

출원번호통지서

출원일자 2019.12.31
특기사항 심사청구(유) 공개신청(무) 참조번호(NPF32852)
출원번호 10-2019-0179512 (접수번호 1-1-2019-1361307-16)
출원인명칭 광운대학교 산학협력단(2-2004-010265-4)
대리인성명 특허법인이지(9-2008-100041-4)
발명자성명 이상신 고승 박철순
발명의명칭 편광과 포커싱 제어가 가능한 반파장판 메타표면, 메타렌즈 및 이들의 제조방법

특 허 청 장

<< 안내 >>

1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행상황은 출원번호를 통해 확인하실 수 있습니다.
2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 동봉된 납입영수증에 성명, 납부자번호 등을 기재하여 가까운 우체국 또는 은행에 납부하여야 합니다.
※ 납부자번호 : 0131(기관코드) + 접수번호
3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 [특허고객번호 정보변경(경정), 정정신고서]를 제출하여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.
※ 특허로(patent.go.kr) 접속 > 민원서식다운로드 > 특허법 시행규칙 별지 제5호 서식
4. 특허(실용신안등록)출원은 명세서 또는 도면의 보정이 필요한 경우, 등록결정 이전 또는 의견서 제출기간 이내에 출원서에 최초로 첨부된 명세서 또는 도면에 기재된 사항의 범위 안에서 보정할 수 있습니다.
5. 외국으로 출원하고자 하는 경우 PCT 제도(특허·실용신안)나 마드리드 제도(상표)를 이용할 수 있습니다. 국내출원일을 외국에서 인정받고자 하는 경우에는 국내출원일로부터 일정한 기간 내에 외국에 출원하여야 우선권을 인정받을 수 있습니다.
※ 제도 안내 : <http://www.kipo.go.kr>-특허마당-PCT/마드리드
※ 우선권 인정기간 : 특허·실용신안은 12개월, 상표·디자인은 6개월 이내
※ 미국특허상표청의 선출원을 기초로 우리나라에 우선권주장출원 시, 선출원이 미공개상태이면, 우선일로부터 16개월 이내에 미국특허상표청에 [전자적교환허가서(PTO/SB/39)]를 제출하거나 우리나라에 우선권 증명서류를 제출하여야 합니다.
6. 본 출원사실을 외부에 표시하고자 하는 경우에는 아래와 같이 하여야 하며, 이를 위반할 경우 관련법령에 따라 처벌을 받을 수 있습니다.
※ 특허출원 10-2010-0000000, 상표등록출원 40-2010-0000000
7. 종업원이 직무수행과정에서 개발한 발명을 사용자(기업)가 명확하게 승계하지 않은 경우, 특허법 제62조에 따라 심사단계에서 특허거절결정되거나 특허법 제133조에 따라 등록이후에 특허무효사유가 될 수 있습니다.
8. 기타 심사 절차에 관한 사항은 동봉된 안내서를 참조하시기 바랍니다.



▶ 온라인제출결과안내

- 온라인 제출 결과 아래와 같이 접수되었습니다.
- **제출결과조회**를 통해 접수하신 서류에 대한 접수결과 및 방식심사 진행상태를 조회하실 수 있습니다.
- 수수료는 서식작성기에서 입력한 수수료 금액이며, 제출결과조회 화면에서 특허청 전산시스템에서 계산한 수수료를 조회할 수 있습니다.
- 특정 시점에 접수건이 많을 경우 간혹 은행, 지로사이트 등에서 납부대상건이 조회가 안되는 경우가 발생할 수 있습니다. 이런 경우 특허로사이트에서 직접 납부하시거나 잠시 후(최대 1시간 이내) 다시 조회를 하면 정상적으로 조회가 됩니다.

접수일시: 2019년 12월 31일 14시 43분

접수번호(납부자번호)	사건번호 권리	서류명	명칭	수수료(원)	접수결과
1-1-2019-1361307-16 참조번호 : NPF32852	10-2019-0179512 특허출원	[특허출원]특허출원서	편광과 포커싱 제어가 가능한 반파장판 메타표면, 메타렌즈 및 이들의 제조방법	490,500	접수완료

[제출결과조회](#) [특허보관함](#)

납부 서비스	신용카드 등 온라인 납부		인터넷 지로
납부 방법	* 특허청 사이트에서 직접 납부 (계좌이체의 경우 공인인증서 필요)		* 인터넷 지로 사이트 회원 가입후 납부 (공인인증서 필요) * 회원가입 시에는 특허청에 신고된 주민등록번호(법인인 법인번호)로 회원 가입을 하셔야 합니다.
납부 수단	증명서료(개인/법인) 특허수수료(개인) 신용카드/휴대폰/계좌이체	특허수수료(법인) 계좌이체 (단, 중소기업은 신용카드 가능)	계좌이체(모든 수수료)
이용 수수료	무	유(납부자 부담, 단, 중소기업이 신용카드로 납부 할 경우 신용카드 결제 수수료는 없음)	무
도움말	상세보기	상세보기	상세보기
특징	다건 일괄 납부 가능		건별 납부
바로가기	온라인납부 바로가기		인터넷지로 바로가기

- 이용방법안내**
1. 제출하신 출원서류는 압축파일(ZIP)의 손상, 전자서명 오류, 바이러스 감염 등 “물리적 오류”와 “명백한 반려사유”에 해당할 경우 접수가 반려될 수 있습니다.
 2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 동봉된 납입영수증에 성명, 납부자번호 등을 기재하시어 가까운 우체국 또는 은행에 납부하여야 합니다.
※납부자번호 : 0131(기관코드) + 접수번호
 3. 「특허로」 고객센터에서 알림서비스를 신청하시면 담당 심사관 지정 알림, 마감기한 알림 등 각종 민원처리 사항을 이메일과 휴대폰(SMS)로 받아 보실 수 있습니다.
 4. 기타 문의사항이 있으시면 특허고객상담센터(1544-8080)에 문의하시거나 특허청 홈페이지(www.kipo.go.kr)를 참고하시기 바랍니다.

- 이용방법안내**
- 수수료 납부시 유의사항
귀하의 납부마감일을 다시 한번 확인하시기 바랍니다.

【서지사항】

【서류명】	특허출원서
【참조번호】	NPF32852
【출원구분】	특허출원
【출원인】	
【명칭】	광운대학교 산학협력단
【특허고객번호】	2-2004-010265-4
【대리인】	
【명칭】	특허법인이지
【대리인번호】	9-2008-100041-4
【지정된변리사】	박정식
【발명의 국문명칭】	편광과 포커싱 제어가 가능한 반파장판 메타표면, 메타렌즈 및 이들의 제조방법
【발명의 영문명칭】	Metasurfaces for realizing polarization rotation and focusing
【발명자】	
【성명】	이상신
【특허고객번호】	4-2006-004541-9
【발명자】	
【성명】	고송
【성명의 영문표기】	Song Gao
【주소】	서울특별시 노원구 광운로 20, 비마관 607호

【발명자】**【성명】** 박철순**【성명의 영문표기】** Chul-Soon Park**【주민등록번호】** 900122-1XXXXXX**【우편번호】** 01891**【주소】** 서울특별시 노원구 광운로15길 14, EXIT0 202호**【출원언어】** 국어**【심사청구】** 청구**【공지에외적용대상증명서류의 내용】****【공개형태】** 전문학술지 논문 게재**【공개일자】** 2019.02.07**【이 발명을 지원한 국가연구개발사업】****【과제고유번호】** 2018R1A6A1A03025242**【부처명】** 교육부**【연구관리 전문기관】** 한국연구재단**【연구사업명】** 이공분야기초연구사업 - 기초연구기반구축사업 - 대학중점
연구소지원사업 - 중점연구소지원(이공계분야)**【연구과제명】** 나노 소자 응용 연구소**【기여율】** 1/1**【주관기관】** 광운대학교 산학협력단**【연구기간】** 2018.06.01 ~ 2027.02.28

【취지】 위와 같이 특허청장에게 제출합니다.

대리인 특허법인이지 (서명 또는 인)

【수수료】

【출원료】 0 면 46,000 원

【가산출원료】 60 면 0 원

【우선권주장료】 0 건 0 원

【심사청구료】 18 항 935,000 원

【합계】 981,000 원

【감면사유】 전담조직(50%감면)[1]

【감면후 수수료】 490,500 원

【첨부서류】 1. 공지에외적용대상(신규성상실의예외, 출원시의특례)규정을 적용받기 위한 증명서류_1통 2. 기타첨부서류[위임장]_1통

1 : 공지에외적용대상(신규성상실의예외, 출원시의특례)규정을 적용받기 위한 증명서류

[PDF 파일 첨부](#)

2 : 기타첨부서류

[PDF 파일 첨부](#)

【서류명】 위임장

【수임자】

【성명】 특허법인이지

【대리인번호】 9-2008-100041-4

【지정된 변리사】 이진호

【주소】 서울특별시 금천구 가산디지털1로 205, kcc 웰츠밸리 302~303호 (가산동)

【위임사항】

1. 특허출원에 관한 모든 절차
2. 특허권 등록에 관한 모든 절차
3. 심판에 관한 모든 절차
4. 특허출원의 변경, 포기, 취하
5. 특허권의 존속기간의 연장등록출원의 취하
6. 청구의 취하
7. 신청의 취하
8. 특허법 제55조제1항의 규정에 의한 우선권주장이나 그 취하
9. 복대리인의 선임
10. 특허법 제132조의3의 규정에 의한 심판청구
11. 거절결정불복심판에 관한 모든 절차
12. 기간연장(지정, 법정)에 관한 모든 절차
13. 출원인정보변경에 관한 모든 절차
14. 특허출원 취하에 관한 모든 절차

【사건의 표시】

【발명의 명칭】 편광과 포커싱 제어가 가능한 반파장판 메타표면, 메타렌즈 및 이들의 제조방법

【위임자】

【성명】 광운대학교 산학협력단

【특허고객번호】 2-2004-010265-4

【사건과의 관계】 출원인

【위임일자】 2019 년 12월 27일

위와 같이 특허청장(특허심판원장, 심판장)에게 제출합니다.


위임자 광운대학교 산학협력단





Cite this: *Nanoscale*, 2019, **11**, 4083

All-dielectric metasurfaces for simultaneously realizing polarization rotation and wavefront shaping of visible light†

Song Gao, ^a Chul-Soon Park, ^a Sang-Shin Lee ^{*a} and Duk-Yong Choi ^{b,c}

All-dielectric metasurfaces have shown unprecedented abilities to control light polarization and phase, yet most previous relevant studies have been mainly limited to cross-polarized schemes. This paper presents dielectric metasurfaces that incorporate distinct half-waveplate-like hydrogenated amorphous silicon nanoposts and are shown to manipulate the wavefront of transmitted visible light exhibiting controllable linear polarization angles. An anomalous beam deflector is designed, and high performances including an absolute deflection efficiency of 82%, a polarization conversion efficiency of 96%, and an extinction ratio of 37 dB are first demonstrated in the cross-polarized scheme. Furthermore, the anomalously deflected light could hold a high degree of linear polarization (>0.96), which can be continuously rotated by varying the incident polarization angle. Based on this principle, we fabricate a metalens and experimentally observe the light focusing phenomenon at the location designed for the cross-polarized light. Moreover, the rotation of the linear polarization angle corresponding to the output focused beam spot is successfully validated by tailoring the incident polarization angle. The developed metalens can therefore be treated as equivalent to the combination of a half-waveplate and focusing lens. The proposed ultra-thin dielectric metasurfaces, which do not require the alignment of multiple elements, could be used to facilitate the development of ultra-compact photonics systems.

