(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2021-0026230
(43) 공개일자 2021년03월10일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G02B 5/20 (2006.01) *G02B 5/30* (2006.01)
(52) CPC특허분류
G02B 5/20 (2013.01)
G02B 5/3025 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2019-0106717
(22) 출원일자 2019년08월29일
심사청구일자 2019년08월29일

(71) 출원인
이화여자대학교 산학협력단
서울특별시 서대문구 이화여대길 52 (대현동, 이화여자대학교)
(72) 발명자
현가담
서울특별시 강남구 압구정로 151, 112동 1101호(압구정동, 현대아파트)
김영지
서울특별시 동작구 만양로 19, 703동 109호(노량진동, 신동아리버파크아파트)
정경민
서울특별시 마포구 연희로1길 39, 401호(연남동, 경신아트빌)
(74) 대리인
특허법인엠에이피에스

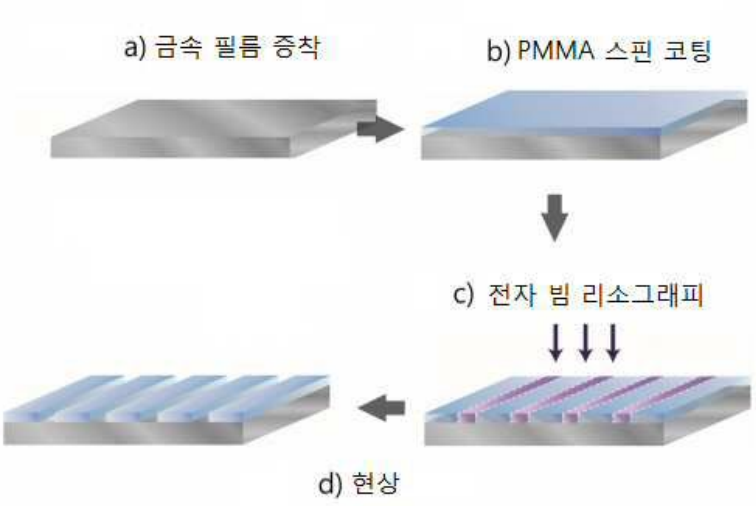
전체 청구항 수 : 총 8 항

(54) 발명의 명칭 **손실 금속 기반 반사형 컬러 픽셀**

(57) 요 약

본원은, 손실 금속 기재 상에 형성된 유전체 그레이팅을 포함하는 반사형 컬러 픽셀에 관한 것이다.

대 표 도 - 도1



이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 1711091139
부처명 과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명 한국연구재단
연구사업명 이공학분야(S/ERC)
연구과제명 혼성계면 화학구조 연구센터
기 여 율 30/100
과제수행기관명 이화여자대학교 산학협력단
연구기간 2019.03.01 ~ 2020.02.29
이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 1711092253
부처명 과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명 한국연구재단
연구사업명 신진연구(연평균연구비 1억원 이내)
연구과제명 무질서한 다분산성 입자기반의 고채도 비색계 스위치 개발
기 여 율 30/100
과제수행기관명 이화여자대학교 산학협력단
연구기간 2019.03.01 ~ 2020.02.29
이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 1711096691
부처명 과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명 한국연구재단
연구사업명 기후변화대응기술개발(R&D)
연구과제명 필름형 반투과 유기태양전지 서브모듈 개발
기 여 율 30/100
과제수행기관명 이화여자대학교 산학협력단
연구기간 2019.06.01 ~ 2020.03.31
이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 1711037753
부처명 미래창조과학부
과제관리(전문)기관명 한국연구재단
연구사업명 나노 · 소재기술개발사업
연구과제명 나노팹시설활용지원사업
기 여 율 10/100
과제수행기관명 (사)국가나노인프라협의체
연구기간 2016.05.01 ~ 2017.04.30

명 세 서

청구범위

청구항 1

손실 금속 (lossy metal) 기재 상에 형성된 유전체 그레이팅

을 포함하는, 반사형 컬러 픽셀.

청구항 2

제 1 항에 있어서,

상기 유전체 그레이팅은 1 차원 유전체 그레이팅인 것인, 반사형 컬러 픽셀.

청구항 3

제 1 항에 있어서,

상기 그레이팅 주기는 상기 픽셀에 의해 구현되는 색상 광의 파장에 상응하는 것인, 반사형 컬러 픽셀.

청구항 4

제 3 항에 있어서,

상기 유전체 그레이팅의 주기는 300 nm 내지 700 nm이고,

상기 유전체 그레이팅의 에치 폭은 130 nm 내지 490 nm이며,

상기 유전체 그레이팅의 주기와 에치 폭의 범위는, [(상기 유전체 그레이팅의 주기-에치 폭)/주기] 식으로 정의되는 듀티 싸이클 (duty cycle)이 0 내지 1인 상관 관계를 만족하는 것인, 반사형 컬러 픽셀.

청구항 5

제 1 항에 있어서,

상기 픽셀에 대하여 45° 방향으로 입사되는 입력 편광자에 대하여 상기 손실 금속에 의해 스펙트럼 순도를 향상시킬 수 있는 색상 광을 반사시키는 것인, 반사형 컬러 픽셀.

청구항 6

제 5 항에 있어서,

상기 픽셀에서 상기 그레이팅에 대하여 정의된 상기 입력 편광자를 통과한 입사 편광의 두 개의 직교 성분인, s-편광 필드 및 p-편광 필드를 수용하여,

출력 편광자가 크로스-편광인 경우 $\pm\pi/2$ 각도 회전된 반사 광만 투과되는 것인, 반사형 컬러 픽셀.

청구항 7

제 6 항에 있어서,

상기 p-편광 필드는 상기 금속 층-그레이팅 층 인터페이스 사이에 위치되며,

상기 s-편광 필드는 공기 층-그레이팅 층 인터페이스 사이에 위치되는 것인, 반사형 컬러 픽셀.

청구항 8

제 1 항에 있어서,

상기 픽셀은 다기능 필터 기능, 촉매 기능, CMOS 호환가능성 또는 열 안정성 향상을 포함하는 것인, 반사형 컬러 픽셀.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본원은, 손실 금속 기재 상에 형성된 유전체 그레이팅을 포함하는 반사형 컬러 픽셀에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 선명한 구조적 색상들을 생성하기 위한 노력은 국부화된 표면 플라즈몬, 표면 플라즈몬 분극 (surface plasmon polaritons, SPPs) 및 Mie 공명 (Mie resonance)의 사용을 중심으로 대부분 발전하여 왔다. SPP-기반 시스템들의 경우, 금속 그레이팅 또는 어레이 구조체가 SPPs를 회절적으로 여기시키고 그것들의 간섭을 촉진하기 위해 널리 이용되었다. 금속 구조체들과 혼성화된 유전체 형태에서 Mie 공명기 (Mie resonator)는 다극 공명 (multipolar resonance) 또는 쌍극 공명 (dipolar resonance)을 통해 고-해상도 컬러 픽셀을 생성하는데 사용되어왔다. 모든 경우에 있어서, 가시광선 범위에서 상대적으로 낮은 광학적 손실 또는 거의 단일 반사율 (near-unity reflectivity)을 나타내는 금속들, 즉 Ag 및 Al은, 그러한 구조체들을 달성하기 위한 주요 물질들을 대표한다. 이러한 금속들은 다양한 디자인에서 선명한 색상을 생성하는 데 필요한 광학적 특성들을 제공하지만, 그것들은 그 수가 제한되어 있어, CMOS 호환가능성 (compatible) 제한, 다기능성 용도를 위한 화학적 기능성의 범위 또는 향상된 성능을 위한 안정성을 제한한다. 예를 들어, 통상적으로 발생하는 Ag 표면의 산화는 일반적으로 광학적 성능을 손상시키며, 이것은 상기 효과를 우회하려는 광범위한 연구 노력들을 촉진한다. 반면, Pt는 500 ℃까지 산화에 대한 저항성을 가져 증가된 광학적 안정성의 잠재력을 제공한다. Pt 이외에, Ni 및 Pd와 같은 다른 금속들은 부식에 대한 높은 내성을 제공하고 촉매적 활성을 갖는다. W는 CMOS 공정과 호환이 가능하고, 순수한 금속들 중에서 가장 낮은 열 팽창 계수를 가지며, 비용적으로 Al에 상당하고, 이것은 실제적 구현에 대한 강력한 인센티브를 제공한다. 특히, W는 CMOS 디자인에서 통상적으로 사용되는 인터컨넥트 (interconnect) 물질이다. 그러나 그것들의 흥미로운 특성들에도 불구하고, 상기 금속들은 구조적 색상 디자인에서 그것들의 사용을 방해하는 가시광선 영역에서 높은 광학적 손실 및 단지 보통의 반사율을 나타낸다. 구조적 색상의 화학적 특성들 및 물리적 특성들을 다양화하기 위해서, 손실이 큰 금속을 포함하는 확장된 범위의 금속 유형들의 선명한 색상들을 생성하는 전략이 필요하다.

[0003] [선행기술 문헌]

[0004] 대한민국 특허 등록 공보 제10-1691956호

발명의 내용

해결하려는 과제

[0005] 본원은, 손실 금속 기재 상에 형성된 유전체 그레이팅을 포함하는 반사형 컬러 픽셀을 제공하고자 한다.

[0006] 그러나, 본원이 해결하고자 하는 과제는 이상에서 언급한 과제로 제한되지 않으며, 언급되지 않은 또 다른 과제들은 아래의 기재로부터 통상의 기술자에게 명확하게 이해될 수 있을 것이다.

과제의 해결 수단

[0007] 본원의 일 측면은, 손실 금속 기재 상에 형성된 유전체 그레이팅을 포함하는, 반사형 컬러 픽셀을 제공한다.

발명의 효과

[0008] 본원의 구현예들에 따른 반사형 컬러 픽셀에 있어서, 근-파장 유전체 그레이팅을 지원하는 손실 금속들은 손실이 적은 금속들보다 더 높은 색상 선명도를 나타낸다.

[0009] 본원의 구현예들에 따르면, 상기 손실 금속들은 손실이 적은 금속들보다 더 넓은 sRGB 색상 영역 커버리지를 나타낸다.

[0010] 본원의 구현예들에 따른 상기 반사형 컬러 픽셀은 상기 유전체 그레이팅의 주기를 변화시킴으로써 전체 가시광 범위에 걸쳐 색상을 수동적으로 조절할 수 있다.

[0011] 본원의 구현예들에 따른 상기 반사형 컬러 픽셀은 상기 유전체 그레이팅의 에치 폭을 통해 반사 광의 색상을 미세-조정할 수 있다.

[0012] 본원의 구현예들에 따른 상기 반사형 컬러 픽셀은 상기 크로스-편광 반사 스펙트럼에서 생성된 색상의 단색성을 증가시킨다.

[0013] 본원의 구현예들에 따른 상기 반사형 컬러 픽셀은 상기 크로스-편광 입/출력 광 스킴을 통해 픽셀 및 백그라운드 사이의 높은 콘트라스트를 달성할 수 있다.

[0014] 본원의 구현예들에 따른 상기 반사형 컬러 픽셀은 상기 손실 금속 기재 상에 형성된 상기 유전체 그레이팅을 포함하여 반사 광의 높은 선명도를 달성할 수 있다.

[0015] 본원의 구현예들에 따른 상기 반사형 컬러 픽셀은 상기 손실 금속들에 의하여 반사 광의 스펙트럼의 순도를 향상시킬 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0016] 도 1은, 본원의 일 실시예에 있어서, 금속 기재 상의 유전체 그레이팅의 제조 과정을 나타낸 것이다. (a) 광학적으로 불투명한 두께의 금속 필름 (Ag, Pt 또는 W)을 전자 빔 증발 또는 DC 스퍼터링을 이용하여 Si 기재 상에 증착, (b) PMMA 층을 상기 Si 기재 상에 스핀 코팅하고, (c) 라인 그레이팅 패턴들은 전자 빔 리소그래피에 의해 상기 PMMA 층에 표시되고 및 (d) 샘플을 현상하는 것을 나타낸 것이다.

도 2는, 본원의 일 실시예에 있어서, (a) 백그라운드를 형성하는 패턴화되지 않은 PMMA 필름, (b) 픽셀을 나타내는 에치된 PMMA 그레이팅을 지원하는 금속의 개략도, (c) 다양한 주기 및 에치 폭을 갖는 Pt 기재 상의 픽셀들의 컬러 팔레트, 및 (d) 각도로 관찰한 (c)에서 상기 세 개 픽셀들의 SEM 이미지들을 나타낸 것이다.

도 3은, 본원의 일 실시예에 있어서, 크로스-편광 입력-출력 셋업의 개략도를 나타낸 것이다.

도 4a 및 도 4b는, 본원의 일 실시예에 있어서, (a) PEC 기재 상에서 550 nm-주기, 150 nm-에치 폭, 및 200 nm-두께를 갖는 유전체 그레이팅으로부터 계산된 크로스-편광 반사 스펙트럼, (b) 금속 기재 상의 그레이팅, 및 s-pol와 p-pol 필드 성분들의 배향의 개략도를 나타낸 것이고, 도 4c 내지 도 4f는, 본원의 일 실시예에 있어서, PEC 기재 상의 그레이팅에서 (c) s-pol 전기장 분포의 단면도, (d) p-pol 전기장 분포의 단면도, 및 Ag, Pt 및 W 기재들 상의 550 nm-주기, 300 nm-에치 폭, 및 200 nm-두께를 갖는 그레이팅에서 (e) s-pol 전기장 분포의 공명의 단면도 및 (f) p-pol 전기장 분포의 공명의 단면도를 나타낸 것이다.

도 5a는, 본원의 일 실시예에 있어서, (a) PEC 기재 상의 근-파장 유전체 그레이팅에서 수직적으로 횡단하는 도파관-어레이 모드의 개략도를 나타낸 것이고, 도 5b 내지 도 5h는, 본원의 일 실시예에 있어서, (b) 550 nm 주기의 유전체 그레이팅에서의 s-pol (상단) 및 p-pol (하단) 도파관-어레이 모드들의 분산 곡선, (c) 주기 및 파장의 함수로서 s-pol (상단) 및 p-pol (하단) 반사 필드의 위상, (d) 주기 및 파장의 함수로서 s-pol 및 p-pol 반사 필드 사이의 위상차, (e) 주기 및 파장의 함수로서 편광 타원 모양의 기울기 각도. 파장의 함수로서 550 nm 주기에서의 편광 타원 모양의 (f) 위상차, (g) 기울기 각도, 및 (h) 공명 근처에서 회전 방향 및 기울기 각도로 나타낸 편광 타원 모양을 나타낸 것이다.

도 6은, 본원의 일 실시예에 있어서, 금속 기재 상의 유전체 그레이팅으로부터 (a) s-pol 여기/검출, (b) p-pol 여기/검출을 통한 반사 측정의 개략도, 및 Ag (상단), Pt (중간) 및 W (하단) 상의 유전체 그레이팅의 주기 및 파장의 함수로서 계산되고 측정된 (c) s-pol 반사, (d) p-pol 반사, 및 (e) 파장에 대한 SPP 전파 길이의 의존을 나타낸 것이다.

도 7은, 본원의 일 실시예에 있어서, 파장 및 입사각의 함수로서 Ag (상단), Pt (중간), 및 W (하단) 기재들 상의 PMMA 그레이팅으로부터의 계산된 (a) s-pol 0 차 반사, 및 (b) p-pol 0 차 반사를 나타낸 것이다.

도 8은, 본원의 일 실시예에 있어서, Ag (상단), Pt (중간), 및 W (하단) 기재들에 대한 평면파 소스 및 Gaussian 빔을 이용한 측정과 계산 사이의 (a) s-pol 0 차 반사 및 (b) p-pol 0 차 반사의 비교를 나타낸 것이다.

