2 나노빔들은 제2 배향 방향으로 신장되며, 상기 제1 배향 방향과 상기 제2 배향 방향은 서로 상이하고,

상기 유닛 셀들은 10nm 내지 1 μ m 이하의 주기로 반복되고,

상기 하나 이상의 제1 나노빔들 및 상기 제2 나노빔들은, 제1 굴절률을 갖는 하위 층 및 상기 제1 굴절률보다 낮은 제2 굴절률을 갖는 상위 층을 포함하는 이중층을 포함하며, 상기 상위 층은 마스크 층인,

광학 시스템.

【직권보정 2】

【보정항목】 청구범위

【보정세부항목】 청구항 5

【변경전】

제1 항에 있어서,

상기 하나 이상의 제1 나노빔들 및 상기 제2 나노빔들은 서로에 대해 약 90도만큼 회전되는 배향 방향으로 배향되는,

광학 시스템.

【변경후】

제1 항에 있어서,

상기 하나 이상의 제1 나노빔들 및 상기 제2 나노빔들은 서로에 대해 90도만큼 회전되는 배향 방향으로 배향되는,

광학 시스템.

【직권보정 3】

【보정항목】 청구범위

【보정세부항목】 청구항 35

【변경전】

제34 항에 있어서,

상기 제4 배향 방향 및 상기 제3 배향 방향은 서로에 대해 약 90도 만큼 회전되는,

광학 시스템.

【변경후】

제34 항에 있어서,

상기 제4 배향 방향 및 상기 제3 배향 방향은 서로에 대해 90도 만큼 회전되는,

광학 시스템.

【직권보정 4】

【보정항목】 청구범위

【보정세부항목】 청구항 37

【변경전】

제1 항에 있어서,

상기 상위 층은 약 2.0보다 낮은 굴절률을 갖는 재료로 형성되는,

광학 시스템.

【변경후】

제1 항에 있어서,
 상기 상위 층은 2.0보다 낮은 굴절률을 갖는 재료로 형성되는,
 광학 시스템.

【직권보정 5】

【보정항목】 청구범위

【보정세부항목】 청구항 50

【변경전】

광학 시스템을 제조하는 방법으로서,

기판을 제공하는 단계;

상기 기판 상에 복수의 유닛 셀들 - 상기 유닛 셀들은 나노빔들의 2 내지 4 세트들로 구성됨 - 을 포함하는 메타표면을 형성하는 단계를 포함하고,

상기 유닛 셀들을 형성하는 단계는,

제1 굴절률을 갖는 하위 층을, 상기 제1 굴절률보다 낮은 제2 굴절률을 갖는 상위 층을 마스크 층으로 사용하여 에칭함으로써, 나노빔들의 제1 세트 및 나노빔들의 제2 세트를 패터닝하는 단계를 포함하며, 상기 나노빔들의 제1 세트 및 상기 나노빔들의 제2 세트를 패터닝하는 단계는,

하나 이상의 제1 나노빔들을 형성함으로써 상기 나노빔들의 제1 세트를 형성하는 단계; 및

상기 하나 이상의 제1 나노빔에 인접하게 상기 나노빔들의 제2 세트를 형성하는 단계를 포함하고,

상기 나노빔들의 제2 세트는 서브-파장 간격만큼 서로 분리되는 복수의 제2 나노빔들을 포함하며,

상기 하나 이상의 제1 나노빔들 및 상기 복수의 제2 나노빔들은 상이한 배향 방향으로 신장되고,

상기 유닛 셀들은 약 10nm 내지 1 μ m 이하의 주기로 반복되며,

상기 하나 이상의 제1 나노빔들 및 상기 제2 나노빔들은 상기 하위 층 및 상기 상위 층을 포함하는 이중층인,

광학 시스템을 제조하는 방법.

【변경후】

광학 시스템을 제조하는 방법으로서,

기판을 제공하는 단계;

상기 기판 상에 복수의 유닛 셀들 - 상기 유닛 셀들은 나노빔들의 2 내지 4 세트들로 구성됨 - 을 포함하는 메타표면을 형성하는 단계를 포함하고,

상기 유닛 셀들을 형성하는 단계는,

제1 굴절률을 갖는 하위 층을, 상기 제1 굴절률보다 낮은 제2 굴절률을 갖는 상위 층을 마스크 층으로 사용하여 에칭함으로써, 나노빔들의 제1 세트 및 나노빔들의 제2 세트를 패터닝하는 단계를 포함하며, 상기 나노빔들의 제1 세트 및 상기 나노빔들의 제2 세트를 패터닝하는 단계는,

하나 이상의 제1 나노빔들을 형성함으로써 상기 나노빔들의 제1 세트를 형성하는 단계; 및

상기 하나 이상의 제1 나노빔에 인접하게 상기 나노빔들의 제2 세트를 형성하는 단계를 포함하고,

상기 나노빔들의 제2 세트는 서브-파장 간격만큼 서로 분리되는 복수의 제2 나노빔들을 포함하며,

상기 하나 이상의 제1 나노빔들 및 상기 복수의 제2 나노빔들은 상이한 배향 방향으로 신장되고,

상기 유닛 셀들은 10nm 내지 1 μ m 이하의 주기로 반복되며,

상기 하나 이상의 제1 나노빔들 및 상기 제2 나노빔들은 상기 하위 층 및 상기 상위 층을 포함하는 이중층인,

광학 시스템을 제조하는 방법.