Received 7th January 2019,
Accepted 6th February 2019

DOI: 10.1039/c9nr00187e

rsc.li/nanoscale

Introduction

Metasurfaces, which are prominent planar counterparts of three-dimensional metamaterials, have garnered significant interest because of their extraordinary ability to manipulate the properties of electromagnetic waves at subwavelength scales. The fundamental elements that constitute an optical metasurface include a subwavelength-spaced nanostructure (meta-atom), which can interact with and scatter the incoming light, imparting a phase delay that is managed according to the size, shape, and orientation of the structure. Along an interface between two media, a set of meticulously designed deep-subwavelength metallic nanoantennas that were spatially allocated to induce a linearly varying phase delay (a constant phase gradient) resulted in anomalous light bending, a phenomenon that was successfully validated so that the classi-

cal Snell's law could be rewritten.¹ Thereafter, phase-gradient metasurfaces were extensively explored to manipulate the wavefront of light propagating in free space in studies relating to light focusing,^{2,3} hologram generation,^{4,5} and vortex beams,^{6,7} among others. The idea that meta-atoms can mediate abrupt phase changes has also been applied to optical waveguides in recent years, with the intention of fulfilling diverse and intriguing functions such as optical routing and mode conversion.^{8,9} In addition to the simple modulation of common light properties including the phase, amplitude and polarization,¹⁰ metasurfaces can also be smartly devised to tailor the resonance dispersion¹¹ and the near-field electromagnetic wave distributions,^{12,13} which can be respectively beneficial for realizing flat achromatic lenses and sensing applications.

The polarization state is critically important in many classical optics applications and has lately been recognized to play a significant role in quantum optics because quantum bits of data (qubits) can be stored in the polarization of individual photons. With the advent of metasurfaces, polarization can also serve as a vital tool for developing innovative nanophotonic devices. Recent years have witnessed the development of various bifunctional metasurfaces where two similar or distinct functionalities, such as beam steering,^{14–16} light focusing,^{17–19} hologram generation,^{20,21} and vortex beam generation,^{22,23} can be achieved when incident polarization is

^aDepartment of Electronic Engineering, Kwangwoon University, 20 Kwangwoon-ro, Nowon-gu, Seoul 01897, Republic of Korea. E-mail: slee@kw.ac.kr

^bLaser Physics Centre, Research School of Physics and Engineering, Australian National University, Canberra, ACT 2601, Australia

^cCollege of Information Science and Technology, Jinan University, Guangzhou, Guangdong, 510632, China

† Electronic supplementary information (ESI) available: Details of the calculated effective indices and corresponding phase shifts. See DOI: 10.1039/c9nr00187e

switched from one specific state to its orthogonal counterpart. Furthermore, much recent research has been devoted to realizing metasurface-based ultra-thin polarimeters for the purpose of measuring, analyzing, and imaging light polarization.^{24–29} By dividing the metasurface into several sectors, with each sector operating for a designated polarization state, different polarization components of the impinging light can be determined. In all the applications mentioned above, the polarization states of the input and output light remained the same for each functionality.

Optical waveplates are commonly used to rotate or convert light polarization in practical optical systems. With conventional waveplates made of birefringent materials, the required phase delay between the two orthogonal polarizations is attained through phase retardation accumulated over a propagation distance, which is much longer than the wavelength. Being well known for their full control over the phase and polarization, metasurfaces are undoubtedly capable of enabling significant polarization conversion with a drastically diminished thickness,^{30,31} and have high potential for integrating multiple optical elements such as the waveplate, lens, and polarization beam splitter, which would advance the development of ultra-compact polarization optics. Notably, a majority of metasurfaces are reported to manipulate the wavefront of a light output whose polarization is orthogonal to that of the incident beam (cross-polarized), either by taking advantage of the geometric phase to manipulate the circularly polarized light³² or the resonance-induced phase shift to control the linearly polarized light.^{33–35} Geometric metasurfaces have been vastly explored as they hold an intrinsic ability to manipulate the wavefront of the cross-polarized light in a broadband.³² Although the poor polarization conversion found in connection with a monolayer plasmonic metasurface can be addressed by resorting to a gap-plasmon configuration,^{36,37} the operation of the metasurface remains inconveniently limited to the reflection mode. For a transmissive geometric metasurface manipulating cross-polarized light, the conversion efficiency can be remarkably elevated by taking advantage of all-dielectric materials.^{2,4,38–41} However, because the metasurface's manipulation capability is solely based on the spatially variant orientations of identical meta-atoms, the resulting phase control is valid only for incident light with circular polarization,^{2,4,38} and only the spatial modulation of polarization is allowed for linearly polarized incident light.^{39,40} Even though the phase control of such a metasurface can be effective in a broad spectral band, the high polarization conversion efficiency can be rarely maintained over the broadband.² Apart from geometric metasurfaces, an ultra-thin hybrid bilayer plasmonic metasurface has also been devised to enable anomalous beam transmission with an enhanced linear polarization conversion efficiency at wavelengths near 700 nm in the visible regime.⁴² The optimal conversion efficiency of the metasurface was approximately 36%, a relatively low value that may have been caused by the metal-induced dissipation loss. In most of the abovementioned studies, the desired wavefront manipulation was restricted to

cross-polarized light, a severe limitation inconsistent with the original objective of integrating multiple devices. To enable both arbitrary polarization and phase control, several metasurface schemes have been proposed using paired nanoantennas,^{43,44} combinations of geometric and propagation phases,^{45–48} and a Fourier holography technique.⁴⁹ Another straightforward approach resorts to multiple meta-atoms with various dimensions; however, most of the relevant studies were demonstrated in the infrared regime and all were restricted to gap-plasmon metasurfaces.^{33–35}

In this work, we propose and demonstrate all-dielectric metasurfaces for visible light wavefront shaping with a tailorable linear polarization state. Eight nanoposts made of hydrogenated amorphous silicon (a-Si:H) constitute the elemental meta-atoms that impart various phase delays to the incident light, playing the role of also rotating the incident light polarization angle, considering that each nanopost behaves like a half waveplate (HWP). First, the feasibility of the proposed method is verified by conceiving a beam deflector design and systematically investigating its efficiency and polarization state. We then fabricated a metasurface lens (metalens) that successfully focuses a transmitted cross-polarized beam. The linear polarization angle of the focused spot can be tuned by altering the incident polarization angle, and the monolayer metalens is considered tantamount to the combination of a conventional HWP and focusing lens (Fig. 1), which are bulky and usually need to be precisely aligned in conventional optical systems.

Results and discussion

Fig. 2a shows the configuration of the unit cell of the proposed dielectric metasurface, consisting of a rectangular a-Si:H nano-

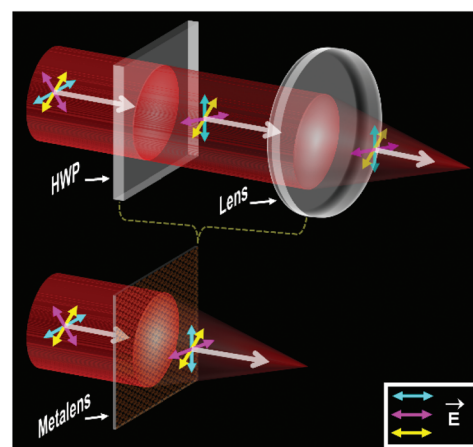


Fig. 1 Schematics of the conventional half waveplate (HWP) and lens that are usually used for polarization rotation and light focusing in optical systems (top) and a monolayer dielectric metalens that can simultaneously rotate the polarization and focus the light (bottom). The arrows in cyan, magenta and yellow color only represent the orientation of the electric field.

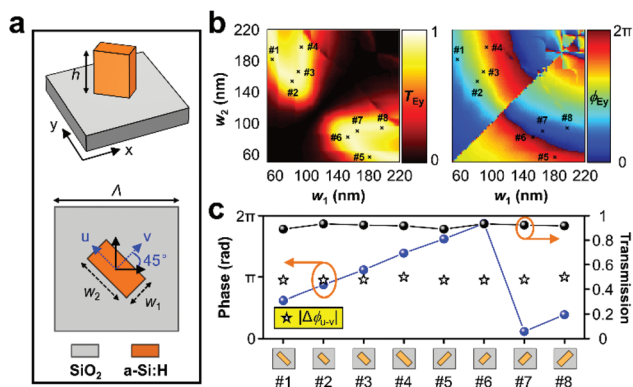


Fig. 2 (a) Schematic of an elemental unit cell of the proposed dielectric metasurface. (b) For normally x -polarized incident light, the calculated transmission efficiency and transmission phase for the y -polarized light at the designed wavelength $\lambda = 690$ nm, as a function of the nanopost dimensions (w_1 and w_2). The selected nanoposts are marked with crosses. (c) Derived transmission (black dots), phase (blue dots), and phase difference (pentagrams) between the u - and v -axes of the eight nanoposts.

post formed on an SiO_2 substrate. The adoption of a-Si:H offers the following advantages: unlike crystalline silicon, a-Si:H can be easily grown on a foreign substrate at a low temperature,^{49–52} and a-Si:H exhibits a high refractive index and a low extinction coefficient ($n \approx 4.077 + 0.005i$) at the designed wavelength of 690 nm, guaranteeing efficient light manipulation at a subwavelength scale. However, when it comes to the operation at short visible wavelengths, other dielectric materials, including crystalline silicon,^{53–56} titanium dioxide,² silicon nitride,⁵⁷ and gallium nitride,³⁸ are preferable to a-Si:H , which is susceptible to high absorption. Notably, except for crystalline silicon, the remaining materials have relatively lower indices which mostly restrict the meta-atoms to have near-wavelength structural heights to fulfill the entire 2π phase control. For manufacturing such devices, additional process techniques such as atomic layer deposition are usually required.²

Here, the unit cell's pitch was $\Lambda = 240$ nm, and the a-Si:H nanopost had a thickness of $h = 320$ nm, which was approximately 0.46λ . The nanopost was rotated by 45° with respect to the unit cell's x -axis, so that incident x - or y -polarized light could be decomposed into two orthogonal components along the u - and v -axes, representing the long and short axes of the nanopost, respectively. Supposing that a unity transmission occurred with a phase difference of $|\Delta\phi_{u-v}| = \pi$ between the u - and v -axes, incident x -polarized light could be completely converted to y -polarized light. Simulations were conducted to determine the optimal dimensions of the structures using a finite-difference time-domain method-based tool (FDTD Solutions, Lumerical, Canada). The x -polarized light was set to impinge normally upon the proposed unit cell, and the y -polarized component was examined in terms of the transmission efficiency (T_{Ey}) and phase shift (ϕ_{Ey}) by varying the dimensions (w_1 , w_2) of the nanopost, as delineated in Fig. 2(b).

With appropriate adjustments of the nanopost dimensions, the phase shift of the transmitted y -polarized light could be tuned from 0 to 2π with no significant loss, which is crucial to wavefront shaping in a cross-polarized scheme. For our demonstration, eight nanoposts (marked with crosses in Fig. 2(b)) were selected to provide a full 2π phase control. As shown in Fig. 2(c), with normally incident x -polarized light at the designed wavelength $\lambda = 690$ nm, the nanoposts featured nearly invariant transmission efficiencies (black dots) surpassing 89% and provided incremental phase shifts of $\pi/4$ (blue dots), both of which are related to the y -polarized light. For each of the selected nanoposts, the phase difference between its long and short axes was also calculated. As plotted in Fig. 2(c), the estimated phase differences (pentagrams) closely mimicked π with discrepancies within 0.05π radians, indicating that each nanopost could be treated as a near-perfect HWP at the designed wavelength, with the long (u -) and short (v -) axes of the nanopost corresponding to the slow and fast axes of the waveplate, respectively.

The dielectric nanoposts could be understood as truncated waveguides allowing the propagation of certain modes: the nanopost widths could be varied to modulate the effective index of the modes, leading to different phase shifts in the light scattered at the end of the waveguide. Because each nanopost's short and long dimensions differed, all selected nanoposts were assumed to support two effective indices ($n_{\text{eff},u}$ and $n_{\text{eff},v}$) associated with distinct phase shifts. For each of the selected nanoposts, the effective indices of the fundamental modes were extracted from the simulations, and their corresponding phase shifts were calculated following the relationship $\phi = \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff}} h$ as illustrated in Fig. S1 of the ESI.† For each nanopost, the difference between the two effective indices led to a phase difference in the vicinity of π , which is consistent with the simulation results shown in Fig. 2(c), while for two adjacent nanoposts, the differences of their effective indices along the u - and v -axes ($\Delta n_{\text{eff},u}$ and $\Delta n_{\text{eff},v}$) were nearly the same and both led to a near constant quarter- π phase shift.