도 9는, 본원의 일 실시예에 있어서, Ag (상단), Pt (중간) 및 W (하단) 기재들 상의 유전체 그레이팅으로부터 주기 및 파장의 함수로서 (a) 계산된 크로스-편광 반사, 및 (b, 좌측) 측정된 크로스-편광 반사, (b, 우측) 측정된 색도 및 sRGB 커버리지 비율을 나타내는 CIE 색도 다이어그램을 나타낸 것이다.

도 10은, 본원의 일 실시예에 있어서, 공기-그레이팅-PEC 시스템의 모드 전파 개략도를 나타낸 것이다.

도 11은, 본원의 일 실시예에 있어서, Ag, Pt 및 W의 (a) 엘립소메트리에 의해 측정된 굴절률 인덱스, 및 (b) 실수부 유전율 (epsilon 값)과 허수부 유전율 (epsilon 값)을 나타낸 것이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0017] 아래에서는 첨부한 도면을 참조하여 본원이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자가 용이하게 실시할 수 있도록 본원의 실시예를 상세히 설명한다. 그러나 본원은 여러 가지 상이한 형태로 구현될 수 있으며 여기에서 설명하는 실시예에 한정되지 않는다. 그리고 도면에서 본원을 명확하게 설명하기 위해서 설명과 관계없는 부분은 생략하였으며, 명세서 전체를 통하여 유사한 부분에 대해서는 유사한 도면 부호를 붙였다.

[0018] 본원 명세서 전체에서, 어떤 부분이 다른 부분과 “연결”되어 있다고 할 때, 이는 “직접적으로 연결”되어 있는 경우뿐 아니라, 그 중간에 다른 소자를 사이에 두고 “전기적으로 연결”되어 있는 경우도 포함한다.

[0019] 본원 명세서 전체에서, 어떤 부재가 다른 부재 “상에” 위치하고 있다고 할 때, 이는 어떤 부재가 다른 부재에 접해 있는 경우뿐 아니라 두 부재 사이에 또 다른 부재가 존재하는 경우도 포함한다.

[0020] 본원 명세서 전체에서, 어떤 부분이 어떤 구성 요소를 “포함”한다고 할 때, 이는 특별히 반대되는 기재가 없는 한 다른 구성 요소를 제외하는 것이 아니라 다른 구성 요소를 더 포함할 수 있는 것을 의미한다. 본원 명세서 전체에서 사용되는 정도의 용어 “약”, “실질적으로” 등은 언급된 의미에 고유한 제조 및 물질 허용오차가 제시될 때 그 수치에서 또는 그 수치에 근접한 의미로 사용되고, 본원의 이해를 돕기 위해 정확하거나 절대적인 수치가 언급된 개시 내용을 비양심적인 침해자가 부당하게 이용하는 것을 방지하기 위해 사용된다. 본원 명세서 전체에서 사용되는 정도의 용어 “~(하는) 단계” 또는 “~의 단계”는 “~ 를 위한 단계”를 의미하지 않는다.

[0021] 본원 명세서 전체에서, 마쿠시 형식의 표현에 포함된 “이들의 조합(들)”의 용어는 마쿠시 형식의 표현에 기재된 구성 요소들로 이루어진 군에서 선택되는 하나 이상의 혼합 또는 조합을 의미하는 것으로서, 상기 구성 요소들로 이루어진 군에서 선택되는 하나 이상을 포함하는 것을 의미한다.

[0022] 본원 명세서 전체에서, “A 및/또는 B”의 기재는 “A 또는 B, 또는 A 및 B”를 의미한다.

[0024] 이하, 첨부된 도면을 참조하여 본원의 구현예 및 실시예를 상세히 설명한다. 그러나, 본원이 이러한 구현예 및 실시예와 도면에 제한되지 않을 수 있다.

[0026] 본원의 일 측면은, 손실 금속 (lossy metal) 기재 상에 형성된 유전체 그레이팅을 포함하는, 반사형 컬러 픽셀을 제공한다.

[0027] 본원의 일 구현예에 있어서, 상기 손실 금속은 광손실이 높은 금속을 지칭하는 것이다.

[0028] 본원의 일 구현예에 있어서, 상기 손실 금속으로서 모든 금속이 사용 가능하다. 예를 들어, 상기 손실 금속은 Cu, Ni, Co, Pd, Pt 또는 W를 포함할 수 있으나, 이에 제한되는 것은 아니다.

[0029] 본원의 일 구현예에 있어서, 상기 반사형 컬러 픽셀은 상기 손실 금속 기재를 사용하여 Ag와 같은 손실이 적은 금속을 사용한 경우보다 높은 색상 선명도를 나타낸다.

[0030] 본원의 일 구현예에 있어서, 상기 반사형 컬러 픽셀은 상기 손실 금속 기재를 사용하여 Ag와 같은 손실이 적은 금속을 사용한 경우보다 더 넓은 sRGB 색상 영역 커버리지를 나타낸다

[0031] 본원의 일 구현예에 있어서, 상기 손실 금속은 근-파장 유전체 그레이팅을 지원하는 것일 수 있으나, 이에 제한되는 것은 아니다.

[0032] 본원의 일 구현예에 있어서, 상기 근-파장 유전체 그레이팅은 상기 유전체의 파장 및 그것의 주변 매질의 파장 사이의 주기를 갖는 그레이팅을 나타낸다.

[0033] 본원의 일 구현예에 있어서, 상기 유전체 그레이팅은 1 차원 유전체 그레이팅인 것일 수 있으나, 이에 제한되는 것은 아니다.

[0034] 본원의 일 구현예에 있어서, 상기 그레이팅 주기는 상기 픽셀에 의해 구현되는 색상 광의 파장에 상응하는 것일 수 있으나, 이에 제한되는 것은 아니다.

[0035] 본원의 일 구현예에 있어서, 상기 유전체 그레이팅의 주기는 약 300 nm 내지 약 900 nm인 것일 수 있으나, 이에 제한되는 것은 아니다. 예를 들어, 상기 유전체 그레이팅의 주기는 약 300 nm 내지 약 900 nm, 약 400 nm 내지 약 900 nm, 약 500 nm 내지 약 900 nm, 약 600 nm 내지 약 900 nm, 약 700 nm 내지 약 900 nm, 약 800 nm 내지 약 900 nm, 약 300 nm 내지 약 800 nm, 약 400 nm 내지 약 800 nm, 약 500 nm 내지 약 800 nm, 약 600 nm 내지 약 800 nm, 약 700 nm 내지 약 800 nm, 약 300 nm 내지 약 700 nm, 약 400 nm 내지 약 700 nm, 약 500 nm 내지 약 700 nm, 약 600 nm 내지 약 700 nm, 약 300 nm 내지 약 600 nm, 약 400 nm 내지 약 600 nm, 약 500 nm 내지 약 600 nm, 약 300 nm 내지 약 500 nm, 또는 약 400 nm 내지 약 500 nm일 수 있으나, 이에 제한되는 것은 아니다.

[0036] 본원의 일 구현예에 있어서, 상기 반사형 컬러 픽셀은 상기 유전체 그레이팅의 주기를 변화시킴으로써 전체 가시광 범위에 걸쳐 색상을 수동적으로 조절할 수 있고, 상기 주기의 증가는 상기 색상의 적색 전이를 일으킨다.

[0037] 본원의 일 구현예에 있어서, 상기 유전체 그레이팅의 에치 폭은 약 130 nm 내지 약 490 nm인 것일 수 있으나, 이에 제한되는 것은 아니다. 예를 들어, 상기 유전체 그레이팅의 에치 폭은 약 130 nm 내지 약 490 nm, 약 200 nm 내지 약 490 nm, 약 300 nm 내지 약 490 nm, 약 400 nm 내지 약 490 nm, 약 130 nm 내지 약 400 nm, 약 200 nm 내지 약 400 nm, 약 300 nm 내지 약 400 nm, 약 130 nm 내지 약 300 nm, 또는 약 200 nm 내지 약 300 nm인 것일 수 있으나, 이에 제한되는 것은 아니다. 다만, 상기 유전체 그레이팅의 주기와 에치 폭의 범위는, [(상기 유전체 그레이팅의 주기-에치 폭)/주기] 식으로 정의되는 듀티 싸이클 (duty cycle)이 0 내지 1인 상관 관계를 만족하여야 한다. 예를 들어, 상기 듀티 싸이클은 약 0 내지 약 1, 약 0.2 내지 약 1, 약 0.4 내지 약 1, 약 0.6 내지 약 1, 약 0.8 내지 약 1, 약 0 내지 약 0.8, 약 0.2 내지 약 0.8, 약 0.4 내지 약 0.8, 약 0.6 내지 약 0.8, 약 0 내지 약 0.6, 약 0.2 내지 약 0.6, 약 0.4 내지 약 0.6, 약 0 내지 약 0.4, 약 0.2 내지 약 0.4, 또는 약 0 내지 약 0.2일 수 있으나, 이에 제한되는 것은 아니다.

[0038] 본원의 일 구현예에 있어서, 상기 반사형 컬러 픽셀은 상기 유전체 그레이팅의 에치 폭을 통해 상기 색상을 미세-조정할 수 있다.

[0039] 본원의 일 구현예에 있어서, 상기 픽셀에 대하여 45° 방향으로 입사되는 입력 편광자에 대하여 상기 손실 금속에 의해 스펙트럼 순도를 향상시킬 수 있는 색상 광을 반사시키는 것일 수 있으나, 이에 제한되는 것은 아니다.

[0040] 본원의 일 구현예에 있어서, 상기 픽셀에서 상기 그레이팅에 대하여 정의된 상기 입력 편광자를 통과한 입사 편광의 두 개의 직교 성분인, s-편광 필드 및 p-편광 필드를 수용하여, 출력 편광자가 크로스-편광인 경우 $\pm\pi/2$ 각도 회전된 반사 광만 투과되는 것일 수 있으나, 이에 제한되는 것은 아니다.

[0041] 본원의 일 구현예에 있어서, 상기 반사 광과 입사 광의 편광은 크로스-편광 필터의 사용을 통해 서로 직교되고, 상기 그레이팅 벡터에 대해 ±45°가 되도록 배열되며, 상기 반사 광은 크로스-편광자에 의해 필터링된다.

[0042] 본원의 일 구현예에 있어서, 상기 반사 광의 경우, 상기 두 개의 성분들 (p-편광 필드 및 s-편광 필드) 중 하나만 총 편광 벡터를 $\pi/2$만큼 회전시키는 추가적 위상 전이를 겪는다. 즉, 상기 p-편광 필드만 180° 회전되며, 상기 s-편광 필드는 추가적으로 180° 회전된다.

[0043] 본원의 일 구현예에 있어서, 상기 반사형 컬러 픽셀은 상기 크로스-편광 반사 스펙트럼에서 뚜렷한 스펙트럼 피크의 개수를 두 개에서 한 개로 감소시키는 효과를 가지며, 이것은 생성된 색상의 단색성을 증가시킨다.

[0044] 본원의 일 구현예에 있어서, 상기 반사형 컬러 픽셀은 상기 크로스-편광 입/출력 광 스킴을 통해 픽셀 및 백그

라운드 사이의 높은 콘트라스트를 달성할 수 있으며, 상기 백그라운드 신호를 거의 제로 (0)에 가깝게 감소시킴으로써, 높은 콘트라스트 비율을 수득할 수 있다.

[0045] 본원의 일 구현예에 있어서, 상기 그레이팅 구조체는 3 층 시스템으로 구성되며, 상기 시스템은 공기 층, 그레이팅 층, 및 반사 층으로 형성되는 것을 포함하는 것일 수 있으나, 이에 제한되는 것은 아니다.

[0046] 본원의 일 구현예에 있어서, 상기 p-편광 필드는 상기 금속 층-그레이팅 층 인터페이스 사이에 위치되며, 상기 s-편광 필드는 상기 공기 층-그레이팅 층 인터페이스 사이에 위치되는 것일 수 있으나, 이에 제한되는 것은 아니다.

[0047] 본원의 일 구현예에 있어서, 상기 s-편광 필드는 상기 금속으로부터 공간적으로 분리되고, 상기 p-편광 필드는 상기 금속으로부터의 손실에 의해 직접적으로 영향을 받으며, 상기 s-편광 필드는 상기 p-편광 필드보다 상기 금속으로부터의 손실에 덜 민감하다.

[0048] 본원의 일 구현예에 있어서, 상기 s-편광 필드의 위치는 전체 가시광 범위에 걸쳐 상기 듀티 싸이클 또는 에치 폭에 따라 같을 수 있기 때문에, 수동 컬러 (passive color) 조절을 직관적으로 알 수 있다.

[0049] 본원의 일 구현예에 있어서, 상기 픽셀은 상기 손실 금속 기재를 포함함으로써 다기능 필터 기능, 촉매 기능, CMOS 호환가능성 또는 열 안정성 향상을 달성할 수 있으나, 이에 제한되는 것은 아니다.

[0050] 본원의 일 구현예에 있어서, 상기 반사형 컬러 픽셀은 상기 손실 금속 기재를 사용함으로써 반사 광의 스펙트럼의 순도를 향상시킬 수 있는 색상의 광을 반사할 수 있다.

[0052] 이하, 본원의 실시예를 통하여 본 발명을 더욱 상세하게 설명하고자 하나, 하기의 실시예는 본원의 이해를 돕기 위하여 예시하는 것 일뿐, 본원의 내용이 하기 실시예에 한정되는 것은 아니다.

[0054] **[실시예]**

[0055] **<샘플 제조>**

[0056] 아세톤 및 IPA로 세정함으로써 세척된 Si 웨이퍼를 기재로서 사용하였다. 금속들에서 손실의 영향을 평가하기 위해, 상기 패턴화된 그레이팅을 세 개의 금속 기재들 상에서 제조하였다: Ag, Pt 및 W.

[0057] Ag, Pt 또는 W의 손실 금속 (lossy metal)은 광학적으로 불투명한 두께로 상기 Si 웨이퍼 상에 증착하여 반사층을 생성하였다. 상기 Ag 필름의 경우, 서브-1 nm의 두께의 Ge 웨팅 층 (wetting layer) 및 170 nm-두께의 Ag 필름을 각각 0.04 nm/sec 및 0.3 nm/sec의 증착 속도로 전자 빔 증발에 의해 상기 Si 웨이퍼 상에 순차적으로 증착하였다. 상기 Pt 기재의 경우, 서브-1 nm 두께의 Ti 필름 웨팅 층 (wetting layer) 및 200 nm-두께의 Pt 필름을 DC 스퍼터링을 사용하여 상기 Si 웨이퍼 상에 순차적으로 증착하였다. 베이스 (base) 압력은 < $5x10^{-6}$ torr이었고 각각 0.125 nm/s 및 0.3 nm/sec의 증착 속도를 제공하는 40 W 타겟 파워 하에서 Ar 가스를 4 mTorr로 주입하였다. 상기 W 기재의 경우, 동일한 증착 조건 하에서 DC 스퍼터링을 이용하여 상기 Si 웨이퍼 상에 200 nm-두께의 W 층을 직접적으로 증착하였으며, 0.15 nm/초의 증착 속도를 얻었다. 상기 Ag, Pt 및 W 기재의 경우, 3,000 rpm에서 상기 금속 층의 상단에 ~200 nm-두께의 PMMA 레지스트 층을 스핀-코팅하였다. 라인 그레이팅 패턴들을 전자 빔 리소그래피 (e-beam lithography) 과정에 의해 패터닝하였으며, 상기 PMMA 층에 표시하고, MIBK : IPA = 1 : 1 용액으로 현상하였다. 상기 현상된 ~ 200 nm-두께의 PMMA 레지스트 층을 유전체 그레이팅으로서 사용하였다 (도 1 참조).