To validate the proposed dielectric metasurface's bifunctionality in polarization conversion and wavefront shaping, an anomalous beam deflector was designed by integrating the eight nanoposts to form a supercell. A linearly increasing phase shift in intervals of $\pi/4$ was imparted across the supercell, establishing a constant phase gradient. Upon normal illumination of a plane wave polarized parallel to the x -axis, the x - and y -components of the electric field (E_x and E_y) were calculated, as illustrated in Fig. 3(a) and (b), respectively. The transmission profile showed that E_y was substantially stronger than E_x , indicating the conversion of the linear polarization. In addition, the field profile in Fig. 3(b) indicates a planar wavefront pertaining to an oblique propagation angle, suggesting anomalous refraction. The angle of anomalous refraction was estimated to be $\theta_t = 20.9^\circ$, close to the calculated angle of 21.1° as per the generalized Snell's law.¹ According to the equivalence between the generalized Snell's law and the modified diffraction equation,⁵⁸ the anomalously transmitted beam

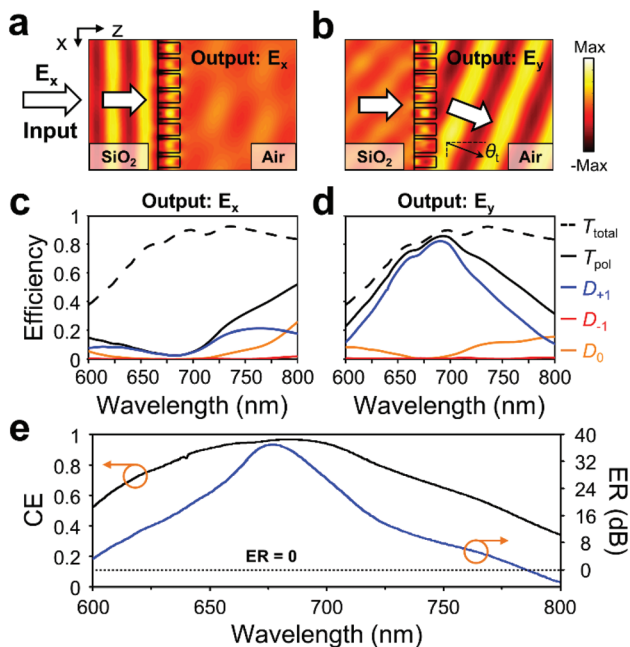


Fig. 3 Simulation results under normal incidence with polarization parallel to the x -axis. The simulated xz -plane electric field distribution relating to the (a) E_x and (b) E_y components at the wavelength of 690 nm. The polarized transmission and zeroth, positive, and negative first diffraction spectra relating to the (c) E_x and (d) E_y components. The dashed line indicates the total transmission of the dielectric metasurface. (e) Calculated conversion efficiency (CE) and extinction ratio (ER).

matched the light wave in the first diffraction order (the positive first order in our case). Efficiencies for the polarized transmission (T_{pol}), positive first diffraction order (D_{+1}), negative first diffraction order (D_{-1}), and zeroth diffraction order (D_0) were calculated in the spectral band ranging from 600 nm to 800 nm for the E_x and E_y components, as shown in Fig. 3(c) and (d), respectively. The total transmission efficiency (T_{total}) of the proposed dielectric metasurface is shown with the dashed line in the figure for comparison. At the designed wavelength of $\lambda = 690$ nm, the total efficiency (T_{total}), E_y -polarized transmission ($T_{E_y\text{pol}}$) and absolute diffraction of the E_y -polarized positive first diffraction (D_{E_y+1}) were 88.6%, 85.5%, and 82.2%, respectively. The non-unity total transmission efficiency is accounted for by silicon absorption (5.4%) and the inevitable reflection (6%) from the nanoposts as these non-identical elements exhibit different reflection coefficients.¹⁷ The performance of the beam deflector was further analyzed in terms of the conversion efficiency (CE) and extinction ratio (ER).⁴² The CE is defined as the ratio of the anomalous refracted light power (D_{+1}) to the incident light power, and the ER is given as $\text{ER} = 10 \log(D_{E_y+1}/D_{E_x,0})$ in dB, where $D_{E_x,0}$ denotes the zeroth order diffraction relating to the E_x component. As plotted in Fig. 3(e), the maximum CE and ER were 96.5% and 37 dB, respectively, exceeding those of a previously reported hybrid bilayer plasmonic counterpart in a similar spectral band.⁴² Although the hybrid bilayer metasurface featured an ultra-thin thickness ($\sim \lambda/6$), the thickness of our dielectric

metasurface was considerably smaller *vis-à-vis* the operation wavelength ($\sim \lambda/2$). In addition, the operation bandwidth of the proposed dielectric metasurface with over 80% polarization conversion efficiency is near 100 nm, which is comparable to that of the geometric metasurface incorporating identical meta-atoms that are made of titanium dioxide nanofins.²

Unlike the previous dielectric metasurfaces, which are capable of manipulating cross-polarized light only with respect to a designated incident polarization,^{2,4,38} the proposed metasurface could adjust the polarization of the transmitted light by altering the angle of incident polarization (Fig. 4(a)). Linearly polarized incident light can be described using the Jones vector $J_{\text{in}} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_{\text{in}} \\ \sin \varphi_{\text{in}} \end{bmatrix}$, where φ_{in} stands for the incident polarization angle with respect to the x -axis. Assuming that each nanopost in the designed metasurface was an ideal HWP that could act on the incident Jones vector, the nanoposts could be represented in the form of a Jones matrix $M = \begin{bmatrix} \cos 2\alpha & \sin 2\alpha \\ \sin 2\alpha & -\cos 2\alpha \end{bmatrix}$, where α represents the angle between the fast axis of the waveplate and the x -axis. For the proposed dielectric metasurface with $\alpha = 45^\circ$, the linear polarization of the output transmitted light could then be expressed as

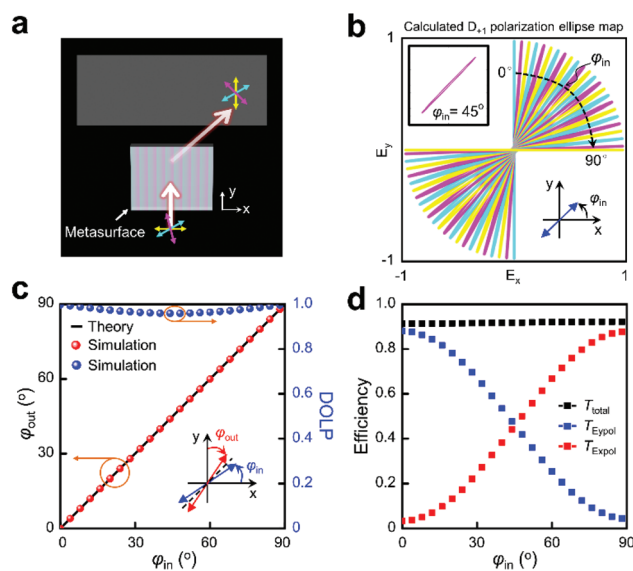
$$J_{\text{out}} = \begin{bmatrix} \cos 2\alpha & \sin 2\alpha \\ \sin 2\alpha & -\cos 2\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi_{\text{in}} \\ \sin \varphi_{\text{in}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_{\text{in}}\right) \\ \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_{\text{in}}\right) \end{bmatrix},$$


Fig. 4 (a) Illustration of a beam deflector, the output polarization state of which can be tuned by rotating the incident polarization. (b) Polarization ellipse map of the anomalously transmitted light calculated as a function of the incident polarization angle φ_{in} for the designed wavelength $\lambda = 690$ nm. The inset shows the result at $\varphi_{\text{in}} = 45^\circ$. (c) DOLP and primary polarization angle of the output light calculated as a function of the incident polarization angle φ_{in} at a wavelength of 690 nm. (d) Total transmission and polarized transmission with the incident polarization angle φ_{in} at the wavelength 690 nm.

signifying that the input and output electric fields would have the same angle with respect to the waveplate's fast axis. For the beam deflector designed at $\lambda = 690$ nm, the polarization state pertaining to the dominant transmitted light, preserved in the first diffraction order, was analyzed based on a polarization ellipse map, with incident polarization angles being varied from $\varphi_{\text{in}} = 0^\circ$ to 90° , as shown in Fig. 4(b). For $\varphi_{\text{in}} = 0^\circ$ and 90° , the output light was linearly polarized along the y - and x -axes, respectively, whereas the output exhibited elliptical polarizations with the intermediate incident polarization angles (inset in Fig. 4(b) shows the most elliptical case at $\varphi_{\text{in}} = 45^\circ$). The corresponding degree of linear polarization (DOLP) and primary polarization angle are calculated as shown in Fig. 4(c). The DOLP, indicative of the quality of linear polarization, is expressed as $\text{DOLP} = 1 - 2\gamma/(1 + \gamma^2)$, where γ represents the ratio of the lengths of the major to minor axes associated with the ellipse, and $\text{DOLP} = 1$ indicated a perfect linear polarization. The simulated DOLP was found to exceed 0.96, signifying a highly linear polarization. The above analysis reveals that an ideal HWP is established when the angular discrepancy between the output and input polarizations is twice the angle between the input polarization and the axis of the waveplate. Therefore, φ_{out} equals φ_{in} , as shown in the inset of Fig. 4(c). The simulated primary polarization angle matched the theoretical result. As the incident polarization was scanned from 0° to 90° , the two decomposed polarized transmissions of $T_{E_y, \text{pol}}$ and $T_{E_x, \text{pol}}$, respectively, decreased and increased as expected, while the total transmission remained quite stable (Fig. 4(d)). Apart from the polarization control, the transmitted beam wavefronts relating to the x - and y -polarization components were also investigated to show the wavefront control, as can be seen in Fig. S2 of the ESI.† It should be noted that for the proposed metasurface, the wavefront manipulation in the cross-polarized scheme is only valid when the incident light is x - or y -polarized. To enable constant wavefront manipulation only in the cross-polarized scheme for the incident light with an arbitrary linear polarization angle, the device is required to exhibit different fast axes corresponding to different polarization angles.

Because the HWP and focusing lens are indispensable in a variety of optical systems, we herein propose a monolayer dielectric metalens as a viable ultra-thin substitute for these two bulky components. The phase distribution for the metalens is given by $\phi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} (f_0 - \sqrt{x^2 + y^2 + f_0^2})$, where f_0 is the focal length and (x, y) represents the coordinates corresponding to the center of each unit cell affiliated with the metalens with respect to the global origin thereof $(x_0, y_0) = (0, 0)$. Fig. 5(a) shows the geometry of the designed metalens, the diameter and focal length of which were both chosen to be the same, at $60 \mu\text{m}$ each. For a normally incident x -polarized light, the simulated electric field intensity profiles near the focal region in both the xz - and xy -plane are shown in Fig. 5(b). The y -polarized light was solely focused at the expected position of $z = 60 \mu\text{m}$. For the designed wavelength of 690 nm, the metalens had a numerical aperture (NA) of ~ 0.45 and a longitudi-

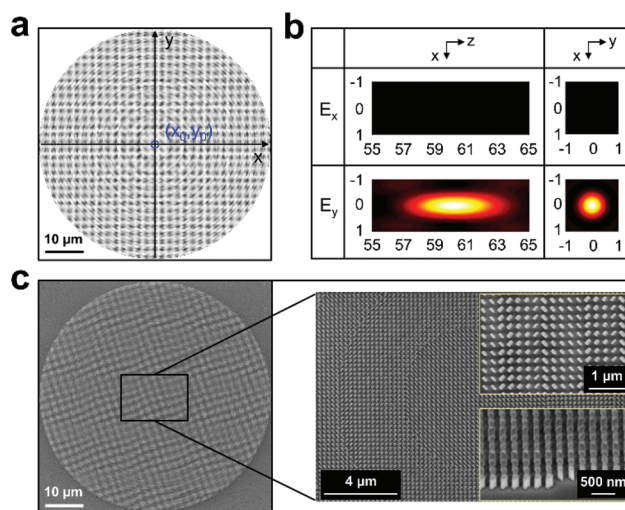


Fig. 5 (a) Geometry of the designed metalens. (b) For the designed wavelength 690 nm, the simulated electric field intensity relating to the E_x and E_y components in the xz -plane and xy -plane near and at the focal plane. (c) Scanning electron microscopy images of the metalens for illustrating the distribution of the nanoposts.

nal focal length of $4.6 \mu\text{m}$ ($\sim 6.67\lambda$) in the xz -plane. In the focal plane (xy -plane), the focused beam spot exhibited a full-width at half-maximum (FWHM) of 720 nm, which was smaller than the diffraction limited spot size of ~ 770 nm ($\sim \lambda/2\text{NA}$).

The fabrication of the designed metalens was initiated by depositing a 320 nm thick $a\text{-Si:H}$ film on a glass substrate *via* plasma-enhanced chemical vapor deposition (Oxford, Plasmalab 100). The film was then spin-coated with an electron beam resist (ZEP520A), forming the metalens pattern with an electron beam writer (EBL, Raith150). Following electron beam evaporation of a 60 nm-thick Al layer and a subsequent lift-off process, the metalens pattern was finally transferred to the $a\text{-Si:H}$ film *via* fluorine-based inductively coupled plasma-reactive ion etching (Oxford, Plasmalab System 100). Scanning electron microscopy images of the fabricated metalens for illustrating the distribution of the nanoposts are included in Fig. 5(c). The prepared sample was then characterized using the test setup illustrated in Fig. 6(a). A supercontinuum laser (SuperK compact, NKT Photonics) was used as an illuminator to emit broadband unpolarized light. Prior to reaching the sample, the light was converted to become linearly polarized over a narrow spectral band *via* a Glan-Thompson linear polarizer (GTH10M-A) and a narrow band-pass filter (FB690-10, with a center wavelength of 690 nm and a FWHM of 10 nm). The light transmitted from the metalens was collected *via* an objective lens that is paired with a tube lens, leading to the intensity distribution image (xy -plane) on a camera. An additional linear polarizer (analyzer) was incorporated so that the intensity patterns of different polarization components could be monitored.

For normally incident x -polarized light, a series of y -polarized intensity patterns were first captured by translating the imaging system along the z -axis in increments of $2 \mu\text{m}$. The

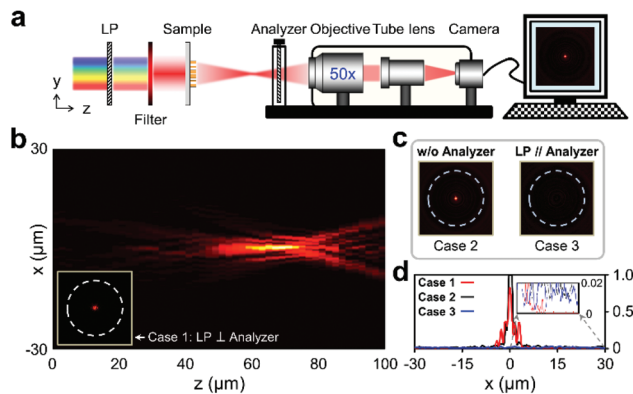


Fig. 6 (a) Measurement setup for characterizing the metalens. (b) For x -polarized incident light, the y -polarized light intensity in the xz -plane extracted from the measurement. The inset shows the light intensity pattern at $z = 68 \mu\text{m}$ in the xy -plane (case 1). (c) Focus spot patterns observed in the absence of the analyzer (case 2) and when the incident polarization is parallel to the analyzer (case 3, both are x -polarized). (d) One-dimensional intensity distribution across the spot center from $x = -30 \mu\text{m}$ to $30 \mu\text{m}$, for all three cases. The inset shows the magnified intensity distribution from $x = 0 \mu\text{m}$ to $30 \mu\text{m}$.

metalens was placed at the position $z = 0 \mu\text{m}$, by extracting the intensity along the transverse line connecting the centers of the recorded intensity patterns, and the cross-polarized light was unequivocally revealed to be focused starting from $z = 60 \mu\text{m}$ to $z = 75 \mu\text{m}$, as shown in Fig. 6(b). Because of the non-zero bandwidth of the filter and the chromatic dispersion nature of the metalens, the measured focus profile was slightly elongated compared with the simulation result shown in Fig. 5(b). The inset in the figure represents one of the cross-polarized intensity patterns (case 1) captured at $z = 68 \mu\text{m}$ within the focal region, where the light passing through the metalens was focused to a bright spot at the center of the focal plane (the dashed circle in the inset corresponds to the location of the metalens) and no light is visible outside the metalens region. The non-negligible light intensity encircling the focal spot in both the figure and its inset, was supposed to be caused by the analyzer. As shown in Fig. 6(c), in the absence of the analyzer (case 2), the focused light spot featured a much finer circular shape and a uniform intensity distribution. Remarkably, the relatively weak light intensity outside of the metalens area that was invisible in case 1 is believed to originate from the incident light (x -polarized) because the impinging light beam was larger in size than the metalens. This can be further confirmed in case 3 when the polarization of the analyzer was set along the x -direction, *i.e.*, the polarization of the analyzer was parallel to the incident polarization, where a similar intensity distribution was observed except for the disappeared focus spot that was expected to be y -polarized. Fig. 6(d) summarizes the above analysis by plotting the one-dimensional intensity distribution across the focus center for all three cases (results for cases 1 and 2 are normalized with respect to case 3). For the focused beam spots, the peak intensity ratio between the E_y and E_x

components reached a favorable level around 40. Overall, we could conclude that it was the y -polarized light that dominated the focused beam spot.

For the focused output light that is y -polarized, the intensity should be adjustable by rotating the analyzer according to Malus' law. Moreover, in contrast to the previous dielectric metalenses with fixed output polarizations,^{2,41} the linear polarization of the focal spot generated by the proposed metalens could be rotated by adjusting the incident polarization angle. Here, to prove that the output polarization is rotatable, the intensity of the focused spot was monitored by rotating the linear polarizer while the polarization of the analyzer was fixed to be parallel to the y -axis. Fig. 7(a) shows the measured peak intensity I_{analyzer} in the focal spot when the input polarizer was rotated from $\varphi_{\text{in}} = 0^\circ$ to 180° . Both the measurement and theory indicated that the intensity vanished in the co-polarized case for $\varphi_{\text{in}} = 90^\circ$ and peaked in the cross-polarized case for $\varphi_{\text{in}} = 0^\circ$ and 180° . The phenomenon contradicted Malus' law at first glance; however, it can be understood by considering that the incident polarization angle was altered by the metalens. Moreover, the linear polarization angle of the focused output light was quantitatively examined when the input polarization was varied from $\varphi_{\text{in}} = 0^\circ$ to 90° . Given a fixed incident polarization angle, by rotating the analyzer, the output polarization could be determined when the detected intensity reached the maximum. As one may find difficulty in identifying the maximum intensity point, we chose to find the point when the intensity completely vanished, where the polarization of the analyzer was supposed to be perpendicular to that of the output polarization. Based on the above analysis, the polarization angle ($\varphi_{\text{analyzer}}$) of the analyzer, as indicated on the right-hand side of Fig. 7(b), should be equal to φ_{in} . The measured polarization angle agreed reasonably with the theoretically calculated one as shown in Fig. 7(b). The above results

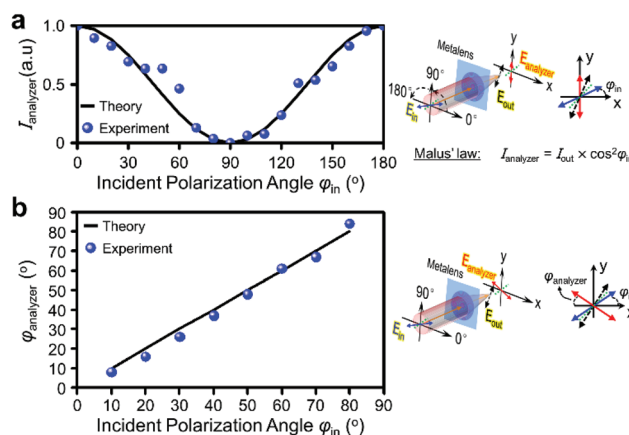


Fig. 7 (a) For the designed wavelength = 690 nm, the calculated and measured intensity in the center of the focused beam spot as a function of the incident polarization angle φ_{in} when the polarization of the analyzer is parallel to the y -axis. (b) For the designed wavelength = 690 nm, the calculated and measured polarization angle of the analyzer $\varphi_{\text{analyzer}}$ as a function of the incident polarization angle φ_{in} .

corroborate that the demonstrated monolayer metalens can function as both the HWP and the focusing lens. In addition to integrating multiple distinct optical devices, the simultaneous control of the light polarization and phase shift enabled by our proposed dielectric metasurface also offers strong potential for high-capacity information encryption.

Conclusions

In conclusion, all-dielectric metasurfaces were presented for concurrent realization of arbitrary linear polarization rotation and wavefront shaping in the long visible spectral band. We selected an a-Si:H material for the meta-atoms constituting the dielectric metasurface, considering its ease of fabrication, low loss, and high refractive index. Through rigorous simulations, eight nanoposts that were shown to behave like near-perfect HWPs were selected to provide full 2π phase tuning while maintaining a near-constant high transmission efficiency. We designed an anomalous beam deflector and verified its operation in the cross-polarized scheme, where it showed enhanced performances in terms of the anomalous deflection efficiency, polarization conversion efficiency, and extinction ratio. Unlike previous dielectric metasurfaces with static output polarization limited to the cross-polarization, the linear polarization of the anomalously deflected light from the proposed metasurface could be continuously rotated with a high DOLP, simply by changing the incident polarization. Based on these principles, we fabricated a metalens and experimentally observed excellent point focusing for cross-polarized transmitted light. Moreover, by tuning the input light polarization angle, the polarization of the focused spot was readily rotated. The developed metalens holds several advantages over conventional systems that combine the HWP and focusing lens, including ultra-thin thickness and no-need for alignment. The proposed metasurface could thus be considered to facilitate the development of ultimately miniaturized optical systems in the future.

Conflicts of interest

There are no conflicts to declare.

Acknowledgements

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grants funded by the Ministry of Science and ICT (No. 2016R1A2B2010170) and the Ministry of Education (No. 2018R1A6A1A03025242). The work was partly supported by the Australian Research Council Future Fellowship (FT110100853, Dr Duk-Yong Choi) and was performed in part at the ACT node of the Australian National Fabrication Facility. The authors are grateful to Dr Yue Sun and the National Computational Infrastructure at Australian National University for their contributions towards simulating the metalens. The

authors are also grateful to Mr Woo-Bin Lee for his contributions towards preparing the experimental setup.