[0058] 도 1은 금속 상의 유전체 그레이팅의 제조 과정을 나타낸다. 도 1a는 광학적으로 불투명한 두께의 금속 필름 (Ag, Pt 또는 W)을 전자 빔 증발 또는 DC 스퍼터링을 이용하여 Si 기재 상에 증착하는 것을 나타내며, 도 1b는 PMMA 층이 상기 상기 금속 층 상에 스핀 코팅되는 것, 도 1c는 라인 그레이팅 패턴들이 전자 빔 리소그래피에 의해 상기 PMMA 층에 표시되는 것을 나타내며, 및 도 1d는 샘플이 현상되는 것을 나타낸다.

[0059] 여기에서, W는 그것의 큰 손실로 인해 가장 좋지 않은 광학적 현상들 중 하나를 나타내는 것으로 알려져있다.

[0061] **<측정 셋업>**

[0062] 50/50에 의한 빔 스플리터를 통해 0.15 NA 대물 렌즈로 반사되는 할로겐 램프 (Olympus Corporation)로부터 공급된 백색광을 픽셀에 조사함으로써 반사 측정들을 수행하였다. 각각 분광계 (Acton SP2300, Princeton Instruments) 또는 이미징 CCD에 커플링된 x-y 평행 이동식 핀홀 화이버 (x-y translatable pinhole fiber)에 의해 상기 반사된 이미지를 판독하였다. 직교로 배향된 편광자들을 입력 빔 경로 및 출력 빔 경로 내에 삽입하였고 백그라운드 (즉, 상기 그레이팅의 외부 영역) 신호를 무효화하였다. 상기 그레이팅을 상기 입력 편광자의 편광 방향에 대해 45° 회전시켰다.

[0063] 도 2a 및 도 2b는 크로스-편광 입/출력 광 배열 하에서 각각 백그라운드 및 픽셀의 개략도를 설명한다. 상기 픽셀은 손실 금속 기재 상의 1D 유전체 그레이팅으로 형성된다. 더 자세하게, 도 2a는 백그라운드를 형성하는 패턴화되지 않은 PMMA 필름을 나타내며, 도 2b는 픽셀을 나타내는 에치된 PMMA 그레이팅을 지원하는 금속의 개략도를 나타낸다. 수직 입사 광은 상기 그레이팅 벡터에 대해 45°로 편광된다. 반사 광은 크로스-편광자에 의해 필터링되며, 이것은 상기 도 2a의 백그라운드로부터 빛을 차단하지만, 편광 벡터가 90° 회전되기 때문에 도 2b의 상기 픽셀로부터의 빛을 투과시킨다.

[0064] 도 3은 크로스-편광 입력-출력 셋업의 개략도를 나타낸다.

[0066] **<계산>**

[0067] 상용적 FDTD 소프트웨어 패키지 (Lumerical solutions)로 FDTD 계산을 수행하였다. 상기 크로스-편광 반사를 계산하기 위해, 평면파 입사 필드에 대해 45° 배향된 상기 그레이팅의 3D 단위 셀을 조사하였고, 여기에서 입사 필드에 직교하는 반사 필드 성분을 기록하였다. x-y 차원 (dimension)에 대해 Bloch 경계 조건 (Bloch boundary condition)을 사용한 반면 상기 z 차원에 대해 PML 경계 조건들을 사용하였다. 상기 그레이팅 구조체 전반에 걸쳐 다양한 메쉬 크기를 사용하였으며, 2 x 2 x 2 nm^3의 가장 작은 메쉬 크기가 금속-유전체 그레이팅 인터페이스에서 구현되었다.

[0068] 입사 광과 반사 광의 편광은 크로스-편광 필터의 사용을 통해 서로 직교되고, 상기 그레이팅 벡터에 대해 ± 45°가 되도록 배열되었다. 상기 그레이팅에 대한 입사 광의 상기 45° 편광 배향은 상기 그레이팅이 동일한 기여로 빛의 두 개의 직교 성분 (s-pol 및 p-pol)들을 수용하도록 한다. 금속 기재에서 패턴화되지 않은 PMMA 필름으로 형성된, 베어 (bare) 백그라운드로부터 반사되는 빛의 경우 (도 2a 참조), 상기 금속 표면의 더 높은 임피던스로 인해, s-pol 광 및 p-pol 광 모두 π 위상 전이를 경험한다. 두 성분들에 의한 동시적 π 위상 전이는 상기 입사 광 편광 각도를 유지한다. 상기 출력 편광자는 상기 입력 광 편광과 직교하기 때문에, 상기 반사 광은 투과할 수 없어, 이것은 어두운 백그라운드를 나타낸다. 그러나, 상기 그레이팅으로부터 반사되는 빛의 경우, 상기 두 개의 성분들 중 하나만 총 편광 벡터를 π/2만큼 회전시키는 추가적 위상 전이를 겪는다. 이러한 회전은 상기 반사 광이 상기 출력 편광자를 통해 투과하도록, 이것은 검출된 신호를 수득하게 한다.

[0069] 도 2c는 상기 배열을 통해 달성된 선명한 색상들의 다양한 주기 및 에치 폭을 갖는 Pt 기재 상의 픽셀들의 컬러 팔레트를 도시한다. 각각의 픽셀은 Pt 기재 상에서 10 x 10 μm^2 PMMA 그레이팅으로 형성되며, 이것은 상기 그레이팅에 대해 45° 회전된 편광에 의해 여기되고 크로스-편광자를 통해 검출된다. 도 2c의 삽입도는 상기 팔레트에서 박스 (box)로 나타낸 동일한 색상의 픽셀들로부터 디자인된 피시 (fish) 그림들을 나타낸다.

[0071] **<특성 분석>**

[0072] 커플링된 도파관-어레이 모드 형식을 사용하여, 본 발명자들은 스펙트럼적으로 구분되는 샤프한 s-pol 및 p-pol 그레이팅 슈퍼모드 공명이 금속 기재 상의 근-파장 유전체 그레이팅 내에서 나타나며, 여기에서 상기 s-pol 및 p-pol 반사 필드 전이의 위상차는 각 공명에 대해 2π이다. 이러한 스킴은 총 필드 편광을 해당 파장에 걸쳐 90° 회전시킨다. 그러므로, 크로스-편광 입/출력 광 배열 하에서, 상기 픽셀로부터 반사 광은 출력 편광자를 통해 투과되며, 이것은 샤프한 반사 피크를 수득하며 상기 백그라운드로부터 반사는 제거되어, 높은 픽셀 콘트라스트를 제공한다. 본 발명자들은 상기 공기-그레이팅 인터페이스 근처에 발생하기 때문에 상기 s-pol 응답이 덜 민감한 반면 상기 p-pol 그레이팅 슈퍼모드 공명이 상기 금속 인터페이스와의 그것의 공간적 중첩으로 인해 상기 금속으로부터의 손실들에 매우 민감하다는 것을 입증하였다. 이러한 고유 손실을 이용함으로써, 본 발명의 크로스-편광 입/출력 스킴에서 상기 s-pol 응답을 샤프하게 유지하는 반면 상기 p-pol 응답을 최소화 할 수 있다. 이러한 전략은 손실 금속들이 유사한 픽셀 색상 콘트라스트 비율을 유지하면서, Ag와 같은 굴절률이 높은

금속들의 것을 초과하는 선명한 색상들을 특징으로 하는 큰 sRGB 영역 커버리지를 달성할 수 있도록 한다. 이러한 결과들은 통합된 광전자 응용 분야에 대한 CMOS 호환가능한 금속들 및 화학적 활성 또는 초강력 색상 생성 스킴들을 위한 특징적 화학적 특성들 및 물리적 특성을 나타내는 것들을 포함하는 구조적 색상 디자인에서 적용할 손실 금속 유형의 범위를 확장할 수 있다.

[0074] **유전체 그레이팅의 주기 및 에치 폭**

[0075] 유전체 그레이팅의 주기 및 듀티 싸이클 (duty cycle)은 각각 300 nm 내지 700 nm 및 0 내지 1 범위에서 모든 픽셀 범위에 대해 상이하다. 상기 유전체 그레이팅의 주기를 변화시킴으로써 전체 가시광 범위에 걸쳐 색상이 수동적으로 조절되고, 상기 에치 폭을 통해 미세-조정될 수 있음을 알 수 있다. 상기 주기의 증가는 상기 색상의 적색 전이를 일으킨다. 기울어진 SEM 이미지 (도 2d 참조)들은 보라색, 녹색, 및 황색 픽셀들을 나타내는 에치된 PMMA 그레이팅 구조체들을 나타내며, 여기에서 각각 320 (250) nm, 420 (250) nm, 및 520 (280) nm의 주기 (및 에치 폭)가 사용되었다.

[0076] 구체적으로, 도 2d는 각도로 관찰한 도 2c에서 상기 세 개 픽셀들의 SEM 이미지들을 나타낸 것이며, 도 2d의 삽입도는 상단에서 관찰한 상기 세 개 픽셀들의 SEM 이미지들을 나타낸다.

[0077] 삽입도들은 각각의 그레이팅의 상단 사시도 (top view image)를 나타내고, 이것은 상기 에치된 (etched) 구조체들의 규칙성 및 균일성을 설명한다. Pt의 고유한 광학적 손실에도 불구하고, 상기 백그라운드 신호가 상기 크로스-편광된 입-출력 스킴에 의해 상쇄되기 때문에 상기 픽셀 색상들이 선명하며 상기 백그라운드에 대한 그것들의 콘트라스트가 높다. 본 발명자들은 선명한 색상들이 마이크로미터 스케일에서 디자인된 패턴들로 통합될 수 있음을 추가로 제시한다.

[0078] 도 2c는 좌측에서 우측으로 각각, 위에서 설명한 보라색, 녹색, 및 황색 픽셀들로 만들어진 세로 (lateral) 및 가로 (transverse) 크기가 100 X 70 μm^2, 130 X 90 μm^2, 및 140 X 90 μm^2인 서로 상이한 색상들의 세 개의 피시 (fish)를 제시한다.

[0079] 도 4a는 주기, 에치 폭, 두께 및 굴절률이 각각 550 nm, 150 nm, 200 nm 및 1.5인, PEC 기재 상의 유전체 그레이팅으로부터 계산된 크로스-편광 반사 스펙트럼으로서, 이것은 상기 그레이팅에 대해 45° 회전된 입력 필드에 의해 여기되었다. 도 4a에서 I 및 III은 상기 s-pol 및 p-pol 성분 각각으로부터 공명 파장을 나타내고, II는 비-공명 파장을 나타낸다 상기 반사 필드의 상기 크로스-편광 성분을 이용하여 반사 강도를 계산하였다. 상기 스펙트럼에서 두 개의 샤프한 피크들을 볼 수 있으며, 이것의 스펙트럼 위치는 상기 편광 타원의 기울기 각도에서 90° 전이의 스펙트럼 위치와 일치한다는 것을 알 수 있다 (도 5g 참조). 이러한 결과들은 샤프한 크로스-편광 반사 피크들이 상기 그레이팅 내에서 상기 s-pol 및 p-pol 그레이팅 슈퍼모드 공명으로부터 생성됨을 나타낸다.

[0080] 도 4b는 금속 기재 상의 그레이팅, 및 s-pol와 p-pol 필드 성분들의 배향의 개략도를 나타내며, 윤곽선이 있는 박스는 시각화된 필드 분포의 단면적을 나타낸다.

[0081] 도 4c 및 도 4d는 도 4a에서 나타낸 상기 세 개의 파장에서 PEC 기재 상의 그레이팅에서 (c) s-pol 전기장 분포의 단면도 및 (d) p-pol 전기장 분포의 단면도를 나타낸다.

[0082] 도 4c는 더 짧은 파장 피크 (I)가 공명 모드에 상응하며, 이것은 공기와 유전체 그레이팅 요소들 사이에 공유되는 매우 집중된 필드에 의해 특성화되는 것을 나타낸다. s-pol 광 하에서, 상기 p-pol 공명 (III)의 것을 포함하는 다른 파장들 (II)에서 그러한 공명은 관찰되지 않는다. 도 4d에 나타낸 것과 같이, 상기 p-pol 공명은 더 긴 파장 (III)에서 발생하는 것으로 밝혀졌으며, 이것은 상기 s-pol 공명의 것과 강하게 대비되는 모드 프로파일을 특징으로 한다. 마찬가지로, 이러한 공명 필드는 다른 파장들 (I, II)에는 나타내지 않는다. 도 4d에서, 상기 p-pol 모드는 상기 금속-그레이팅 인터페이스에 매우 집중되어 있다는 것을 알 수 있으며, 이것은 SPP의 거동을 모방하는 특징이 있다. 상기 반사 금속이 PEC이기 때문에, 본 발명자들은 PEC 상의 다른 높은 콘트라스트 그레이팅에서 또한 보고된 바와 같이, 상기 모드를 스푸프 (spoof) SPP로서 식별하였다. 실제 금속들의 경우, 그것의 여기는 파워 (power)를 소산시키며, 이것은 SPP로서 식별될 수 있다.

[0083] 도 5a는 PEC 기재 상의 근-파장 유전체 그레이팅에서 수직적으로 이송하는 도파관-어레이 모드들의 개략도를 나타낸다. 상기 그레이팅 구조체는 3 층 시스템으로 취급되며, 이것은 공기 층, 그레이팅 층, 및 반사 층으로 형성된다. 본 발명자들은 반사에서 도파관-어레이 모드의 역할을 일반화하고 그것의 거동에서 주기 의존성 스펙트

럼 경향을 설정하기 위해 반사성 기재로서 완전 전기 도체 (perfect electrical conductor, PEC)를 사용하였다. 수직으로 입사하는 빛은 실제 전파 상수들에 의해 특성화되는 상기 그레이팅에 존재하는 두 개의 도파관-어레이 모드들과 커플링된다.

[0084] 이러한 모드는 하향 전파되어, 상기 유전체 두께를 통해 위상차를 누적시킨다. 상기 PEC 기재에 도달하면, 모든 모드들이 자신에게 완벽하게 반사되고 ($\Gamma = \rho_{23} = -1$), 상향 전파되어, 위상차 누적을 반복한다 (도 10 참조).

한 개의 라운드 트립을 완료한 후, 상기 모드는 0 차 회절 모드에 커플링함으로써 공기로 전달될 수 있거나, 또는 그것들이 임피던스 불일치로 인한 공기-그레이팅 인터페이스에서 상기 그레이팅 내로 다시 반사되어, 그것들이 서로 커플링된다. Yang et al.에 의해 설명된 것과 같이, 자유 공간에서 도파관-어레이 모드와 회절 모드 사이의 오버랩, 및 상기 유전체 내의 도파관-어레이 모드의 전파는 각각 두 개의 N X M 매트릭스들, ρ 및 ϕ로 각각 표현될 수 있으며, 여기에서 N 및 M은 회절의 개수 및, 상기 계산에서 고려된 도파관-어레이 모드의 개수이다. 슈퍼모드라고 불리는, 그것들의 제품의 고유모드 (eigenmode)는, 상기 그레이팅의 모든 필수 광학적 특성들을 배제시킨다. 상기 반사 스펙트럼의 명확한 특징들은 상기 공기-그레이팅 및 금속-그레이팅 인터페이스에 의해 정의된 효과적 공동 내에서 상기 슈퍼모드의 공명으로서 이해될 수 있다.

[0085] s-pol 광 및 p-pol 광의 상이한 경계 조건은 상이한 모드 특성들을 초래한다. 도 5b 내지 도 5g는 150 nm의 고정된 에치 폭 및 1.5의 그레이팅 인덱스 (index)의 PEC 기재 상의 유전체 그레이팅에 대한 그레이팅 특성들의, 커플링된 도파관-어레이 모드 형식을 이용한 계산을 나타낸다.

[0086] 도 5b는 주기, 에치 폭 및 굴절률이 각각 550 nm, 150 nm, 200 nm 및 1.5인 그레이팅에 대한 s-pol (상단), 두께 및 p-pol (하단) 도파관-어레이 모드들의 분산 곡선의 계산된 실제 전파 상수들 (즉, 파수)을 나타낸다.

[0087] 수직 입사에서, 상기 입사 필드는 상기 에치 및 그레이팅 인터페이스에 대해 대칭이다. 따라서, 짝수 모드 프로파일을 갖는 도파관-어레이 모드만이 여기될 수 있다. 도 5b에 나타낸 것과 같이, s-pol 광 및 p-pol 광 모두에 대해 두 개의 이러한 모드 ($m = 0$ 및 $m = 2$)들이 존재한다. 두 개의 편광에 대한 상기 그레이팅의 반사 특성들을 결정하는 것은 상기 두 개의 도파관-어레이 모드 사이의 상호작용이다. 상기 s-pol 및 p-pol 도파관-어레이 모드들 사이의 모드 특성들의 미묘한 차이가 관찰될 수 있다. 상기 0 차 도파관-어레이 모드는 상기 두 편광에 대해 유사하게 거동하지만, 2 차 모드는 상기 s-pol 및 상기 p-pol 모드 각각에 대해 ~ 700 nm 근처의 컷오프 유무에 의해 특성화되는, 독특한 거동을 나타낸다.

[0088] 상기 2 차 s-pol 및 p-pol 도파관-어레이 모드 사이의 상이한 모드 거동의 결과는 상기 0 차 s-pol 반사 필드 및 p-pol 반사 필드 사이의 위상차로서 더욱 명백하게 한다. 위에서 설명한 상기 도파관-어레이 형식을 사용하여, 본 발명자들은 주기 및 파장의 함수로서, 상기 0 차 s-pol 및 p-pol 반사 필드의 위상을 계산하였다 (도 5c 참조). 상기 그레이팅의 두께는 200 nm이다.

[0089] 도 5c는 주기 및 파장의 함수로서 s-pol (상단) 및 p-pol (하단) 반사 필드의 위상을 나타낸다.

[0090] 상기 s-pol 반사 필드의 주기와 일치하는 파장 및 상기 p-pol 필드의 경우 더 긴 파장에서 급격한 위상 전이가 발생하는 것을 발견하였다. 이러한 위상 전이는 상기 그레이팅 슈퍼모드의 공명에 기인하며, 여기에서 필드 강도의 강한 축적이 갑작스런 위상 전이를 수반한다.

[0091] 도 5d는 상기 s-pol 반사 필드와 p-pol 반사 필드 사이의 위상차를 나타낸다. 상기 위상차는 상기 s-pol 반사 필드 및 p-pol 반사 필드의 개별 위상 맵에서 볼 수 있는 상기 위상 전이와 일치하는 경계에 의해 정의된 밴드 내를 제외한 모든 주기 및 파장에 대해 0에 가까움을 알 수 있다. 상기 밴드 내에서, 상기 위상차는 약 2π에 도달한다. 이것은 상기 밴드의 내부 및 외부에서, 두 개의 반사 성분의 중첩 (superposition) (즉, 총 반사 필드)이 45° 를 따라 선형적으로 편광됨을 나타낸다. 그러나, 상기 밴드의 경계에서, 상기 위상차는 급격히 0 근처에서 2π로 급격히 변화하며, 이것은 상기 총 필드가 상기 과정에서 타원 또는 원형으로 편광되도록 한다.

[0092] 도 5e는 주기 및 파장의 함수로서 상기 위상차로부터 초래되는 편광 타원의 계산된 기울기 각도를 나타낸다. 도 5d에 나타낸 상기 밴드의 경계에서 상기 기울기 각도가 급격히 변화하는 것을 알 수 있다.

[0093] 이러한 관계를 더욱 명확하게 관찰하기 위해, 본 발명자들은 도 5f와 도 5g에서 각각 550 nm 주기-그레이팅의 특정한 경우에 대한 상기 위상차와 기울기 각도를 나타낸다. 도 5f에 나타낸 것과 같이, 560 nm와 700 nm 근처에서, 위상차에서 각 전이에 대해, 상기 기울기 각도는 약 45° 내지 -45° 사이에서 급격하게 회전한다.

[0094] 도 5f 내지 도 5g는 파장의 함수로서 550 nm 주기에서의 편광 타원의 (f) 위상차 및 (g) 기울기 각도를 나타낸다. 상기 도 5f 내지 도 5g의 삽입도는 스펙트럼에서 마커로 나타낸 파장에서 회전 방향 및 기울기 각도로 표시

된 편광 타원을 나타낸다.

[0095] 본 발명의 측정 셋업으로부터 상기 크로스-편광 반사를 모델링하는 FDTD 시뮬레이션은 상기 s-pol 및 p-pol 위상 전이에서 스펙트럼적으로 좁은 피크들의 검출을 확인한다.

[0096] 상기 그레이팅 슈퍼모드 공명을 시각화하기 위해, 본 발명자들은 각각 도 4c와 도 4d에서 상기 s-pol 및 p-pol 모드 프로파일 (도 4b의 개략도 참조)을 개별적으로 시뮬레이션하여 나타낸다. 도 5c에 나타낸 것과 같이, 상기 s-pol 공명은 상기 p-pol 공명보다 더 짧은 파장에서 발생한다.

[0097] 도 5g의 삽입도는 ~ 560 nm 공명 근처 및 상기 공명 내에서 그것들의 회전 방향에 의해 표시된 네 개의 대표적인 타원 편광 상태를 나타낸다. 파장이 증가하기 위해, 상기 편광 타원은 45° 기울기 각도에서 시작하여, 잠시 52° 에 도달하고 (도 5g, ★), 공명에서 -45° 로 상승한다 (도 5g, ▲). 후자의 경우, 상기 필드 벡터는 시계 방향으로 회전하고 편광 축 비율 [준-장축 (semi-major axis) 및 준-단축 (semi-minor axis) 사이의 비율]은 크며, 이것은 거의 선형-편광 상태를 나타낸다. 상기 기울기 각도가 동일하게 유지됨에도 불구하고, 상기 편광 타원은 그것의 회전 방향을 시계 반대 방향으로 전환시키고 상기 공명의 적색 말단에서 감소된 축 비율을 나타낸다 (도 5g, ◆). 상기 공명보다 약간 긴 파장에서, 상기 편광 타원은 45° 기울기 각도로 돌아오지만 (도 5g, ●) 동일한 반-시계 방향을 유지한다. 상기 공명에 대한 상기 기울기 각도의 이러한 90° 전이는 빛을 반사시켜 상기 크로스-편광자를 통해 투과시키며, 이것은 상기 그레이팅으로부터 신호를 전달할 수 있다. 또한, 상기 타원이 거의 선형-편광 상태에 도달할 때 출력 편광기를 통해 전송된 강도는 피크가 될 것이고 그것이 원형-편광 상태와 유사할 때 낮은 상태를 유지할 것이라는 점을 상기 공명 내의 편광 타원 상태들의 시퀀스부터 추론할 수 있다. 더 중요한 것은, 상기 위상차 전이의 급격한 변화에 의해 정의되는, 상기 전송된 신호의 밴드 폭은 스펙트럼적으로 좁게 유지되며, 이것은 높은 색상 선명도를 달성하기 위한 전제 조건 중 하나를 만족한다.

[0098] 도 5h는 상기 s-pol 및 p-pol 공명에서 편광 타원 모양의 확장된 수에 의해 나타낸 편광 타원 모양의 기울기 각도를 나타낸다. 이것은, 두 개의 공명 근처에서 회전 방향 및 기울기 각도에서 나타낸 편광 타원 모양을 나타낸다.

[0100] **유전체 그레이팅의 선명도**

[0101] 상기 금속 기재로서 Pt를 사용하여 달성된 상기 높은 색상의 선명도를 이해하기 위해, 본 발명자들은 커플링된 도파관-어레이 형식의 주요 개념을 먼저 설명한다. 그레이팅 물리학은 회절 영역 (주기> 파장) 및 깊은 서브파장 영역 (주기 << 파장)에서 잘 이해되지만, 근 파장 영역으로 알려진, 상기 둘 사이의 영역 중간에서의 풍부한 현상이 도파관-어레이 모드 또는 수직 전파하는 Bloch 모드의 관점에서 최근 이해되고 있으며, 이것은 동일한 수직으로 횡단하는 모드 타입의 현상을 설명한다. 도파관 어레이는 그레이팅 요소들의 어레이를 의미하며, 이것은 슬랩 도파관 (slab waveguide)과 유사하게 수직적 전파 모드들을 지원한다. 실제로, 슬랩 도파관 및 도파관-어레이에 대한 분산 특성들은 컷오프 주파수로부터 유사하게 멀다. 수직 입사 하에서, 상기 근 파장 현상은 두 개의 짝수 도파관-어레이 모드의 간섭 및 커플링에 의해 결정될 수 있다. 본 발명자들은 상기와 유사한 현상이 가이드된 모드 공명 (GMR; guided mode resonances)으로 또한 해석될 수 있으며, 이것은 무한하고 분할된 그레이팅에서 그레이팅 벡터를 따라 수평으로 횡단하는 가이드된 모드들의 여기 (excitation)를 설명하고, 이것은 유출광 (leaked light) 및 입사광 사이의 간섭을 일으킨다. W. Yang et al.은 한 개의 라운드 트립을 통한 독립형 (free-standing) 투과 유전체 그레이팅에서 도파관-어레이 모드의 전파를 추적하는 단순한 분석 형식을 개발하였는데, 이것은 반사 및 투과를 정확하게 계산하도록 한다. 본원에서, 본 발명자들은 상기 연구를 수행하여, 반사성 기재 상의 근-파장 그레이팅으로부터의 복굴절을 이해하기 위해 본 발명을 도출하였다.

[0102] 높은 색상 선명도를 정의하는 두 개의 중요한 기준은, 채도 (saturation)를 정의하는 스펙트럼 피크의 선명도 (sharpness)와, 스펙트럼 순도를 결정하는 상기 스펙트럼에서 다른 피크들의 부재이다. 첫 번째 조건을 달성하기 위해, 본 발명자들은 빛과 주변 매질과 적당한 인덱스 콘트라스트 (index contrast)를 나타내는 근-파장 유전체 그레이팅의 상호작용을 이용하였다. 근-파장 그레이팅은 상기 유전체의 파장 및 그것의 주변 매질의 파장 사이의 주기를 갖는 그레이팅을 나타낸다. 낮은 인덱스 매질에서 높은 인덱스 그레이팅으로서 정의된, 고-콘트라스트 그레이팅을 포함하는 상기 유전체 그레이팅에서 반사 및 투과의 매우-선명한 공명이 보고되었다. 상기 효과를 설명하기 위해, 커플링된 도파관-어레이 모드의 단순하지만 강력한 분석 처리는 P. Lalanne et al. 및 W. Yang et al.에 의해 별도로 개발되었다. 투과형 유전체 그레이팅을 위해 본래 도출된, 상기 도파관-어레이 모드 형식은 상기 그레이팅의 입구 인터페이스 및 출구 인터페이스에서 서로 커플링되는 두 개의 수직 전파 그

레이팅 모드의 여기를 설명하며, 이것은 풍부한 반사 현상 및 전이 현상을 유도한다. 상기 형식 (formalism)은 근-파장 유전체 그레이팅에서 관찰되는 모든 주요 특징들을 설명하며, 이것은 이후 본원에서 볼 수 있듯이, 상기 유전체 그레이팅이 금속 상에 배치될 때 SPP 여기를 포함한다. 이것은 또한 수직-공동 표면-방출 레이저 (vertical-cavity surface-emitting lasers, VCSELs), 평면 렌즈 및 반사기, 및 중공-코어 도파관들에서 높은 콘트라스트 그레이팅을 모델링하는 데 사용되었다. 더 간단한 모드 설명을 통해, 듀얼 도파관-어레이 모드들이 회절 효율을 변조하고, 간섭-기반 3D 나노 패터닝을 위한 Talbot 패턴들을 조절하는 데에도 이용되었다. 상기 유전체 기재를 반사형 기재로 대체함으로써 상기 본래 형식을 수정하여, 본 발명자들은 상기 그레이팅-공기 및 금속-그레이팅 인터페이스 사이에서 반사하는 커플링된 도파관-어레이 모드로부터 발생하는 공명으로서 본 발명의 시스템에서 발견되는 두 개의 샤프한 s-pol 응답 및 p-pol 응답을 식별한다.

[0103] 높은 색상 선명도를 달성하기 위한 두 번째 기준은 높은 스펙트럼 순도를 요구하는 것이다. 상기 조건을 만족시키기 위해, 본 발명자들은 상기 금속의 광학적 손실을 회피하기보다 상기 금속에서 광학적 손실을 이용한다. 본 발명의 배열 하에서, 색상은 스펙트럼적으로 s-pol 응답 및 p-pol 응답으로 형성되며, 이것의 이중 (dual) 존재는 단색성을 감소시킨다. 상기 p-pol 응답은 상기 금속 인터페이스에서 국부화된 근접 필드 (near field)를 특징으로 하는 플라즈몬 공명이며, 반면 상기 s-pol 응답은 상기 금속 인터페이스로부터 공간적으로 분리된 공명 필드 (resonance field)를 특징으로 한다. 따라서, 상기 금속 인터페이스에서 손실이 있는 경우, 상기 광학적 손실이 상기 플라즈몬 근접 필드를 감쇠시킴으로써 상기 p-pol 응답의 강도가 크게 감소된다. 이것은 반사된 스펙트럼에서 지배적인 상기 샤프한 s-pol 공명을 유지하고, 이것은 매우 선명하고 스펙트럼적으로 순수한 색상을 생성한다.

[0104] 상기 두 가지 기준을 충족함으로써, 본 발명자들은, 본 발명의 반사형 픽셀 측정 배열을 이용하여, 손실 금속인 Pt 및 W 기재들이 더 넓은 sRGB 색상 영역 커버리지를 나타내며, 이것은 Ag에 비하여 유사한 픽셀 콘트라스트 비율을 유지하는 반면, 금속들 중에서 가장 적은 손실을 나타내는 Ag의 것보다, 더 높은 색상 선명도를 나타내는 것이다. 이러한 결과들은 Ag 및 Al을 넘어 풍부한 화학적 특성 및 물리적 특성을 제공하는 손실 금속들로 금속들의 범위를 실질적으로 확장하기 위한 반사형의 선명한 구조적 색상들의 전반적 전략을 나타낸다.

[0105] 본원에서, 색상의 스펙트럼 순도를 향상하기 위한 전략을 제공하기 때문에, 상기 s-pol 공명 및 p-pol 공명의 뚜렷한 공간 프로파일을 이해하는 것이 중요하다. 상기 p-pol 공명 필드가 상기 금속-그레이팅 인터페이스와 공간적으로 중첩되는 것은 그것이 상기 금속으로부터의 손실에 의해 직접적으로 영향을 받는다는 것을 의미한다. 대조적으로, 상기 s-pol 공명 필드는 상기 금속으로부터 공간적으로 분리되고 상기 공기-그레이팅 인터페이스 사이에 위치된다. 이것은 상기 s-pol 응답이 상기 p-pol 응답보다 상기 금속으로부터의 손실에 덜 민감하다는 것을 나타낸다.