References

- 1 N. Yu, P. Genevet, M. A. Kats, F. Aieta, J. P. Tetienne, F. Capasso and Z. Gaburro, *Science*, 2011, **334**, 333–337.
- 2 M. Khorasaninejad, W. T. Chen, R. C. Devlin, J. Oh, A. Y. Zhu and F. Capasso, *Science*, 2016, **352**, 1190–1194.
- 3 X. Li, L. Chen, Y. Li, X. Zhang, M. Pu, Z. Zhao, X. Ma, Y. Wang, M. Hong and X. Luo, *Sci. Adv.*, 2016, **2**, e1601102.
- 4 B. Wang, F. Dong, Q. T. Li, D. Yang, C. Sun, J. Chen, Z. Song, L. Xu, W. Chu, Y. F. Xiao, Q. Gong and Y. Li, *Nano Lett.*, 2016, **16**, 5235–5240.
- 5 L. Huang, S. Zhang and T. Zentgraf, *Nanophotonics*, 2018, **7**, 1169–1190.
- 6 R. C. Devlin, A. Ambrosio, N. A. Rubin, J. P. B. Mueller and F. Capasso, *Science*, 2017, **358**, 896–901.
- 7 M. I. Shalaev, J. Sun, A. Tsukernik, A. Pandey, K. Nikolskiy and N. M. Litchinitser, *Nano Lett.*, 2015, **15**, 6261–6266.
- 8 R. Guo, M. Decker, F. Setzpfandt, X. Gai, D. Y. Choi, R. Kiselev, A. Chipouline, I. Staude, T. Pertsch, D. N. Neshev and Y. S. Kivshar, *Sci. Adv.*, 2017, **3**, e1700007.
- 9 Z. Li, M. H. Kim, C. Wang, Z. Han, S. Shrestha, A. C. Overvig, M. Lu, A. Stein, A. M. Agarwal, M. Loncar and N. Yu, *Nat. Nanotechnol.*, 2017, **12**, 675.
- 10 H. H. Hsiao, C. H. Chu and D. P. Tsai, *Small Methods*, 2017, **1**, 1600064.
- 11 S. Wang, P. C. Wu, V. C. Su, Y. C. Lai, M. K. Chen, H. Y. Kuo, B. H. Chen, Y. H. Chen, T. T. Huang, J. H. Wang, R. M. Lin, C. H. Kuan, T. Li, Z. Wang, S. Zhu and D. P. Tsai, *Nat. Nanotechnol.*, 2018, **13**, 227–232.
- 12 P. C. Wu, C. Y. Liao, V. Savinov, T. L. Chung, W. T. Chen, Y. W. Huang, P. R. Wu, Y. H. Chen, A. Q. Liu, N. I. Zheludev and D. P. Tsai, *ACS Nano*, 2018, **12**, 1920–1927.
- 13 W. Tang, L. Wang, X. Chen, C. Liu, A. Yu and W. Lu, *Nanoscale*, 2016, **8**, 15196.
- 14 F. Ding, R. Deshpande and S. I. Bozhevolnyi, *Light: Sci. Appl.*, 2018, **7**, 17178.
- 15 S. Liu, T. J. Cui, A. Noor, Z. Tao, H. C. Zhang, G. D. Bai, Y. Yang and X. Y. Zhou, *Light: Sci. Appl.*, 2018, **7**, 18008.
- 16 H. Zhang, X. Zhang, Q. Xu, C. Tian, Q. Wang, Y. Xu, Y. Li, J. Gu, Z. Tian, C. Ouyang, X. Zhang, C. Hu, J. Han and W. Zhang, *Adv. Opt. Mater.*, 2018, **6**, 1700773.
- 17 E. Schonbrun, K. Seo and K. B. Crozier, *Nano Lett.*, 2011, **11**, 4299–4303.
- 18 S. Boroviks, R. A. Deshpande, N. A. Mortensen and S. I. Bozhevolnyi, *ACS Photonics*, 2018, **5**, 1648–1653.
- 19 C. Williams, Y. Montelongo and T. D. Wilkinson, *Adv. Opt. Mater.*, 2017, **5**, 1700811.
- 20 W. T. Chen, K. Y. Yang, C. M. Wang, Y. W. Huang, S. Sun, I. D. Chiang, C. Y. Liao, W. L. Hsu, H. T. Lin, S. Sun, L. Zhou, A. Q. Liu and D. P. Tsai, *Nano Lett.*, 2013, **14**, 225–230.

- 21 Y. Montelongo, J. O. Tenorigo-Pearl, W. I. Milne and T. D. Wilkinson, *Nano Lett.*, 2013, **14**, 294–298.
- 22 A. Arbabi, Y. Horie, M. Bagheri and A. Faraon, *Nat. Nanotechnol.*, 2015, **10**, 937–943.
- 23 F. Zhang, H. Yu, J. Fang, M. Zhang, S. Chen, J. Wang, A. He and J. Chen, *Opt. Express*, 2016, **24**, 6656–6664.
- 24 A. Pors, M. G. Nielsen and S. I. Bozhevolnyi, *Optica*, 2015, **2**, 716–723.
- 25 F. Ding, A. Pors, Y. Chen, V. A. Zenin and S. I. Bozhevolnyi, *ACS Photonics*, 2017, **4**, 943–949.
- 26 E. Arbabi, S. M. Kamali, A. Arbabi and A. Faraon, *ACS Photonics*, 2018, **5**, 3132–3140.
- 27 P. C. Wu, J. W. Chen, C. W. Yin, Y. C. Lai, T. L. Chung, C. Y. Liao, B. H. Chen, K. W. Lee, C. J. Chuang, C. M. Wang and D. P. Tsai, *ACS Photonics*, 2017, **5**, 2568–2573.
- 28 S. Wei, Z. Yang and M. Zhao, *Opt. Lett.*, 2017, **42**, 1580–1583.
- 29 F. Ding, Y. Chen and S. I. Bozhevolnyi, *Appl. Sci.*, 2018, **8**, 594.
- 30 Z. H. Jiang, L. Lin, D. Ma, S. Yun, D. H. Werner, Z. Liu and T. S. Mayer, *Sci. Rep.*, 2014, **4**, 7511.
- 31 S. Kruk, B. Hopkins, I. I. Kravchenko, A. Miroschnichenko, D. N. Neshev and Y. S. Kivshar, *APL Photonics*, 2016, **1**, 030801.
- 32 D. Wen, F. Yue, W. Liu, S. Chen and X. Chen, *Adv. Opt. Mater.*, 2018, **6**, 1800348.
- 33 Y. Yang, W. Wang, P. Moitra, I. I. Kravchenko, D. P. Briggs and J. Valentine, *Nano Lett.*, 2014, **14**, 1394–1399.
- 34 F. Ding, Z. Wang, S. He, V. M. Shalaev and A. V. Kildishev, *ACS Nano*, 2015, **9**, 4111–4119.
- 35 N. Zhou and J. Wang, *Sci. Rep.*, 2018, **8**, 8038.
- 36 G. Zheng, H. Mühlenbernd, M. Kenney, G. Li, T. Zentgraf and S. Zhang, *Nat. Nanotechnol.*, 2015, **10**, 308–312.
- 37 D. Wen, F. Yue, G. Li, G. Zheng, K. Chan, S. Chen, M. Chen, K. F. Li, P. W. H. Wong, K. W. Cheah, E. Y. B. Pun, S. Zhang and X. Chen, *Nat. Commun.*, 2015, **6**, 6241.
- 38 B. H. Chen, P. C. Wu, V. C. Su, Y. C. Lai, C. H. Chu, I. C. Lee, J. W. Chen, Y. H. Chen, Y. C. Lan, C. H. Kuan and D. P. Tsai, *Nano Lett.*, 2017, **17**, 6345–6352.
- 39 R. Zhao, L. Huang, C. Tang, J. Li, X. Li, Y. Wang and T. Zentgraf, *Adv. Opt. Mater.*, 2018, **6**, 1800490.
- 40 X. Zang, F. Dong, F. Yue, C. Zhang, L. Xu, Z. Song, M. Chen, P. Y. Chen, G. S. Buller, Y. Zhu, S. Zhuang, W. Chu, S. Zhang and X. Chen, *Adv. Mater.*, 2018, **30**, 1707499.
- 41 D. Lin, P. Fan, E. Hasman and M. L. Brongersma, *Science*, 2014, **345**, 298.
- 42 F. Qin, L. Ding, L. Zhang, F. Monticone, C. C. Chum, K. Deng, S. Mei, Y. Li, J. Teng, M. Hong, S. Zhang, A. Alù and C. W. Qiu, *Sci. Adv.*, 2016, **2**, e1501168.
- 43 P. C. Wu, W. Y. Tsai, W. T. Chen, Y. W. Huang, T. Y. Chen, J. W. Chen, C. Y. Liao, C. H. Chu, G. Sun and D. P. Tsai, *Nano Lett.*, 2017, **17**, 445–452.
- 44 Z. Liu, Z. Li, Z. Liu, H. Cheng, W. Liu, C. Tang, C. Gu, J. Li, H. T. Chen, S. Chen and J. Tian, *ACS Photonics*, 2017, **4**, 2061–2069.
- 45 J. P. B. Mueller, N. A. Rubin, R. C. Devlin, B. Groever and F. Capasso, *Phys. Rev. Lett.*, 2017, **118**, 113901.
- 46 L. Wu, J. Tao and G. Zheng, *Phys. Rev. B: Condens. Matter*, 2018, **97**, 245426.
- 47 B. Wang, F. Dong, H. Feng, D. Yang, Z. Song, L. Xu, W. Chu, Q. Gong and Y. Li, *ACS Photonics*, 2018, **5**, 1660–1664.
- 48 F. Zhang, M. Pu, J. Luo, H. Yu and X. Luo, *Opto-Electron. Eng.*, 2017, **44**, 319–325.
- 49 G. Yoon, D. Lee, K. T. Nam and J. Rho, *Sci. Rep.*, 2018, **8**, 9468.
- 50 C. S. Park, V. R. Shrestha, W. Yue, S. Gao, S. S. Lee, E. S. Kim and D. Y. Choi, *Sci. Rep.*, 2017, **7**, 2556.
- 51 G. Yoon, D. Lee, K. T. Nam and J. Rho, *ACS Nano*, 2018, **12**, 6421–6428.
- 52 N. Mahmood, I. Kim, M. Q. Mehmood, H. Jeong, A. Akbar, D. Lee, M. Saleem, M. Zubair, M. S. Anwar, F. A. Tahir and J. Rho, *Nanoscale*, 2018, **10**, 18323–18330.
- 53 Z. Zhou, J. Li, R. Su, B. Yao, H. Fang, K. Li, L. Zhou, J. Liu, D. Stellinga, C. P. Reardon, T. F. Krauss and X. Wang, *ACS Photonics*, 2017, **4**, 544–551.
- 54 D. Sell, J. Yang, S. Doshay, K. Zhang and J. A. Fan, *ACS Photonics*, 2016, **3**, 1919–1925.
- 55 H. Liang, Q. Lin, X. Xie, Q. Sun, Y. Wang, L. Zhou, L. Liu, X. Yu, J. Zhou, T. F. Krauss and J. Li, *Nano Lett.*, 2018, **18**, 4460–4466.
- 56 Z. Yin, F. Chen, L. Zhu, K. Guo, F. Shen, Q. Zhou and Z. Guo, *J. Mater. Chem. C*, 2018, **6**, 6354.
- 57 A. Zhan, S. Colburn, R. Trivedi, T. K. Fryett, C. M. Dodson and A. Majumdar, *ACS Photonics*, 2016, **3**, 209–214.
- 58 S. Gao, W. Yue, C. S. Park, S. S. Lee, E. S. Kim and D. Y. Choi, *ACS Photonics*, 2017, **4**, 322–328.

【발명의 설명】

【발명의 명칭】

편광과 포커싱 제어가 가능한 반파장판 메타표면, 메타렌즈 및 이들의 제조 방법{ Metasurfaces for realizing polarization rotation and focusing}

【기술분야】

【0001】 본 발명은 편광과 포커싱 제어가 가능한 반파장판 메타표면, 메타렌즈 및 이들의 제조방법에 관한 것으로서, 보다 구체적으로는 선형 편광 각도를 제어하여, 투과 가시광의 파면을 조작할 수 있는 편광과 포커싱 제어가 가능한 반파장판 메타표면, 메타렌즈 및 이들의 제조방법에 관한 것이다.

【발명의 배경이 되는 기술】

【0002】 현대 광학 기술의 급속한 발전에 따라 다양한 기능들이 집적되어 소형화되는 고성능, 초소형의 광학 시스템 구현에 대한 사회적, 기술적 요구가 늘어나고 있다.

【0003】 하지만, 기존에 주로 쓰이던 렌즈와 같은 광학 소자들은 크기가 크고 복잡한 구조로 되어 있어 소형 집적화에 대한 제약이 있었다.

【0004】 이러한 기존 광학 소자의 소형화에 대한 한계를 극복하기 위해 최근 국내외의 대학들 및 많은 연구 기관들에서 메타표면(metasurface)을 사용하는 나노 광학 디바이스에 대한 연구가 진행되고 있다.

【0005】 메타표면은 자연계에는 존재하지 않는 인공의 광학 평면을 구현하는 소자 기술을 뜻하며, 나노미터 급의 작은 크기의 금속, 유전체 물질의 조합을 통해 구현된다.

【0006】 메타표면에 존재하는 두 매체(media) 사이의 인터페이스(interface)를 따라, 선형으로 변하는 위상 지연(linearly varying phase delay) 즉, 일정한 위상 구배(constant phase gradient)가 유도된다.

【0007】 즉, 서브 파장(subwavelength) 대역에서 서로 공간을 두고 배치된 메타 나노 안테나 세트는 입사된 광의 변칙적인 굴절을 초래했으며, 이로 인해 고전적 스넬의 법칙(Snell's law)은 적용되기 어려웠다.

【0008】 이러한, 메타표면의 점진적 위상차(phase-gradient)를 형성할 수 있는 특성 때문에, 자유 공간에서 전파되는 파동을 조작할 수 있는 메타표면에 대한 연구가 진행되었으며, 집광, 홀로그램 생성 및 와류 빔(vortex beam)과 관련된 연구에서 메타표면의 역할이 연구되었다.