[0106] 도 4e 및 도 4f는 Ag, Pt 및 W 기재들 상의 550 nm 주기, 300 nm 에치 폭, 및 200 nm 두께를 갖는 그레이팅에서 (e) s-pol 전기장 분포의 공명의 단면도 및 (f) p-pol 전기장 분포의 공명의 단면도를 나타낸다.

[0107] 도 4e에 나타낸 것과 같이, 상기 강도가 Ag, Pt 및 W의 순서로 손실 금속들에 대해 점차적으로 감소하는 것으로 밝혀졌음에도 불구하고, 상기 세 개의 금속들 사이에 상기 s-pol 공명 필드의 공간적 특성들은 유사하게 유지된다.

[0108] 반면, 도 4f는 Ag 기재의 경우와 비교하여 Pt 기재에 대해 급격히 감쇠되고 상기 W 기재에 대해 더욱 급격히 감쇠되는 p-pol 유도된 플라즈몬 근접 필드를 나타낸다. 서로 상이한 금속들에 대한 상기 s-pol 및 p-pol 공명 필드의 비교는 상기 손실이 상기 s-pol 기여보다 더 급격하게 상기 p-pol 기여에 영향을 준다는 것을 명확히 제시한다. Pt 및 W 기재들은 각각 Ag 기재에서보다 17% 및 27%만큼 더 작은 최대 s-pol 공명 필드 강도를 지원하는 반면, 그것들의 p-pol 상응물은 각각 72% 및 82% 더 작다. 이것은 본 발명자들이 상기 s-pol 기여를 유지하면서 상기 손실을 이용함으로써 상기 p-pol 기여를 효과적으로 제거할 수 있음을 시사한다.

[0110] 각각의 편광된 필드 성분으로부터 그레이팅 슈퍼모드 공명의 생성을 실험적으로 확인하고 상기 금속 기재에 대한 그것의 의존성을 평가하기 위해, 본 발명자들은 도 6에 나타낸 것과 같이, 파장 및 주기의 함수로서 Ag, Pt 및 W 기재 상에서 에치된 PMMA 그레이팅으로부터 0 차 s-pol 및 p-pol 반사를 별도로 측정하였다.

[0111] 도 6a는 금속 기재 상의 유전체 그레이팅으로부터 s-pol 여기/검출을 통한 반사 측정의 개략도를 나타내며, 도 6b는 금속 기재 상의 유전체 그레이팅으로부터 p-pol 여기/검출을 통한 반사 측정의 개략도를 나타낸다. 이것은 각각의 그레이팅 슈퍼모드를 나타낸다.

[0112] 도 6a 및 도 6b의 개략도에 나타낸 것과 같이, 상기 그레이팅은 s-pol 여기 검출 및 p-pol 여기 검출 각각에 대하여 입사 편광에 따라 정렬되었고 수직적으로 정렬되었다. 상이한 그레이팅 주기 및 고정된 에치 폭의 50X50 μm^2 그레이팅들로 형성된 픽셀들을 0.15 N.A. 대물 렌즈로 조사하였다. AFM에 의해 측정된 상기 PMMA 두께는 Ag, Pt 및 W 각각의 픽셀에 대해 200 nm, 190 nm 및 205 nm이고, SEM에 의해 측정된 상기 에치 폭은 각각 270 nm, 308 nm 및 332 nm이었다. 비교 목적을 위해, 상기 측정된 그레이팅 파라미터들을 이용하여 RCWA 계산을 수행함으로써 0 차 반사를 수득하였다. 주기 및 파장의 함수로서 상기 세 개의 금속들에 대해 계산된 상기 s-pol 반사 및 p-pol 반사에서 경향은 공통적으로 상기 측정된 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

[0113] 도 6c는, Ag (상단), Pt (중간) 및 W (하단) 상의 유전체 그레이팅의 주기 및 파장의 함수로서 계산되고 측정된 s-pol 반사를 나타낸다. 도 6c는, s-pol 여기 하에서, Ag, Pt 및 W 상의 그레이팅들로부터의 반사 스펙트럼이 유사하게 거동하며, 이것은 각각 주기보다 더 길거나 더 짧은 파장에 대한 높은 강도와 낮은 강도를 특징으로 한다. 맵은 0 차 반사 강도를 기술하기 때문에, 상기 주기 미만의 파장에 대하여 1 차 회절 강도의 부재는 두 개의 다른 반사 영역들 사이의 급격한 변화를 설명한다. 상기 PMMA 두께는, Ag 경우에서 가장 두드러지게 보인 것과 같이, 파동 간섭 현상으로 인한 상기 주기 미만의 파장에 대하여 0 차 반사 강도에 영향을 미친다. 측정된 반사 강도의 작은 딥 (dip)을 주목할 수 있으며, 이것은 상기 세 개의 금속 기재들 모두에 대한 주기 근처의 파장에 대한 계산에서 나타나지 않는다. 상기 딥은 상기 그레이팅 픽셀에 빛을 근사하는 대물 렌즈의 사용으로부터 발생한다. 대물 렌즈를 통해 상기 픽셀에 전달되는 빛은 유한한 각도 분포를 나타내며, 이것은 본 발명자들이 도 6e 및 도 8에서 확인한 것과 같이, 상기 그레이팅에서 상기 공명을 스플리팅 (splitting)하는 효과를 가진다. 상기 효과는 평면파 소스가 광조사에 사용되기 때문에 상기 계산에서 상기 효과를 관찰할 수 없다.

[0114] 도 7 는 파장 및 입사각의 함수로서 Ag (상단), Pt (중간), 및 W (하단) 기재들 상의 PMMA 그레이팅으로부터의 계산된 (a) s-pol 0 차 반사 및 (b) p-pol 0 차 반사를 나타내며, 그레이팅 파라미터들은 도 6에서 사용된 것과 동일하다.

[0115] 도 8은 Ag (상단), Pt (중간), 및 W (하단) 기재들에 대한 평면파 소스 및 Gaussian 빔을 이용한 측정과 계산 사이의 (a) s-pol 0 차 반사 및 (b) p-pol 0 차 반사의 비교를 나타낸다. 평면파 소스로부터의 반사는 도 7에서 나타낸 것 과 같이, 0° 각도에서 스펙트럼에 상응하는 반면, Gaussian 빔으로부터의 반사는 상기 각도들에 걸쳐 통합된 입사 광의 각도 Gaussian 분포 및 입사각 의존 반사의 곱 (product)에 상응한다 (도 7 참조). 그레이팅 파라미터들은 도 6에서 사용된 것과 동일하다.

[0116] 도 6d는 Ag (상단), Pt (중간) 및 W (하단) 상의 유전체 그레이팅의 주기 및 파장의 함수로서 계산되고 측정된 p-pol 반사를 나타낸다. 도 6e는 상이한 효과 굴절률의 유전체를 지원하는 매끄러운 Ag (—) 필름, Pt (- -) 필름, W (…) 필름에 대해 측정된 파장에 의한 표준화된 SPP 전파길이를 나타낸다.

[0117] 이후, 본 발명자들은 도 6d에서 나타낸 것과 같이, Ag, Pt 및 W 기재들에 대한 상기 p-pol 그레이팅 슈퍼모드 공명의 거동을 조사한다. 상기 s-pol 반사와 유사하게, 상기 0 차 회절 영역에서 높은 반사가 관찰되며, 이것은 손실이 증가하는 금속들의 순서에 따라 감소한다. 더 중요한 것은, 상기 모든 세 개의 경우들에 대하여 주기보다 더 큰 파장에서 발생하는 SPP 모드를 관찰한다는 것이다. 그러나, 상기 세 개의 금속 기재들 중에서 그것의 거동에서의 뚜렷한 차이가 명백하다. 첫째, 계산 및 측정에서 관찰된 것과 같이, 상기 SPP 공명의 스펙트럼 폭은 손실이 더 큰 금속들에 대해 증가한다. 상기 SPP 공명 폭은 Ag의 경우 가장 좁고 W의 경우 가장 넓다. 둘째, 상기 SPP 공명에서 반사 강도의 감소는 Ag의 경우 가장 작으며, 이것은 계산에서 및 가장 큰 W에서 더 명확하게 나타난다. 상기 감소된 값은 상기 금속-그레이팅 인터페이스에서 더 큰 손실을 겪기 때문에 Ag 상에서 보다 W 상에서상기 SPP에 의한 파워 (power)의 더 큰 소산을 나타낸다.

[0118] 손실 금속들에서 SPP의 소산과 그레이팅 파라미터들 사이의 전반적 상호 관계는 SPP 파동벡터의 허수부 성분을 조사함으로써 확립될 수 있다. 첫 번째 근사에 대하여, 평평하고 균일한 금속-유전체 인터페이스의 SPP 소산은 금속 기재 상의 상기 유전체 그레이팅의 SPP파동 벡터를 모델링하는데 사용될 수 있다. 이러한 근사법은 또한 금속 슬래브 (slab)를 통해 천공된 홀 어레이를 통한 빛의 현저한 투과에서 SPPs의 역할을 이해하는 데 사용되었다. 평평한 금속-유전체 인터페이스 상의 SPPs의 경우, 더 큰 인덱스를 갖는 유전체 필름은 증가된 소산을 의미하는, 상기 SPP 파동벡터의 허수부 성분을 증가시킨다. 본 발명의 시스템에서, 상기 에치 폭은 고정되어, 더 큰 주기는 서브파장 그레이팅에 대하여 증가된 유효 굴절률에 상응한다. 이것은 도 4d에서 Pt 및 W 기재들에 대하여 나타낸 것처럼, 더 큰 그레이팅 주기 동안 손실 금속 인터페이스 상에서 SPPs의 소산을 향상시킨다. Ag 기재의 경우, 관심 파장 범위에 걸쳐 SPP의 전파 길이의 증가가 (즉, 더 큰 유효 굴절률 인덱스) 더 큰 주기로 인한 소산보다 더 크기 때문에 SPP의 소산은 더 큰 주기에 대하여 증가하지 않는다 (도 6e 참조).

[0120] **유전체 그레이팅의 슈퍼모드 공명**

[0121] Ag, Pt 및 W 기재들 사이에서 상기 s-pol 반사를 비교함으로써, 상기 금속들의 고유한 반사율의 순서로부터 예상되는 것과 같이, 0 차 반사가 Ag에 대해 가장 높고 W에 대해 가장 낮음을 알 수 있다. 상기 세 개 금속들 모두에 대해, 상기 s-pol 그레이팅 슈퍼모드 공명은 상기 1 차 회절의 온셋 (onset)과 일치하고 (즉, 파장이 주기와 동일함), 계산된 반사 맵과 실험적 반사 맵 모두로부터 급격한 것으로 보인다. 절대적 반사 강도에서의 차이보다, 상기 크로스-편광 반사 피크의 스펙트럼 폭을 좁게 유지하는 상기 슈퍼모드 공명을 수반하는 급격한 위상 차 때문에, 상기 세 개의 금속 기재들 모두가 상기 s-pol 응답으로부터 유사하고 높은 색상 선명도를 나타내는 것으로 예측된다.

[0123] 상기 관찰들을 선명한 색상들 생성에 적용하기 위해, 본 발명자들은 Ag, Pt 및 W 기재들 상의 PMMA 그레이팅들로부터 크로스-편광 반사를 측정하였고, 상기 그레이팅에 대해 45° 편광된 입사 광을 조사하고, 및 그것들의 sRGB 색상 영역 커버리지를 평가하였다. 본 발명자들은 위에서 설명한 것과 같이, 상기 s-pol 및 p-pol 여기-검출 측정에서 조사된 것과 동일하거나 유사한 파라미터로 그레이팅을 조사하였다. 상기 Ag, Pt, 및 W 기재들에 대한 상기 PMMA 두께 (및 에치 폭)는 각각 200 (270) nm, 190 (308) nm, 193 (346) nm이었다. 비교를 위해, 상기 세 개 금속들 상의 상기 그레이팅들을 모델링하는 FDTD 시뮬레이션을 통해 상기 크로스-편광 반사를 계산하였다.

[0124] 도 9a 및 도 9b는, 주기와 파장의 함수로서, 각각 계산되고 측정된 크로스-편광 반사를 나타낸다. 구체적으로 도 9a는 Ag (상단), Pt (중간) 및 W (하단) 기재들 상의 유전체 그레이팅으로부터 주기 및 파장의 함수로서, 계산된 크로스-편광 반사를 나타낸다. 도 9b (좌측)는 측정된 크로스-편광 반사를 나타내며, 도 9b (우측)는 측정된 색도 및 sRGB 커버리지 비율을 나타내는 CIE 색도 다이어그램을 나타낸다. 상기 삽입도는 50 x 50 μm^2 픽셀들의 광학적 이미지들이다.

[0125] PEC 상에서 유전체 그레이팅의 이론적 분석과 유사하게 (도 4a 참조), Ag 기재 상의 PMMA 그레이팅은 계산 및 측정에서 상기 크로스-편광된 반사에 기여하는 샤프한 s-pol 공명 및 p-pol 공명을 나타낸다. 그러나, 상기 Pt 기재 및 W 기재의 경우, 상기 금속으로부터의 손실이 상기 필드를 소산하기 때문에 상기 p-pol 공명을 거의 관찰할 수 없다. 이것은 상기 크로스-편광 반사 스펙트럼에서 뚜렷한 스펙트럼 피크의 개수를 두 개에서 한 개로 감소시키는 효과를 가지며, 이것은 생성된 색상의 단색성을 증가시킨다. 상기 s-pol 공명의 위치가 전체 가시광 범위에 걸쳐 주기와 같기 때문에, 수동 컬러 (passive color) 조절을 직관적으로 알 수 있다 (즉, 상기 그레이팅 주기는 색상 광의 파장임). 측정된 반사 맵에 나타낸 것과 같이, 상기 세 개의 금속 기재들에 대한 본래 (original) s-pol 응답 근처에서 발생하는 추가 (extra) 공명이, 전에 설명한 것과 같이, 낮은 N.A. 대물 렌즈에 의해 도입된 빛의 유한한 각도 분포에 기인된 것임이 주목된다 (도 7 및 도 8 참조).

[0126] 도 9b에 나타낸 것과 같이, 상기 세 개의 금속 기재들로부터의 스펙트럼 순도 및 관련된 색상 선명도의 비교는 픽셀 세트의 OM 이미지 및 상응하는 CIE 다이어그램들에서 나타난다. 상기 OM 이미지들로부터, Ag 기재 상의 픽셀들에 대한 접근가능한 색상 범위가 Pt 또는 W 기재와 비교하여 제한됨을 알 수 있다. 예를 들어, 상기 Ag 기재는 선명한 황색을 지원 (support)하지 않는 반면 상기 Pt 및 W 기재는 선명한 황색을 지원한다. 상기 sRGB 영역 범위를 계산하였으며, 이것은 각 픽셀로부터 측정된 색도 및 sRGB 삼각형 (sRGB triangle)으로부터 정의된 영역 사이의 비율을 수득함으로써, 색상 범위와 색상 선명도의 지표가 된다. 다른 연구들에 따르면, 상기 sRGB 삼각형 외부 영역은 상기 영역 커버리지가 1 이하가 되도록 절단 (truncated)된다. 본 발명자들은 Ag에 의해 나타난 높은 굴절률 및 낮은 손실에도 불구하고, Ag 기재에 대하여 측정된 상기 영역 범위는 55%에 불과하며, 이것은 Pt에 의해 달성된 90% 커버리지보다 현저하게 작고 W에 의해 달성된 69% 범위보다 작다는 것을 발견하였다. Ag에 대한 상기 낮은 영역 범위는 상기 p-pol 응답의 강한 기여에 기인하며, 이것은 상기 크로스-편광 반사 스펙트럼에서 상기 s-pol 응답에 스펙트럼적으로 구분되는 피크를 추가함으로써 단색성을 보상한다. 대조적으로, Pt와 W에 의해 나타나는 높은 손실은 상기 p-pol 응답의 기여를 감소시키며, 이것은 상기 스펙트럼적으로 샤프한 s-pol 응답이 상기 색상을 정의하도록 한다. 이러한 전략은 상기 영역 커버리지를 확장함으로써 상기 색상 선명도를 현저하게 향상시키는데 도움이 된다. Pt에서 상기 측정된 90%의 값은 상기 sRGB 삼각형 내로 제한된 커버리지 영역에 대한 플라즈몬 및 Mie 공명 유형 디자인으로부터의 것들을 포함하는 보고된 반사 컬러 픽셀들 중 가장 높은 값 중 하나이다. 상기 스킴은 다른 손실 금속들에 대하여 일반적이지만, Pt의 사용은

그 표면이 산화에 크게 저항성이 있기 때문에 연장된 광학적 안정성을 보장하며, W의 사용은 가장 낮은 열적 팽창 계수를 나타내므로 CMOS 호환가능성 및 향상된 열적 안정성을 시사하는 것을 주목할만 하다.

[0128] **유전체 그레이팅의 콘트라스트**

[0129] 본 발명자들은 또한 본 발명의 크로스-편광 입/출력 광 스킴을 통해 픽셀 및 백그라운드 사이의 높은 콘트라스트를 달성할 수 있음을 주목한다. 각 픽셀에 대한 콘트라스트 비율은 그것의 상기 백그라운드의 통합된 스펙트럼 사이의 콘트라스트 비율을 계산함으로써 수득될 수 있다. 상기 백그라운드 신호를 거의 제로 (0)에 가깝게 감소시킴으로써, 높은 콘트라스트 비율이 수득될 수 있다. 본 발명의 경우, 상기 백그라운드 신호에서 트레이스 (trace) 강도는 입력 편광자 및 출력 편광자의 소광 비율 (extinction ratios)에 의존하며, 더 높은 소광 비율을 갖는 편광자들을 사용함으로써 더욱 최소화될 수 있다. 본 발명의 측정들은 100 : 1 소광 비율을 나타내는 편광자들로 수행되었으며, 이것은 상기 Ag, Pt 및 W 기반 픽셀들에 대해 각각 48 : 1, 58 : 1 및 31 : 1의 평균 콘트라스트 비율을 수득하게 한다. 상기 값들은 상기 광학적 손실 차이에도 불구하고 서로 상이한 금속 기재들에 의하여 비교가능한 콘트라스트 비율을 달성할 수 있음을 나타낸다.

[0131] **반사에 대한 분석적 설명**

[0132] 커플링된 도파관-어레이 모드를 이용하는 금속 기재 상의 1D 유전체 그레이팅으로부터의 반사에 대한 본 발명의 분석적 설명은 W. Yang et al.의 연구에서 유래되었다. W. Yang은 독립형 그레이팅 시스템에서 커플링된 도파관-어레이 모드의 상기 분석적 처리에 대한 자세한 설명을 제공하였으며, 여기에서 상단 층, 중간 층, 및 하단 층은 각각 공기, 그레이팅 및 공기이다. 본 발명의 설명은 투과성 하단 유전체 층을 반사성 PEC 층으로 대체함으로써 본래 시스템을 변형하였다.

[0133] 도 10은 공기-그레이팅-PEC 시스템의 모드 전파 개략도를 나타낸다.

[0134] 본 발명자들은, 도 10에 나타낸 것과 같이, 공기 층 (층 I), 유전체 그레이팅 층 (층 II) 및 PEC (층 III) 층으로 형성되는 시스템을 고려한다. W. Yang의 연구와 유사하게, 본 발명자들은 하기와 같이 그것들의 모드 베이시스 세트 (basis set)에 따라 공기 및 유전체 그레이팅 층의 필드들을 확장할 수 있다.:

$$E_x^{I}(x,z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} [A_n^{I}(z) + B_n^{I}(z)]\varepsilon_{x,n}^{I}(x)$$

$$E_x^{II}(x,z) = \sum_{m=0}^{\infty} [A_m^{II}(z) + B_m^{II}(z)]\varepsilon_{x,m}^{II}(x) \qquad (1)$$

[0135]

[0136] 여기에서, 상기 계수들은 공기 층 및 그레이팅 층 각각에서, 전방 *(A)* 및 후방 *(B)*으로 전파되는 복소 회절 (complex diffraction) 및 도파관-배열 모드를 나타낸다. 이것은. 상기 전방 이동 모드는 하기와 같이 나타낼 수 있다.:

$$A^{I} = [\cdots \; A_{-2}^{I} \; A_{-1}^{I} \; A_0^{I} \; A_1^{I} \; A_2^{I} \; \cdots]^T$$

$$A^{II} = [\; A_0^{II} \; A_1^{II} \; A_2^{II} \; \cdots]^T \qquad (2)$$

[0137]

[0138] 상기 후방-이동 모드도 또한 유사하게 표현될 수 있다. ρ_{21} 및 ρ_{12}는 각각 층 2에서 층 1 및 층 1에서 층 2으로의 모드들의 반사를 설명하는 반사 매트릭스다. 특히, ρ_{21}은 도파관-어레이 모드들 서로의 커플링을 설명한다. 유사하게, ρ_{12}와 ρ_{21}은 각각 층 1에서 층 2 및 층 2에서 층 1로 전이하는 모드에 대한 전이 매트릭스이다. 그 자체에 모든 모드들을 반영하는 $_{23}$은 상기 PEC 층에서 반사하는 상기 도파관-어레이 모드들을 설명한다 (ρ_{23} =-1) (즉, 모드들 사이에 교차-커플링이 발생하지 않음). 본 발명의 목적은 0 차 반사에 대한 표현을 발견하는 것이며, 이것은 발견에 의해 하기와 같이 수득될 수 있다.:

$$\mathbf{R} = \boldsymbol{B}_{\boldsymbol{I}} \cdot \boldsymbol{A}_{\boldsymbol{I}}^{-1}. \quad (3)$$

[0139]

[0140] 본 발명자들은 먼저 공기 및 그레이팅 사이의 인터페이스에서 상기 필드와 관련되는 매칭 매트릭스를 구축할 수 있다.:

$$\begin{pmatrix} \boldsymbol{A}_{\boldsymbol{I}}(z=0^-) \\ \boldsymbol{B}_{\boldsymbol{I}}(z=0^-) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{t}_{12}^{-1} & -\boldsymbol{t}_{12}^{-1}\boldsymbol{\rho}_{21} \\ \boldsymbol{\rho}_{12}\boldsymbol{t}_{12}^{-1} & -\boldsymbol{\rho}_{12}\boldsymbol{t}_{12}^{-1}\boldsymbol{\rho}_{21} + \boldsymbol{t}_{21} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \boldsymbol{A}_{\boldsymbol{II}}(z=0^+) \\ \boldsymbol{B}_{\boldsymbol{II}}(z=0^+) \end{pmatrix} \quad (4)$$

[0141]

[0142] 본 발명자들은 상기 모드들이 그레이팅 두께를 통해 전파되기 때문에 상기 모드들의 누적된 위상을 추적하는 전파 매트릭스를 정의한다.:

$$\boldsymbol{\varphi} = \begin{pmatrix} e^{-i\beta_0 h} & 0 & 0 \\ 0 & e^{-i\beta_1 h} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-i\beta_2 h} \end{pmatrix} \quad (5)$$

[0143]

[0144] 이후 상기 상단 그레이팅 인터페이스에서 상기 모드들은 하기와 같이 하단 인터페이스와 연관될 수 있다.:

$$\begin{pmatrix} A_{II}(z=0^+) \\ B_{II}(z=0^+) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\varphi}^{-1} & 0 \\ 0 & \boldsymbol{\varphi} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \boldsymbol{A}_{\boldsymbol{II}}(z=h^-) \\ \boldsymbol{B}_{\boldsymbol{II}}(z=h^-) \end{pmatrix} \quad (6)$$

[0145]

[0146] 상기 공기 층의 회절 모드는 하기와 같이 표현될 수 있다.:

$$\begin{pmatrix} \boldsymbol{A}_{\boldsymbol{I}}(z=0^-) \\ \boldsymbol{B}_{\boldsymbol{I}}(z=0^-) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{t}_{12}^{-1} & -\boldsymbol{t}_{12}^{-1}\boldsymbol{\rho}_{21} \\ \boldsymbol{\rho}_{12}\boldsymbol{t}_{12}^{-1} & -\boldsymbol{\rho}_{12}\boldsymbol{t}_{12}^{-1}\boldsymbol{\rho}_{21} + \boldsymbol{t}_{21} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \boldsymbol{\varphi}^{-1} & 0 \\ 0 & \boldsymbol{\varphi} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \boldsymbol{A}_{\boldsymbol{II}}(z=h^-) \\ \boldsymbol{B}_{\boldsymbol{II}}(z=h^-) \end{pmatrix} \quad (7)$$

[0147]

[0148] B_{II}는 PEC 층을 반영하는 AII 모드이므로, 그것은 하기와 같이 표현할 수 있다.:

$$\boldsymbol{B}_{\boldsymbol{II}}(z=h^-) = \boldsymbol{\rho}_{23}\boldsymbol{A}_{\boldsymbol{II}}(z=h^-) = -\boldsymbol{A}_{\boldsymbol{II}}(z=h^-) \quad (8)$$

[0149]

[0150] 방정식 (3), (7) 및 (8)을 이용하여, 본 발명자들은 하기와 같이 반사에 대한 표현을 발견할 수 있다.:

$$\mathbf{R} = (\boldsymbol{\rho}_{12}\boldsymbol{t}_{12}^{-1}\boldsymbol{\varphi}^{-1} + \boldsymbol{\rho}_{12}\boldsymbol{t}_{12}^{-1}\boldsymbol{\rho}_{21}\ \boldsymbol{\varphi} - \boldsymbol{t}_{21}\ \boldsymbol{\varphi})(\mathbf{t}_{12}^{-1}\ \boldsymbol{\varphi}^{-1} + \mathbf{t}_{12}^{-1}\boldsymbol{\rho}_{21}\ \boldsymbol{\varphi})^{-1}, \quad (9)$$

[0151]

[0152] 여기에서 본 발명자들은 R_{00}을 발견한다. ρ_{12}, ρ_{21}, τ_{12} 및 τ_{21}에 대한 표현들을 하기에서 찾을 수 있다.:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\rho}_{21} &= (\mathbf{H}+\mathbf{E})^{-1}(\mathbf{H}-\mathbf{E}) \\ \boldsymbol{\rho}_{12} &= -\boldsymbol{H}(\mathbf{H}+\mathbf{E})^{-1}(\mathbf{H}-\mathbf{E})\boldsymbol{H}^{-1} \\ \boldsymbol{t}_{21} &= 2\boldsymbol{H}(\mathbf{H}+\mathbf{E})^{-1}\mathbf{E} \\ \boldsymbol{t}_{12} &= 2(\mathbf{H}+\mathbf{E})^{-1}, \end{aligned} \quad (10)$$

[0153]

[0154] 여기에서 H와 E는 하기에 표현한 것과 같이, 공기와 그레이팅에서 필드들의 중첩에 상응한다.:

$$H_{n,m} = \frac{\int_0^{\wedge} H_{y,m}^{II}(x)[H_{y,n}^{I}(x)]^* dx}{\int_0^{\wedge} |H_{y,n}^{I}(x)|^2 dx}$$

$$E_{n,m} = \frac{\int_0^{\wedge} \varepsilon_{x,m}^{II}(x)[\varepsilon_{x,n}^{I}(x)]^* dx}{\int_0^{\wedge} |\varepsilon_{x,n}^{I}(x)|^2 dx} \quad . \qquad (11)$$

[0155]

[0156] 도 11은 Ag, Pt 및 W의 (a) 엘립소메트리에 의해 측정된 굴절률 인덱스, 및 (b) 실수부 유전율 (epsilon 값)과 허수부 유전율 (epsilon 값)을 나타낸다.

[0157] 도 11에 나타낸 것과 같이, 상기 기울기 각도는 일련의 타원 편광 상태를 통한 빠른 전이를 의미하는 것을 알 수 있다 (도 5f, 도 5g 참조).

[0158] 본 발명자들은 Ag에 대해 표로 만들어진 광학적 상수를 사용하여 FDTD 시뮬레이션을 통해 Ag, Pt 및 W에 대한 상기 s-pol 및 p-pol 공명 필드를 시각화함으로써 상기 효과를 확인할 수 있으며, Pt 및 W에 대한 엘립소메트리 (ellipsometry)를 통해 광학적 상수를 측정하였다 (도 11 참조).

[0159] 상기 그레이팅 주기, 에치 폭, 두께 및 굴절률은 각각 550 nm, 300 nm, 200 nm, 1.5로 고정되었다.

[0161] 결론적으로, 본원에서, 본 발명자들은, 입력 광 및 출력 광에 대한 크로스-편광 배열 하에서 분석되는, 손실 금속 기재 상에 1차원 (1D) 유전체 그레이팅들로 형성된 높은 선명도 반사 컬러 픽셀을 이용한 전략을 제시한다. 입력 편광에 대해 45° 방향으로 배향된 각 픽셀은, 손실 금속에 의하여 스펙트럼 순도를 향상시킬 수 있는 색상의 광을 반사한다. 그것의 배향으로 인해, 상기 픽셀은 상기 그레이팅에 대하여 정의된 입사 광의 두 개의 직교 성분을 수용한다: s-편광 필드 (s-pol field) 및 p-편광 필드 (p-pol field), 또한 각각 횡축 전기장 (TE field; transverse electric field) 및 횡축 자기장 (TM field; transverse magnetic field)으로 알려져 있고, 여기에서 상기 TE 필드는 그레이팅 벡터에서 수직 (평행)으로 배향된 전기장에 상응한다. 특정 그레이팅 주기에 대하여, 각각의 필드 성분은 스펙트럼적으로 독특한 공명을 생성하며, 여기에서 p-pol 공명은 SPP로서 명명될 수 있다. 각각의 공명은 급격한 위상 전이를 유도하며, 이것은 파장의 함수로서 입사 편광을 회전시키는 s-pol 반사 필드 및 p-pol 반사 필드 (즉, 복굴절) 사이의 위상차를 초래한다. 출력 편광자 (polarizer)가 크로스-편광이 되기 때문에, 편광이 $\pm\pi/2$만큼 회전된 반사 광만이 투과되며, 이것은 상기 위상차 전이의 스펙트럼 넓이에 의해 정의된 선명도 (sharpness)로 상기 s-pol 공명 및 상기 p-pol 공명에서 신호를 발생시킨다.