【0009】 이러한 최근 연구에서, 메타표면이 급격한 위상 변화를 중재할 수 있는 특성을 이용하여, 광학 경로 설정 및 모드 변환 기능을 가진 메타표면을 광도파관에 적용하였다.

【0010】 또한, 메타표면은 빛의 위상, 진폭 및 편광 방향과 같은 광의 특성을 조절할 수 있기 때문에, 기존의 광학 소자들을 대체하는 물질로써, 광학 디바이스를 획기적인 작은 크기로 구현할 수 있도록 만들었다.

【0011】 그리고, 메타표면을 광학 소자로써 채택함으로써, 기존 광학 디바이스의 성능은 그대로 유지시키면서 하나의 광학 디바이스에 다양한 기능을 가진 광학 모듈들을 집적할 수 있도록 하였다.

【0012】 메타표면은 메타물질로 구성되며, 이러한 메타물질은 빛의 파장보다 짧은 구조적 길이를 가지고, 이러한 구조들이 반복적으로 패턴을 형성하는 인공 합성 물질을 의미한다.

【0013】 예를 들어, '광학 메타물질'로도 알려져 있는 '포토닉 메타물질'은 가시광의 전파를 제어하는 기능을 가지고 있으며, 나노미터 수준의 구조적 길이를 가진다.

【0014】 이에 반해, 가시광의 파장은 수백 나노미터 수준이다.

【0015】 따라서, '메타표면'은 서브 파장 영역의 구조물들이 반복적으로 패턴을 형성하는 2차원 메타물질로 간주되며, 메타물질과 동일한 장점을 포함한다.

【0016】 게다가, 메타표면은 상술한 메타물질의 집약에 의해 메타물질보다 더 효율적으로 광을 투과시킨다.

【0017】 특히, 유전체만으로 형성된 메타표면은 편광과 위상을 제어하는 전례없는 능력을 보이고 있으나, 이러한 메타표면에 대한 이전 연구는 주로 교차 편광(cross-polarized) 기법에만 국한되어 있다.

【0018】 편광 상태는 양자 비트의 데이터(큐비트, qubits)를 개별 광자의 편광에 저장시킬 수 있다는 특성 때문에 기존 광학 응용 분야에서 매우

중요하였으며, 최근 양자 광학에 대한 관심이 급증함에 따라 편광 기능을 갖는 물질에 대한 연구 수요가 증가하고 있다.

【0019】 그럼에도 불구하고, 최근 몇 년 동안의 연구는 메타표면에 대한 입사광이 특정 상태에서 직각 위상으로 전환될 때, 빔 조향, 빛 포커싱, 홀로그램 생성 및 와류 빔 생성 (beam steering, light focusing, hologram generation, and vortex beam generation)과 같은 서로 유사한 기능들에 대한 연구만 진행되어왔다.

【0020】 또한, 최근의 연구는 빛 편광의 측정, 분석 및 이미징 (measuring, analyzing, and imaging light polarization)을 목적으로 메타표면 기반 초박형 편광계 (ultra-thin polarimeters)를 실현하는 데만 전념해왔다.

【0021】 더욱이, 종래의 메타표면은 임의의 편광 및 위상 제어를 가능하도록 하기 위해, 쌍을 이룬 나노 안테나 (paired nanoantennas), 기하 위상 및 전파 위상의 조합 (combinations of geometric and propagation phases) 및 푸리에 홀로그래피 기술 (Fourier holography technique)을 사용하는 것만을 제시하였을 뿐이다.

【0022】 이 외에 다차원의 다중 메타원자 (meta-atom)들을 이용하여 편광 및 위상 제어를 하고자 하였으나, 적외선 영역 및 갭-플라즈몬 메타표면에만 국한되어 있다는 한계점이 있었다.

【선행기술문헌】

【비특허문헌】

【0023】 (비특허문헌 0001) 1 논문 N. Yu, P. Genevet, M. A. Kats, F. Aieta, J. P. Tetienne, F. Capasso and Z. Gaburro, Science, 2011, 334, p333~337.

(비특허문헌 0002) 2 논문 M. Khorasaninejad, W. T. Chen, R. C. Devlin, J. Oh, A. Y. Zhu and F. Capasso, Science, 2016, 352, p1190~1194.

(비특허문헌 0003) 3 논문 X. Li, L. Chen, Y. Li, X. Zhang, M. Pu, Z. Zhao, X. Ma, Y. Wang, M. Hong and X. Luo, Sci. Adv., 2016, 2, e1601102.

(비특허문헌 0004) 4 논문 B. Wang, F. Dong, Q. T. Li, D. Yang, C. Sun, J. Chen, Z. Song, L. Xu, W. Chu, Y. F. Xiao, Q. Gong and Y. Li, Nano Lett., 2016, 16, p5235 ~ 5240.

(비특허문헌 0005) 5 논문 L. Huang, S. Zhang and T. Zentgraf, Nanophotonics, 2018, 7, p1169 ~ 1190.

【발명의 내용】

【해결하고자 하는 과제】

【0024】 본 발명은 상술한 문제점을 개선하기 위한 것으로서, 메타표면에 입사되는 빛의 편광 방향을 변환, 즉 편광에 따라 반파장판(half-waveplate)으로 동작하는 동시에 렌즈(Lens)의 기능을 모두 수행할 수 있는 편광과 포커싱 제어가 가능한 반파장판 메타표면, 메타렌즈 및 이들의 제조방법을 제공하는데 목적이 있다.

【과제의 해결 수단】

【0025】 본 발명은 상기의 목적을 달성하기 위하여, 기판 및 상기 기판 위에 형성되는 적어도 한 개 이상의 나노 기둥들을 포함하며, 상기 나노 기둥은 유전체만으로 구성되며 직육면체의 형상을 가지고, 상기 기판의 가로축을 제1축, 상기 기판의 세로축을 제2축이라고 할 때, 상기 나노 기둥은 상기 제1 및 제2축과 각각 45도의 각도를 이루면서 상기 기판상으로부터 수직 하는 방향으로 연장 형성되는 메타표면을 제공한다.

【0026】 상기 나노 기둥은 상기 기판과 접하는 면과 마주보는 면이 평면이 되도록 면 처리될 수 있다.

【0027】 상기 기판은 이산화규소(SiO_2)로 구성될 수 있다.

【0028】 상기 유전체는 수소화 비정질 실리콘(a-Si:H)일 수 있다.

【0029】 본 발명은 상기의 다른 목적을 달성하기 위하여, 일정한 단위 면적으로 구분될 수 있는 기판, 유전체만으로 이루어지며 상기 기판상에 형성되는 복수의 나노 기둥들을 포함하며, 상기 단위 면적당 한 개의 나노 기둥이 형성되는 복수의 단위 셀들을 포함하고, 상기 나노 기둥은 직육면체의 형상을 가지며, 상기 기판의 가로축을 제1축, 상기 기판의 세로축을 제2축이라고 할 때, 상기 제1 및 제2축과 각각 45도의 각도를 이루면서 상기 기판상으로부터 수직 하는 방향으로 연장 형성되고, 상기 단위 면적은 $240\text{nm} \times 240\text{nm}$ 인 메타표면을 제공한다.

【0030】 상기 복수의 단위 셀들은 제1 내지 제8단위 셀들 및 상기 제1 내지 제8단위 셀 각각에 형성된 제1 내지 제8 나노 기둥들을 포함하며, 상기 제1 내지 제8 나노 기둥은 수소화 비정질 실리콘(a-Si:H)로만 구성될 수 있다.

【0031】 상기 제1 내지 제8 나노 기둥 각각의 가로, 세로 및 높이의 크기는 각각 서로 다를 수 있다.

【0032】 상기 제1 내지 제8 나노 기둥은 320nm의 높이를 가질 수 있다.

【0033】 본 발명은 상기의 또 다른 목적을 달성하기 위하여, 일정한 단위 면적으로 구분된 기판, 상기 단위 면적에 따라 구분된 기판상에 형성되는 나노 기둥을 포함하는 복수의 단위 셀들을 포함하며, 상기 복수의 단위 셀들은 제1 내지 제8단위 셀들 및 상기 제1 내지 제8단위 셀 각각에 형성된 제1 내지 제8 나노 기둥들을 포함하고, 상기 제1 내지 제8 나노 기둥들 각각은 상기 기판의 가로축을 제1축, 상기 기판의 세로축을 제2축이라고 할 때, 상기 제1 및 제2축과 각각 45도의 각도를 이루면서 상기 기판상으로부터 수직 하는 방향으로 연장 형성되며, 유전체만으로 구성되고, 직육면체의 형상을 가지며, 상기 제1 내지 제8단위 셀은 서로 연결되어 슈퍼 셀을 형성하고, 상기 제1 내지 제8 나노 기둥들 중 적어도 4개의 나노 기둥과 다른 4개의 나노 기둥은 각각 90도 각도를 이루면서 마주보도록 배치되는 메타렌즈를 제공한다.

【0034】 상기 제1축 및 제2축의 길이를 나타내는 피치 Λ 는 240nm일 수 있다.

【0035】 복수 개의 상기 슈퍼 셀이 서로 연결되어 원판을 이루고, 상기 원판의 직경과 초점 길이(focal length)는 모두 $60\mu\text{m}$ 일 수 있다.

【0036】 본 발명은 상기의 또 다른 목적을 달성하기 위하여, 기판을 준비하는 제1단계, 상기 기판에 유전체 박막층을 증착시키는 제2단계, 상기 유전체 박막층에 전자빔 레지스트 (electron beam resist)를 증착시키는 제3단계, 전자빔 리소그래피 (electron beam lithography)를 통해 메타렌즈 패턴을 형성하는 제4단계, 상기 층에 알루미늄 층을 증착하고 리프트 오프(lift-off)하여 에치 마스크를 형성하는 제5단계, 상기 유전체 박막층에 에칭(etching)을 하여 메타렌즈 구조를 형성하는 제6단계, 상기 메타렌즈 구조에 남아있는 잔여 알루미늄 층을 제거하는 제7단계를 포함하는 메타표면 및 메타렌즈 제조방법을 제공한다.

【0037】 상기 제1단계는 상기 기판의 표면에 존재하는 불순물을 제거하는 웨이퍼 클리닝을 하는 제1-1 단계, 수분을 제거하는 디하이드레이션 베이킹 (dehydration baking)을 하는 제1-2 단계, 상기 기판의 표면이 소수성을 띄도록 변형하는 프라이밍하는 제1-3 단계를 더 포함할 수 있다.

【0038】 상기 제2단계는 상기 기판상에 화학 기상 증착법 (chemical vapor deposition)을 통해 수소화 비정질 실리콘(a-Si:H) 유전체 박막 층을 증착하며, 상기 수소화 비정질 실리콘을 320nm의 두께로 증착하는 제2-1 단계를 더 포함할 수 있다.

【0039】 상기 제3단계는 스핀 코팅(spin-coated) 방법으로 전자선 레지스트 (electron beam resist) 를 증착하는 제3-1 단계, 소프트 베이킹(soft baking)를 하는 제3-2 단계를 더 포함할 수 있다.

【0040】 상기 제4단계는 전자빔 리소그래피(electron beam lithography)를 이용하여 메타표면 패턴을 형성하고, 전자빔이 조사된 레지스트를 제거하여 현상 (development)하는 4-1단계를 더 포함할 수 있다.

【0041】 상기 제5단계는 상기 층에 알루미늄 (Al)을 증착하여 형성하고, 상기 알루미늄 층의 두께는 60nm가 되도록 하는 5-1단계, 리프트 오프 (lift-off)를 수행하여 에치 마스크 (etch mask)를 형성하는 5-2단계를 더 포함할 수 있다.

【0042】 상기 제6단계는, 상기 기판에 불소 기반의 유도 결합 플라즈마 반응 성 이온 에칭(fluorine-based inductively coupled plasma-reactive ion etching) 을 행하는 제6-1 단계를 더 포함할 수 있다.

【0043】 상기 제7단계에서, 상기 기판에 습식 식각(wet etching)을 통해 남아있는 알루미늄 층을 제거하는 제7-1 단계를 더 포함할 수 있다.