[0162] 요약하면, 손실 금속들의 독특한 화학적 특성들에도 불구하고, 광학적 손실이 색상의 선명도를 저하시킬 수 있기 때문에 손실 금속들은 구조적 색상의 디자인에 있어서 일반적으로 회피된다. 본원에서, 본 발명자들은 근-파장 (near-wavelength) 유전체 그레이팅을 지원 (support)하는 손실 금속들이 그것의 광학적 손실로 인한 단점보다 상기 광학적 손실로부터 이점을 얻음으로써 높은 색상 선명도를 달성할 수 있게 하는 전략을 제시한다. 입사 필드 (incident field)에 대해 45° 회전된 그레이팅을 여기 (exciting)함으로써, s-편광 (s-pol) 및 p-편광 (p-pol) 각각은 상기 파장에 대한 위상을 지연시키는 스펙트럼적으로 독특한 공명을 여기하며, 이것은 커플링된 도파관-어레이 모드 (waveguide-array mode)의 처리에 의해 기술된다. 복굴절 (birefringence)로 인해, 크로스-편광 (cross-polarized) 반사 스펙트럼은 단색성 (monochromaticity)을 감소시키는 각 성분으로부터 두 개의 샤프한 피크를 나타낸다. 본 발명자들은 손실 금속들이 상기 p-pol 기여를 최소화하여, 스펙트럼을 결정하며 높은 색상 선명도를 생성하는 상기 샤프한 s-pol 응답을 유지하는 것을 제시한다. 이러한 스킴을 통해, 본 발명자들은 Pt, 촉매적 활성 금속, 및 W, CMOS 호환가능한 (compatible) 금속을 포함하는 손실 금속 기재들이, Ag의 sRGB 영역 커버리지 (sRGB gamut coverage) 55%보다 각각 90% 및 69%의 더 큰 sRGB 영역 커버리지 비율을 달성하면서 유사한 픽셀 콘트라스트 비율을 유지할 수 있음을 제시한다.

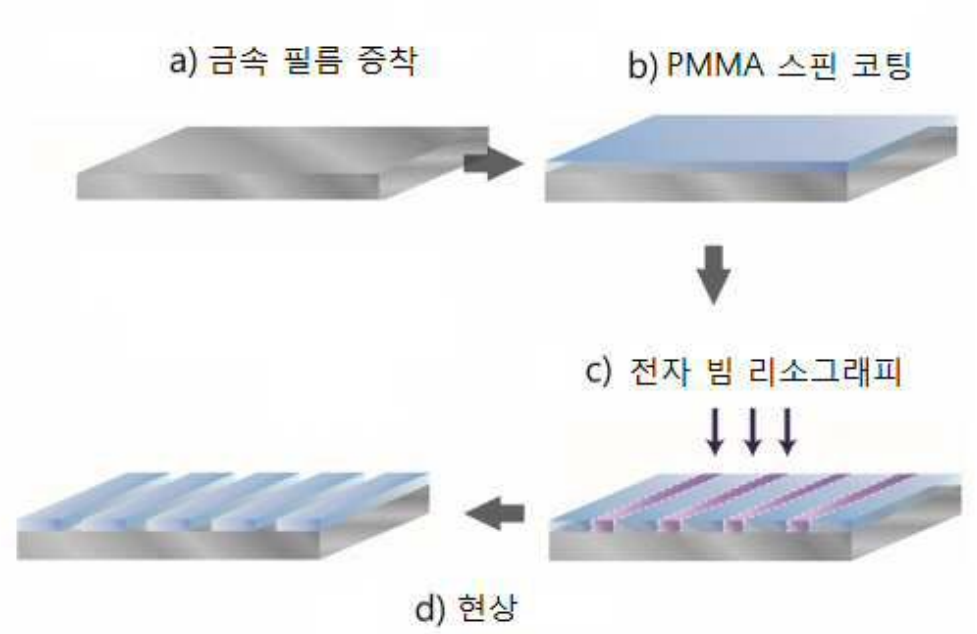
[0164] 전술한 본원의 설명은 예시를 위한 것이며, 본원이 속하는 기술분야의 통상의 지식을 가진 자는 본원의 기술적 사상이나 필수적인 특징을 변경하지 않고서 다른 구체적인 형태로 쉽게 변형이 가능하다는 것을 이해할 수 있을

것이다. 그러므로 이상에서 기술한 실시예들은 모든 면에서 예시적인 것이며 한정적이 아닌 것으로 이해해야만 한다. 예를 들어, 단일형으로 설명되어 있는 각 구성 요소는 분산되어 실시될 수도 있으며, 마찬가지로 분산된 것으로 설명되어 있는 구성 요소들도 결합된 형태로 실시될 수 있다.

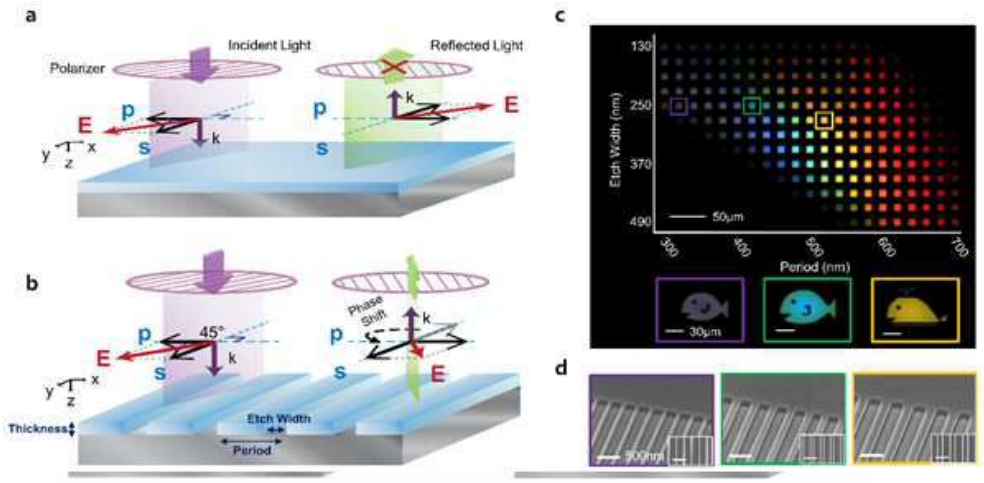
[0165] 본원의 범위는 상기 상세한 설명보다는 후술하는 특허청구범위에 의하여 나타내어지며, 특허청구범위의 의미 및 범위 그리고 그 균등 개념으로부터 도출되는 모든 변경 또는 변형된 형태가 본원의 범위에 포함되는 것으로 해석되어야 한다.

도면

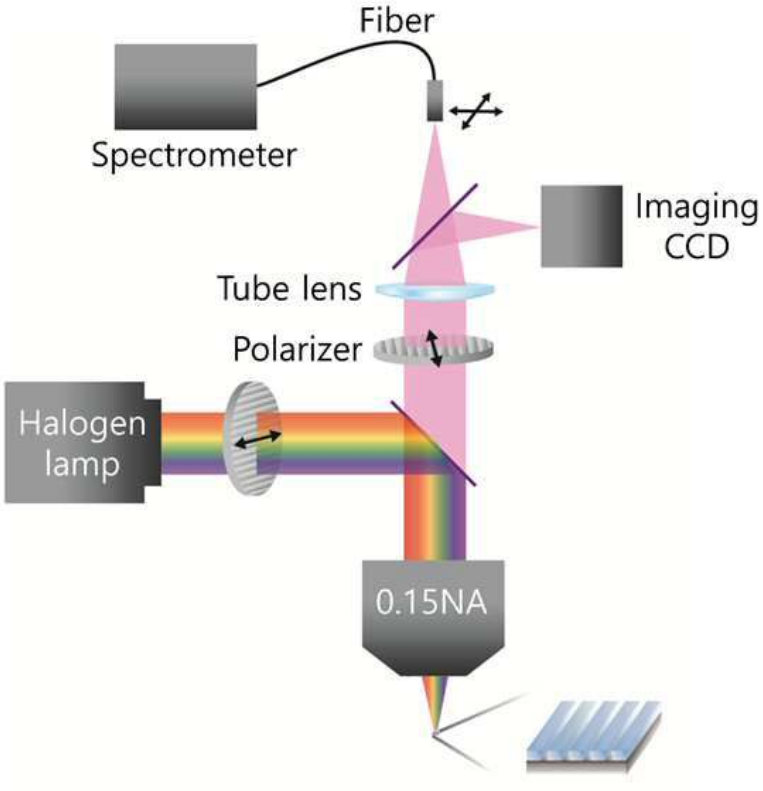
도면1



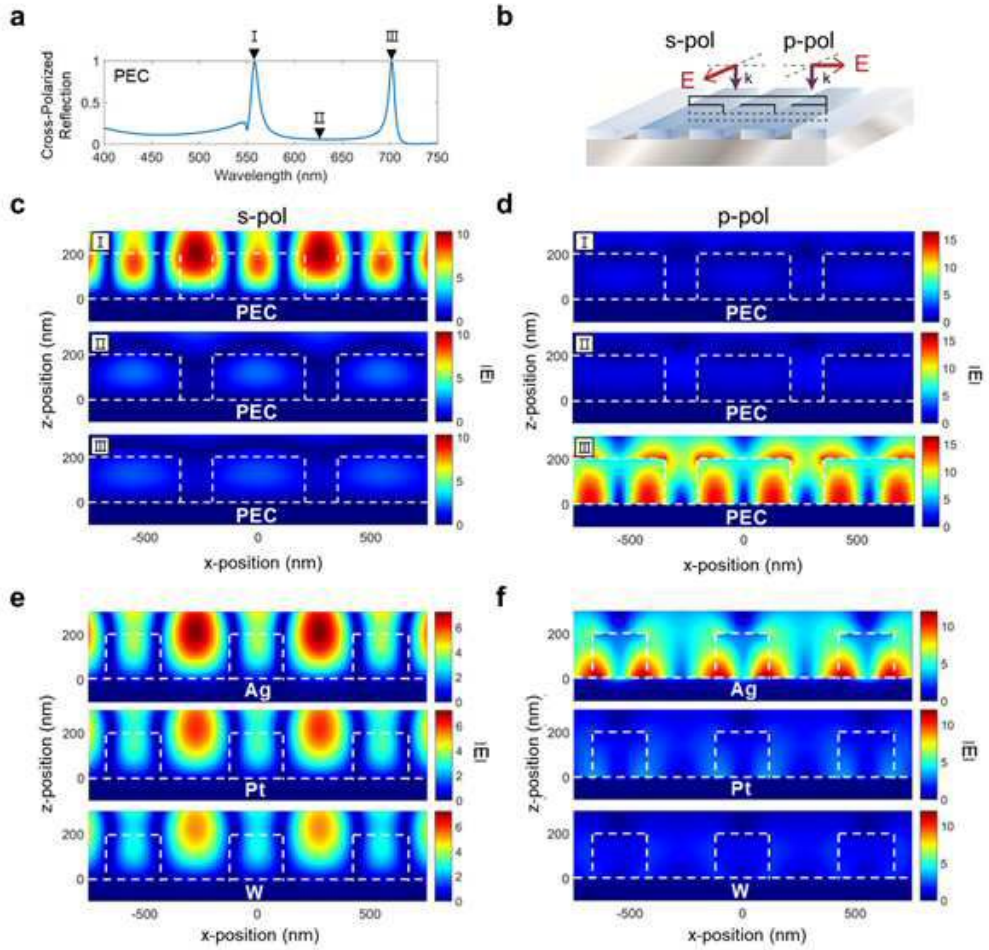
도면2



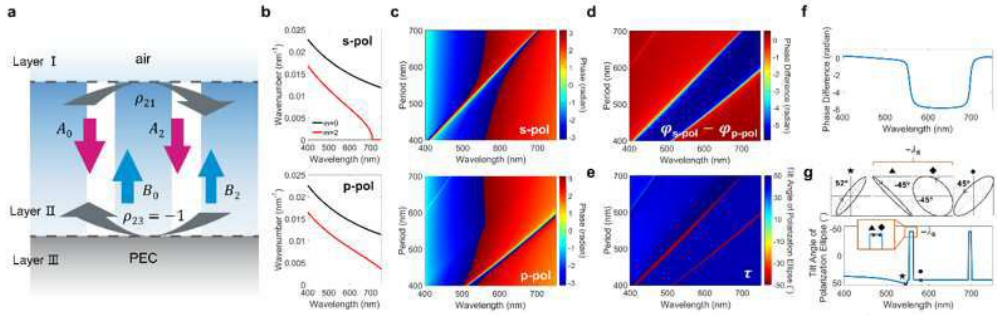
도면3

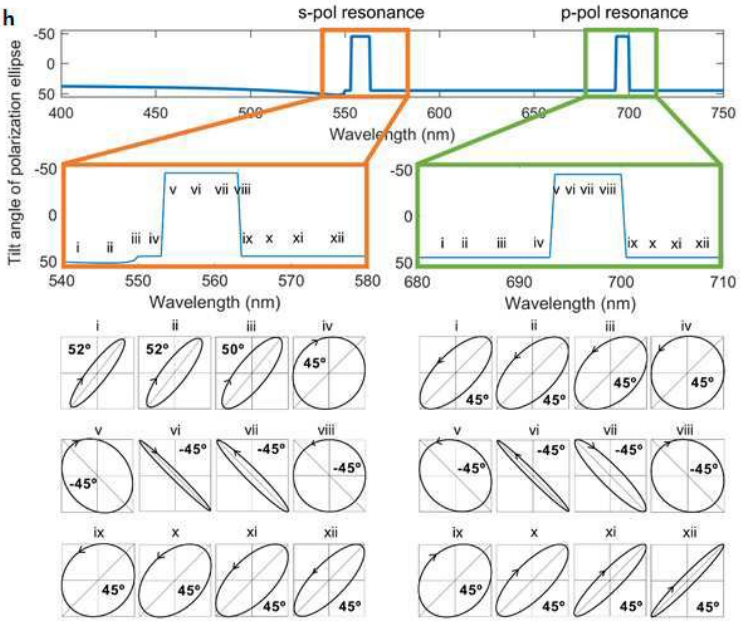

Fiber
Spectrometer
Imaging
CCD
Tube lens
Polarizer
Halogen
lamp
0.15NA

도면4

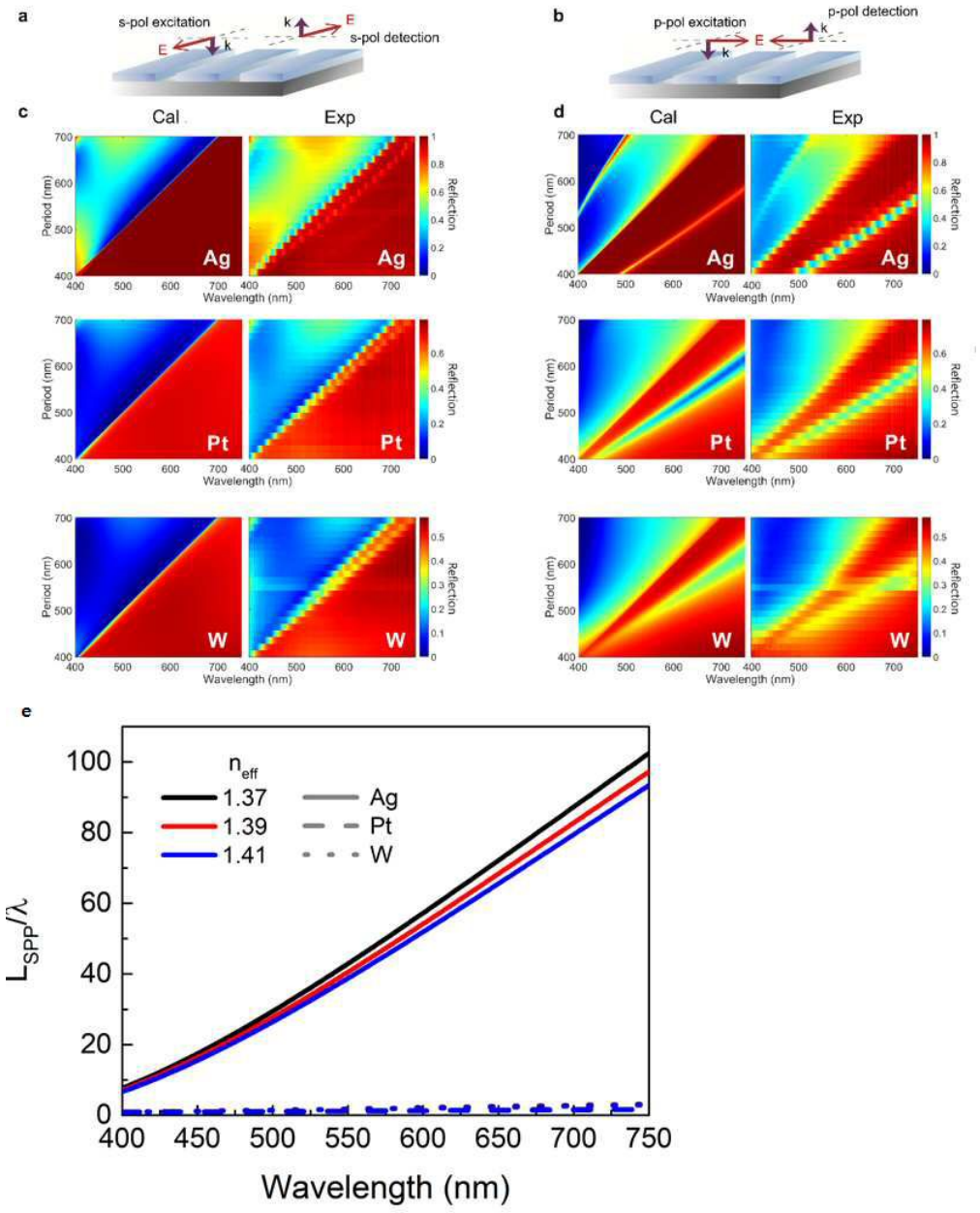

a
Cross-Polarized Reflection
PEC
I
II
III
Wavelength (nm)
b
s-pol
p-pol
E
k
c
s-pol
z-position (nm)
PEC
x-position (nm)
|E|
d
p-pol
e
Ag
Pt
W
f

도면5

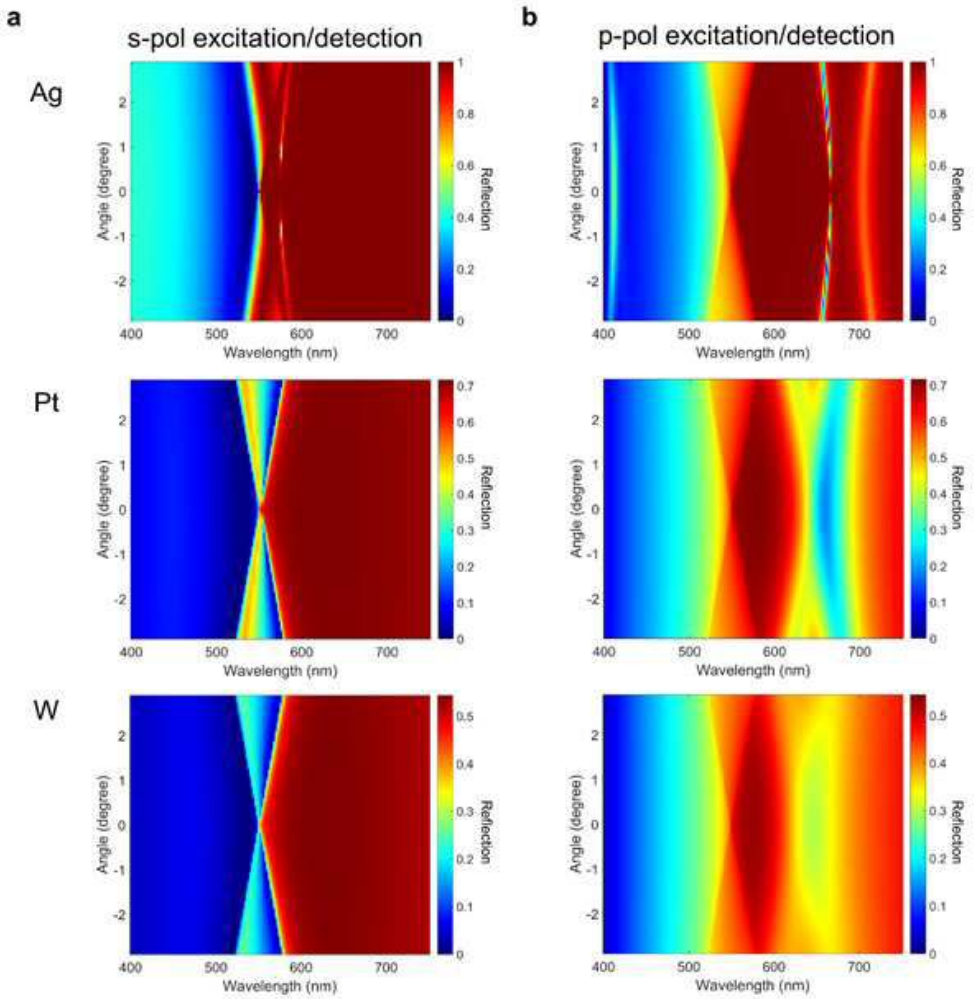

a
Layer I
air
ρ_{21}
A_0
A_2
B_0
B_2
Layer II
$\rho_{23} = -1$
Layer III
PEC
b
s-pol
p-pol
Wavenumber (nm^{-1})
Wavelength (nm)
c
s-pol
p-pol
Period (nm)
Wavelength (nm)
Phase (radian)
d
$\varphi_{s\text{-}pol} - \varphi_{p\text{-}pol}$
Phase Difference (radian)
e
τ
Tilt Angle of Polarization Ellipse (°)
f
Phase Difference (radian)
g
Tilt Angle of Polarization Ellipse (°)


h
s-pol resonance
p-pol resonance
Tilt angle of polarization ellipse
Wavelength (nm)
i ii iii iv v vi vii viii ix x xi xii
52° 52° 50° 45°
-45° -45° -45° -45°
45° 45° 45° 45°

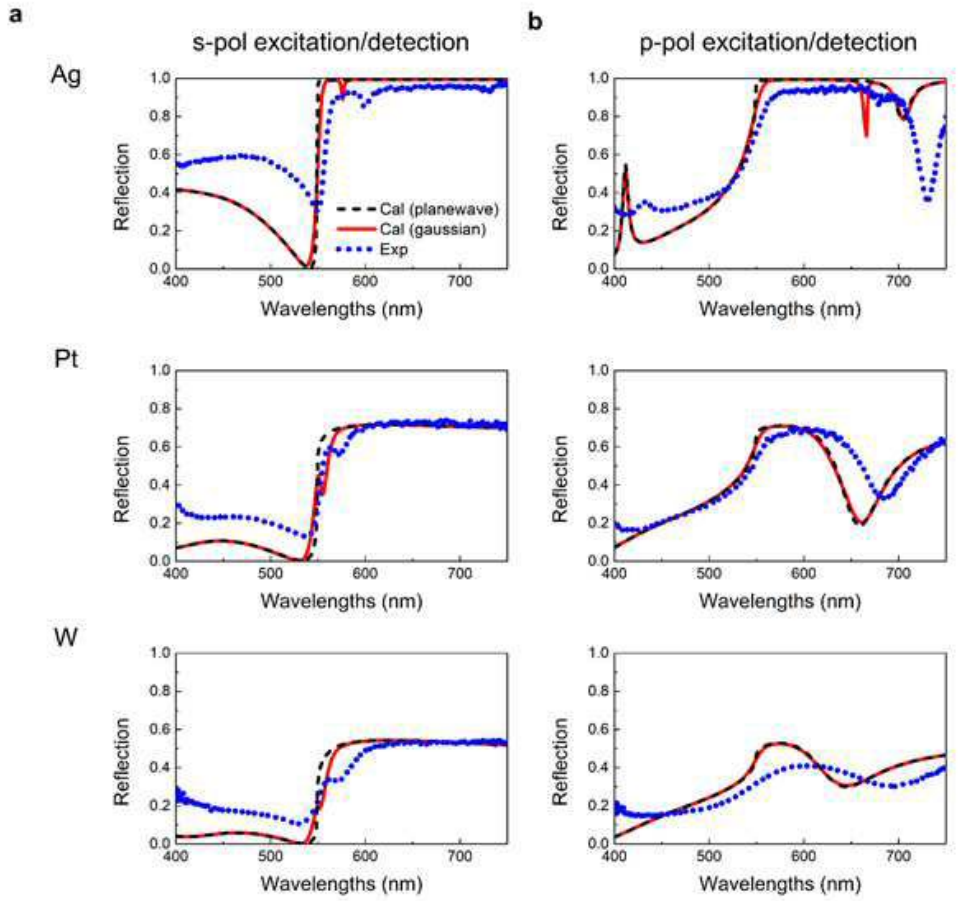
도면6


a
s-pol excitation
s-pol detection
b
p-pol excitation
p-pol detection
c
Cal
Exp
d
Cal
Exp
Ag
Pt
W
Period (nm)
Wavelength (nm)
Reflection
e
n_{eff}
1.37
1.39
1.41
Ag
Pt
W
L_{SPP}/λ
Wavelength (nm)

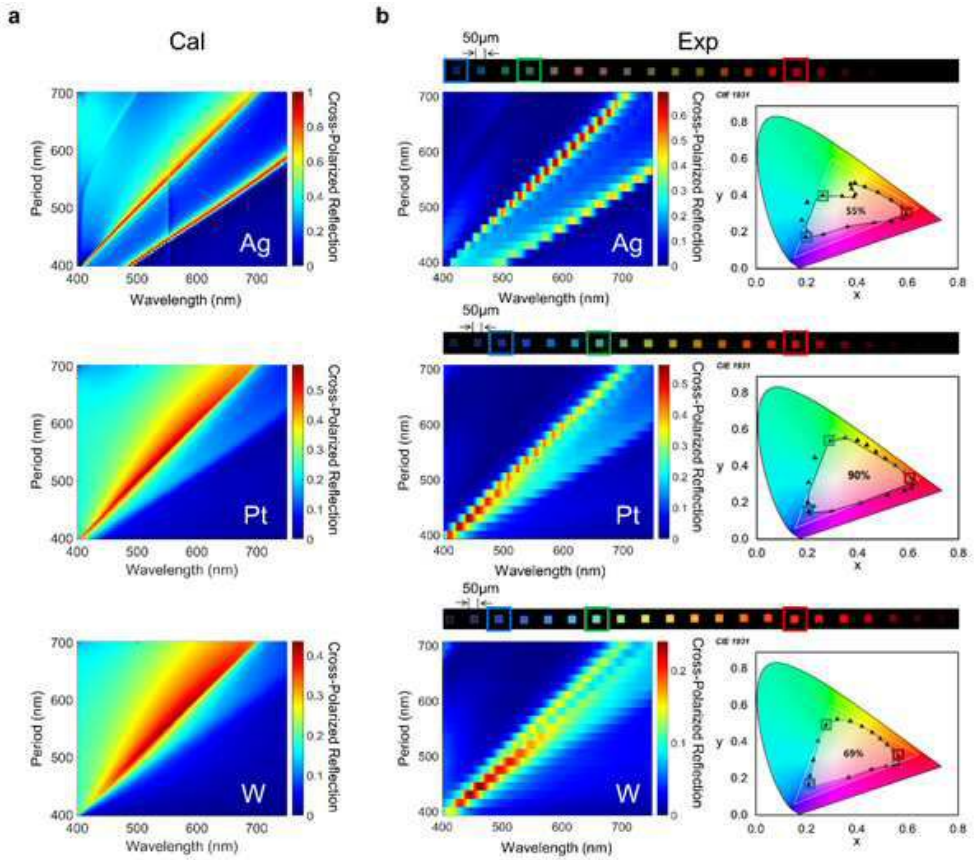
도면7


a
s-pol excitation/detection
b
p-pol excitation/detection
Ag
Pt
W
Angle (degree)
Wavelength (nm)
Reflection

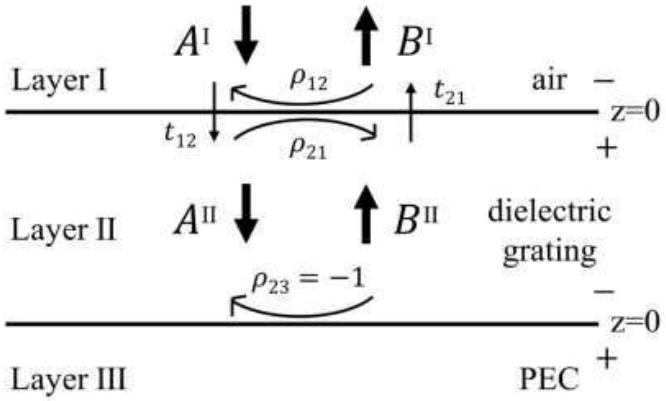
도면8


a
b
s-pol excitation/detection
p-pol excitation/detection
Ag
Pt
W
Reflection
Wavelengths (nm)
Cal (planewave)
Cal (gaussian)
Exp

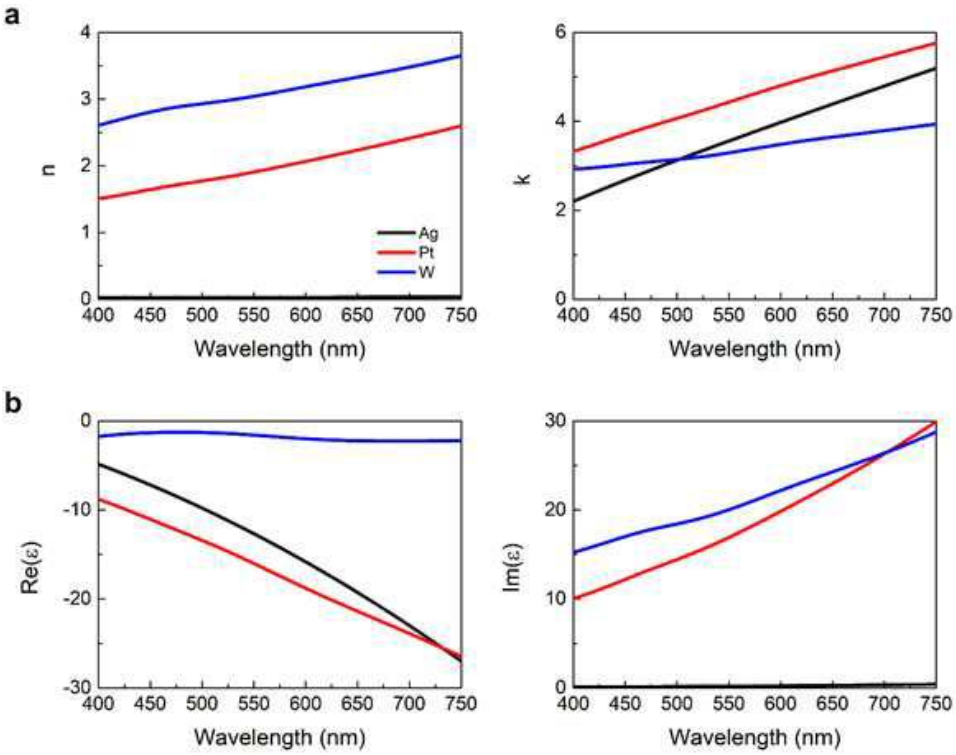
도면9


a
Cal
b
Exp
50μm
Period (nm)
Wavelength (nm)
Cross-Polarized Reflection
Ag
Pt
W
55%
90%
69%
x
y

도면10


A^{I}
B^{I}
Layer I
ρ_{12}
t_{21}
air
z=0
t_{12}
ρ_{21}
Layer II
A^{II}
B^{II}
dielectric
grating
$\rho_{23} = -1$
z=0
Layer III
PEC

도면11


a
n
k
Ag
Pt
W
Wavelength (nm)
Wavelength (nm)
b
Re(ε)
Im(ε)
Wavelength (nm)
Wavelength (nm)