【발명의 효과】

【0045】 본 발명에 따른 편광과 포커싱 제어가 가능한 반파장판 메타표면, 메타렌즈는 입사광이 편광되는 방향에 따라 다양한 기능을 가지므로, 라이더 (LiDAR)나 현미경을 포함하는 광학 디바이스 응용 분야에서 광학 소자의 집적도를

향상시킬 수 있다.

【0046】 또한, 본 발명에 따른 편광과 포커싱 제어가 가능한 반파장판 메타표면 및 메타렌즈를 제조하는 방법은 개별적인 반파장판형 수소화 비정질 실리콘 나노 기둥들(distinct half-waveplate-like hydrogenated amorphous silicon nanoposts)로 구성되며, 선형 편광 각도(linear polarization angles)를 제어하여, 투과 가시광선의 파면을 조작할 수 있는 유전체만으로 형성된 메타표면 및 메타렌즈의 제작 방법을 제공한다.

【0047】 또한, 본 발명에 따른 편광과 포커싱 제어가 가능한 반파장판 메타표면 및 메타렌즈는, 위상, 진폭 및 편광을 포함하는 광 특성의 변조 외에도, 공명 분산 및 근접장 전자기파 분포(resonance dispersion and the near-field electromagnetic wave distributions) 기능을 갖는 평면 무색 렌즈 및 센싱 장치로 구현될 수 있다.

【도면의 간단한 설명】

【0049】 도 1은 반파장판과 렌즈를 각각 포함하고 있는 종래의 광학 시스템과 본 발명에 따른 메타렌즈를 비교하여 나타내는 도면이다.

도 2는 본 발명에 따른 메타표면의 단위 셀 구성, 편광된 입사광에 대한 전송 효율과 위상 및 u축과 v축 사이의 위상차를 나타내는 도면이다.

도 3은 본 발명의 일 실시 예에 따른 메타렌즈의 u축과 v축에 대해 시뮬레이

션 된 유효 인덱스 결과를 나타내는 도면이다.

도 4는 본 발명에 따른 메타표면에 수직인 입사각에 대해 투과된 광의 편광 및 회절 효율을 시뮬레이션한 결과로 편광 상태가 변하는 것을 나타내는 도면이다.

도 5는 본 발명에 따른 메타표면을 이용하여 출력 편광 상태를 조절할 수 있는 빔 디플렉터를 나타내는 도면이다.

도 6은 본 발명의 일 실시 예에 따른 메타렌즈에 서로 다른 입사 각도로 입사한 광의 편광 각도에 대한 광파면을 나타내는 도면이다.

도 7은 본 발명의 일 실시 예에 따른 메타렌즈를 나타내는 도면이다.

도 8은 본 발명의 일 실시 예에 따른 메타렌즈의 특성을 측정하기 위한 시스템 및 측정 결과를 나타내는 도면이다.

도 9는 본 발명의 일 실시 예에 따른 메타렌즈에 파장 690nm의 광이 입사 각도가 변화됨에 따라 나타나는 측정 결과를 나타낸 도면이다.

도 10은 본 발명의 일 실시 예에 따른 메타렌즈 제조 방법을 나타내는 순서도이다.

【발명을 실시하기 위한 구체적인 내용】

【0050】 이하에서 설명되는 모든 실시 예들은 본 발명의 이해를 돕기 위해 예시적으로 나타낸 것이며, 여기에 설명된 실시 예들과 다르게 변형되어 다양한 실시 형태로 실시될 수 있다. 또한, 본 발명을 설명함에 있어서, 관련된 공지 기능 혹은 공지 구성요소에 대한 구체적인 설명이 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수

있다고 판단되는 경우, 그 구체적인 설명은 생략하도록 한다.

【0051】첨부된 도면은 발명의 이해를 돕기 위해서 실제 축척대로 도시된 것이 아니라 일부 구성요소의 치수가 과장되게 도시될 수 있으며, 각 구성요소들에 참조번호를 기재할 때, 동일한 구성요소들에 대해서는 다른 도면에 표시되더라도 가능한 한 동일한 부호로 표시하였다.

【0052】또한, 본 발명의 실시 예의 구성 요소를 설명하는 데 있어서, 제1, 제2, A, B, (a), (b) 등의 용어를 사용할 수 있다. 이러한 용어는 그 구성 요소를 다른 구성 요소와 구별하기 위한 것일 뿐, 그 용어에 의해 해당 구성 요소의 본질이나 차례 또는 순서 등이 한정되지 않는다. 어떤 구성 요소가 다른 구성 요소에 '연결', '결합' 또는 '접속'된다고 기재된 경우, 그 구성 요소는 그 다른 구성 요소에 직접적으로 연결, 결합 또는 접속될 수 있지만, 그 구성 요소와 그 다른 구성 요소 사이에 또 다른 구성 요소가 '연결', '결합' 또는 '접속'될 수도 있다고 이해되어야 할 것이다.

【0053】따라서, 본 명세서에 기재된 실시 예와 도면에 도시된 구성은 본 발명의 가장 바람직한 실시 예에 불과할 뿐이고 본 발명의 기술적 사상을 모두 대변하는 것은 아니므로, 본 발명에 대한 다양한 변형 실시 예들이 있을 수 있다.

【0054】그리고 본 명세서 및 청구범위에서 사용된 용어나 단어는 통상적이거나 사전적인 의미로 한정되어서는 안 되며, 발명자는 그 자신의 발명을 가장 최선의 방법으로 설명하기 위해 용어의 개념을 적절하게 정의할 수 있다는 원칙에 입

각하여 본 발명의 기술적 사상에 부합하는 의미와 개념으로 해석되어야만 한다.

【0055】 또한, 본 발명은 이하에서 개시되는 실시 예들에 한정되는 것이 아니라 서로 다른 다양한 형태로 구현될 것이며, 단지 본 실시 예들은 본 발명의 개시가 완전하도록 하며, 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 발명의 범주를 완전하게 알려주기 위해 제공되는 것이며, 본 발명은 청구항의 범주에 의해 정의될 뿐이다.

【0056】 또한, 본 출원에서 사용된 단수의 표현은 문맥상 명백히 다른 것을 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다.

【0057】 이하에서는, 첨부된 도 1 내지 도 9를 참조하여, 편광과 포커싱 제어가 가능한 반과장판 메타표면 및 이를 포함하는 메타렌즈 대하여 자세히 설명한다.

【0058】 도 1은 반과장판과 렌즈를 각각 포함하고 있는 종래의 광학 시스템과 본 발명에 따른 메타렌즈를 비교하여 나타내는 도면이다.

【0059】 도 2는 본 발명에 따른 메타표면의 단위 셀 구성, 편광된 입사광에 대한 전송 효율과 위상 및 u축과 v축 사이의 위상차를 나타내는 도면이며, 도 3은 본 발명의 일 실시 예에 따른 메타렌즈의 u축과 v축에 대해 시뮬레이션된 유효 인덱스 결과를 나타내는 도면이다.

【0060】 도 4는 본 발명에 따른 메타표면에 수직인 입사각에 대해 투과된 광의 편광 및 회절 효율을 시뮬레이션한 결과로 편광 상태가 변하는 것을 나타내는

도면이며, 도 5는 본 발명에 따른 메타표면을 이용하여 출력 편광 상태를 조절할 수 있는 빔 디플렉터를 나타내는 도면이며, 도 6은 본 발명의 일 실시 예에 따른 메타렌즈에 서로 다른 입사 각도로 입사한 광의 편광 각도에 대한 광파면을 나타내는 도면이다.

【0061】 도 7은 본 발명의 일 실시 예에 따른 메타렌즈를 나타내는 도면이며, 도 8은 본 발명의 일 실시 예에 따른 메타렌즈의 특성을 측정하기 위한 시스템 및 측정 결과를 나타내는 도면이다.

【0062】 도 9는 본 발명의 일 실시 예에 따른 메타렌즈에 파장 690nm의 광이 입사 각도가 변화됨에 따라 나타나는 측정 결과를 나타낸 도면이다.

【0063】 도 1 및 도 2를 참조하면, 본 발명에 따른 메타표면은 기판(SiO_2) 및 나노 기둥(nanopost)을 포함한다.

【0064】 본 발명의 일 실시 예에 따른 기판은 이산화규소(SiO_2)로 구성되며, 일정한 단위 면적으로 구분될 수 있다.

【0065】 도 2에 도시된 바와 같이, 기판은 도 2에 도시된 x축을 가로축 및 제1축으로 하고, y축을 세로축 및 제2축으로 정의할 수 있다.

【0066】 본 발명의 일 실시 예에 따른 기판의 제1축 및 제2축의 길이는 240nm로 동일하게 구성될 수 있으며, 이 경우, 기판의 단위 면적은 240nm*240nm으로 구분할 수 있다.

【0067】 나노 기둥(nanopost)은 기판(SiO_2) 위에 형성되며, 유전체만으로 구성된다. 본 실시 예에 따른 유전체는 수소화 비정질 실리콘(a-Si:H)이므로, 나노 기둥은 수소화 비정질 실리콘(a-Si:H)으로 구성된다.

【0068】 나노 기둥은 직육면체의 형상을 가지며, 기판을 단위 면적으로 구분할 경우, 각 단위 면적당 적어도 한 개 이상의 나노 기둥을 포함한다.

【0069】 따라서, 기판의 단위 면적이 $240\text{nm} \times 240\text{nm}$ 으로 이루어질 경우, 가로 및 세로가 $240\text{nm} \times 240\text{nm}$ 의 면적을 가지는 기판 상에 한 개의 나노 기둥이 형성될 수 있다.

【0070】 한편, 본 발명의 일 실시 예에서 나노 기둥은 도 2에 도시된 바와 같이, 기판의 제1축 및 제2축과 각각 45도의 각도를 이루면서 기판상으로부터 수직하는 방향으로 연장 형성된다.

【0071】 이때, 도 2에 도시된 바와 같이, 나노 기둥이 기판과 접하는 면과 마주보는 면은 평면이 되도록 면 처리된다.

【0072】 이는 나노 기둥이 특정한 모드(mode)에서 광 전파를 하는 도파관 역할을 하기 때문이다.

【0073】 한편, 본 발명의 일 실시 예에 따른 나노 기둥을 포함하는 기판들은 일정한 단위 면적으로 구분될 경우, 단위 셀(unit cell)로 지칭될 수 있다.

【0074】 즉, 상술한 일 실시 예처럼, 가로 및 세로가 $240\text{nm} \times 240\text{nm}$ 의 면적을 가지는 기판으로 단위 면적을 구분할 경우, 각각의 단위 면적에 해당하는 기판을

단위 셀로 지칭하며, 단위 셀마다 각각 한 개의 나노 기둥이 형성된다.

【0075】 또한, 이러한 단위 셀들은 서로 연결되어, 슈퍼 셀(super cell)을 구성하며, 슈퍼 셀은 복수의 나노 기둥들을 포함하게 된다.

【0076】 본 발명에서 슈퍼 셀은 제1 내지 제8단위 셀(#1, #2, #3, #4, #5, #6, #7, #8, 도 2의 (c) 참조)을 포함하는 것을 일 실시 예로 하여 설명하며, 제1 내지 제8단위 셀(#1, #2, #3, #4, #5, #6, #7, #8) 각각은 제1 내지 제8 나노 기둥을 포함하는 것을 예시로 하여 설명한다.

【0077】 본 발명의 일 실시 예에 따른 단위 셀은 그 자체로 단일한 메타표면을 구성하며, 이러한 단위 셀들이 서로 연결되어 슈퍼 셀을 형성하며, 메타렌즈로 구현된다.

【0078】 따라서, 슈퍼 셀은 복수의 단위 셀들의 집합체로써 메타렌즈를 구성하는 기본 구성이 된다.

【0079】 이러한 슈퍼 셀에 포함된 제1 내지 제8 나노 기둥은 도 2의 (c)에 도시된 바와 같이 그 크기와 넓이가 서로 다르게 구성될 수 있다.

【0080】 도 2의 (a)에 도시된 바와 같이, 각각의 나노 기둥에 대한 가로, 세로 및 높이를 각각 w_2 , w_1 및 h 로 정의할 경우, 제1 나노 기둥 내지 제8 나노 기둥의 w_2 , w_1 및 h 는 모두 다르게 구성될 수 있다.

【0081】 이 경우, 광의 편광 특성에 따라 다양한 기능을 가지는 메타렌즈를 구현할 수 있다.

【0082】 하지만, 광의 편광 특성을 일정하게 제어하기 위해, 제1 나노 기둥 내지 제8 나노 기둥의 w_2 , w_1 및 h 는 모두 동일하게 구성될 수도 있다.

【0083】 즉, 제1 나노 기둥 내지 제8 나노 기둥은 모두 320nm의 동일한 높이 (h) 값을 갖도록 구성될 수 있다.

【0084】 또한, 도 2의 (c)에 도시된 바와 같이, 슈퍼 셀에 포함되는 제1 내지 제8 나노 기둥들 중 적어도 4개의 나노 기둥과 다른 4개의 나노 기둥은 입사하는 광을 편광시키는 메타렌즈의 기능을 가지도록 구성되기 위해, 도 2에 도시된 바와 같이, 각각 90도 각도를 이루면서 마주보도록 배치된다.

【0085】 예를 들어, 제1 내지 제4 나노 기둥들은 도 2의 (c)에 도시된 바와 같이, 기관의 오른쪽 세로축을 바라보도록 비스듬하게 배열되는 반면, 제5 내지 제8 나노 기둥들은 도 2의 (c)에 도시된 바와 같이, 기관의 왼쪽 세로축을 바라보도록 비스듬하게 배열될 수 있다.

【0086】 즉, 도 2(c)에 도시된 제1 내지 제8 나노 기둥의 배열을 상면에서 바라보는 평면도로 나타낼 경우, 제1 내지 제4 나노 기둥들과 5 내지 제8 나노 기둥들은 V자 형태로 배열되며, 서로 90도 각도를 이루며 비스듬히 마주보도록 배열된다.

【0087】 또한, 본 발명의 일 실시 예에서, 기관의 가로를 나타내는 제1축 및 세로를 나타내는 제2축의 길이는 피치 Λ 는 모두 240nm이므로, 도 2의 (c)에 도시된 제1 내지 제8 나노 기둥들은 모두 각각 240nm만큼의 간격을 갖도록 이격 배치된

다.

【0088】 한편, 복수의 단위 셀들이 결합하여 구성된 슈퍼 셀은 그 자체로써 메타렌즈를 구현할 수 있으나, 도 7의 (a) 및 (c)에 도시된 바와 같이, 복수의 슈퍼 셀들이 서로 연결되어 원판 형태의 메타렌즈를 구현할 수도 있다.

【0089】 도 7의 (a) 및 (c)에 나타난 본 실시 예에 따른 메타렌즈는 원판의 직경이 $60\mu\text{m}$ 로 형성된다.

【0090】 또한, $60\mu\text{m}$ 의 직경을 가진 본 실시 예에 따른 메타렌즈는 초점 길이 (focal length) 역시 $60\mu\text{m}$ 로 형성된다.

【0091】 본 발명에 따른 메타렌즈는 서브 파장 영역에서 공간을 가지도록 구획된 나노 구조(subwavelength-spaced nanostructure)이며, 이러한 나노 구조는 상술한 나노 기둥으로 구현된다.

【0092】 한편, 이러한 나노 구조들은 개별적으로 입사광과 상호 작용하고 광을 산란시킬 수 있는 메타원자(meta-atom)라고 정의할 수도 있으며, 각각의 나노 구조의 크기, 모양 및 나노 구조가 바라보고 있는 방향에 따라 위상 지연이 달라진다.

【0093】 본 발명에 따른 메타렌즈가 가지고 있는 편광 기능과 편광 효율을 검증하기 위하여, 비정상 빔 디플렉터(anomalous beam deflector)를 설계하여, 지정된 위치에서 교차 편광(cross-polarized light)을 시키고, 집광 현상(light focusing phenomenon)을 관찰하였다.

【0094】 결론적으로, 본 발명에 따른 메타렌즈는 교차 편파 방식에서 82%의 절대 편향 효율(absolute deflection efficiency), 96%의 편광 변환 효율(polarization conversion efficiency) 및 37dB의 소광비(extinction ratio)를 가짐이 입증되었다.

【0095】 또한, 본 발명에 따른 메타렌즈에 의해 편향된 광은 입사 편광 각도를 변화시킴으로써 0.96보다 큰 선형 편광도를 유지할 수 있으며, 편광을 연속적으로 회전시킬 수 있다.

【0096】 또한, 입사 편광 각도를 맞추는 것으로써, 선형 편광 각도가 회전될 수 있음을 입증하였다. 여기서 선형 편광 각도는 집광되는 스폿(focused beam spot)의 출력과 대응한다.

【0097】 따라서, 본 발명에 따른 메타렌즈는 반파장판(half-waveplate) 및 포커싱 렌즈(focusing lens)와 동일한 기능을 갖는다.

【0098】 일반적으로 광학 파장판(optical waveplate)은 광학 디바이스 또는 시스템에서 빛의 편광을 회전 또는 변환하는데 사용된다.

【0099】 또한, 본 발명에 따른 메타렌즈는 메타렌즈를 구성하는 메타표면을 여러 섹터로 나누고, 각 섹터가 지정된 편광 상태로 작동하여 입사광이 서로 다른 편광 상태가 되도록 한다.

【0100】 본 발명에 따른 메타렌즈의 편광 상태를 실험함에 있어서, 입사광 및 출력광의 편광 상태는 각 기능이나 각 모드에 있어 모두 동일하게 유지되었다.

【0101】 복굴절 재료로 구성된 종래의 파장판은, 빛의 파장보다 훨씬 긴 전파 거리에 걸쳐 축적된 위상 지연을 이용하여, 2개의 직교 편광 사이의 위상 지연을 발생시킨다.

【0102】 또한, 종래의 메타표면은 출력되는 광파면을 조작한다. 이때, 출력되는 광은 교차 편광되어(cross-polarized) 입사하는 광의 편광과 직교하는 광이 된다.

【0103】 이때, 종래의 메타표면은 원형 편광(circularly polarized light)을 조작하기 위해 기하학적 위상(geometric phase)을 이용하거나, 직선 편광(linearly polarized light)을 제어하기 위해 공명-유도된 위상 시프트(resonance-induced phase shift)를 이용하는 것 중 어느 하나의 방법을 사용하여 광파면을 조작한다.

【0104】 종래의 메타표면은 교차 편광된 광의 파면을 조작할 수 있는 기능은 기본적으로 가지고 있었으므로, 메타표면의 기하학적 구조에 대하여 다양한 연구가 있었다.

【0105】 그러나 종래의 단일층 플라즈몬 메타표면(monolayer plasmonic metasurface)은 편광 변환의 불량(poor polarization conversion)이 발생하였으며, 이러한 불량을 갭-플라즈몬 구성(gap-plasmon configuration)으로 어느 정도 해결할 수 있었지만, 메타표면은 반사 모드(reflection mode) 만으로 동작이 제한되는 단점이 있었다.

【0106】 특히, 메타표면의 편광 조작 능력은 전적으로 동일한 메타원자 또는 나노 구조들 간의 상호 공간적 관계 즉, 나노 구조들이 서로 다른 방향을 바라보도록 배치되는 것에 기반하기 때문에, 위상 제어의 결과는 원형 편광을 갖는 입사광에만 유효하며, 선형 편광된 입사광에 대해서는 편광의 공간 변조 만이 허용된다.

【0107】 이러한 종래의 메타표면에 대한 위상 제어는 스펙트럼 대역이 넓은 경우에는 제어가 효과적일지라도, 광대역을 넘어서는 대역에서의 편광 변환 효율은 일정하게 유지될 수 없거나 효율이 매우 낮아진다.

【0108】 이를 극복하기 위해 종래에는 메타표면에 포함된 나노 구조의 기하학적 형태를 조절하는 것 이외에도 초박형 하이브리드 이중층 플라즈몬 메타표면 (ultra-thin hybrid bilayer plasmonic metasurface)을 도입하여, 가시광선 영역 내 700nm 부근의 파장에서, 보다 향상된 선형 편광 변환 효율(linear polarization conversion efficiency)을 유지한 채, 광 전송이 가능하도록 하였다.

【0109】 하지만, 이렇게 다차원의 다중 메타원자 또는 다중 메타표면을 사용하는 경우에는 적외선 영역에서만 사용 가능하였으며, 갭-플라즈몬 메타표면(gap-plasmon metasurfaces)으로만 구성할 수 밖에 없었다.

【0110】 따라서, 본 발명에 따른 메타표면 및 메타렌즈는 유전체만으로 메타표면을 구성하여 편광 변환 효율을 극대화 하였으며, 맞춤형 직선 편광 상태를 제공한다.

【0111】 또한, 유전체만으로 형성된 메타표면 및 메타렌즈를 사용하여 가시광 영역에서도 광과면 성형이 가능하도록 하였다.

【0112】 본 발명에 따른 메타표면은 약 36%의 최적 변환 효율을 보이며, 종래보다 상대적으로 낮은 유도 소산 손실(induced dissipation loss) 값을 나타내고 있다.

【0113】 본 발명에 따른 메타표면 및 메타렌즈에 포함된 8개의 나노 기둥들은 수소화 비정질 실리콘(a-Si:H)으로 구성되었으며, 입사광에 대하여 다양한 위상 지연을 제공한다.

【0114】 또한, 본 발명에 따른 메타표면에 포함된 각 나노 기둥들은 스스로가 반파장판(half-waveplate, HWP)으로 작용하며, 입사광 편광 각도를 회전시키는 역할을 하고, 본 발명에 따른 메타렌즈는 교차 편향된 광을 포커싱(focusing)한다.

【0115】 본 발명에 따른 메타렌즈는 입사 편광 각도를 변경하여 집광되는 스폿(focused spot)에서의 선형 편광 각도를 조정할 수 있으며, 도 1에 도시된 바와 같이, 기존의 반파장판(HWP)과 포커싱 렌즈의 기능이 결합된 구성이다.

【0116】 여기서 포커싱 렌즈란 종래의 광학 시스템에 사용되는 부피가 크고 정확하게 정렬될 필요가 있는 포커싱 렌즈를 의미한다.

【0117】 도 2의 (a)를 참조하면, 본 발명에 따른 나노 기둥(nano post)은 SiO₂ 기판 위에 형성되어 직사각형의 형상을 가지고, 유전체만으로 형성된 메타표면의 단위 셀을 형성한다.

【0118】 한편, 본 발명에 따른 나노 기둥은 유전체인 수소화 비정질 실리콘(a-Si:H)만으로 구성되며, 수소화 비정질 실리콘(a-Si:H)을 채택함에 따라 다음과 같은 장점을 수반한다.

【0119】 결정질 실리콘과 달리 수소화 비정질 실리콘(a-Si:H)은 낮은 온도임에도 불구하고 외부 기판상에서 쉽게 성장할 수 있으며, 690nm의 파장에서 수소화 비정질 실리콘(a-Si:H)은 높은 굴절률을 보인다.

【0120】 또한, 수소화 비정질 실리콘(a-Si:H)은 효율적으로 광을 조작할 수 있을 정도의 수치인 서브 파장 규모(subwavelength scale)의 낮은 소광계수($n \approx 4.077 + 0.005i$)를 보여준다.

【0121】 하지만, 본 발명에 따른 메타표면 및 메타렌즈는 반드시 수소화 비정질 실리콘(a-Si:H)만을 사용해야 하는 것은 아니며, 경우에 따라 짧은 가시광 파장에서 메타렌즈가 동작할 경우, 결정질 실리콘, 이산화 티타늄, 질화규소 및 질화갈륨을 포함하는 다른 유전체 물질들이 사용하는 것이 높은 흡수율을 가지는 수소화 비정질 실리콘(a-Si:H) 보다 바람직하다.

【0122】 특히, 결정질 실리콘을 제외하고, 나머지 물질들은 상대적으로 낮은 지수를 가지며, 나머지 물질들 대부분은 전체 2π 위상 제어(entire 2π phase control)를 수행할 수 있도록, 근접 파장 구조(near-wavelength)의 높이로 나노 기둥이 형성되도록 나노 구조의 성장을 제한한다.

【0123】 한편, 이러한 장치를 제조하기 위해, 원자층 증착과 같은 추가적인 공정이 요구될 수 있다.

【0124】 본 발명에 따른 일정한 단위 면적으로 이루어진 메타표면을 단위 셀이라고 하며, 도 2에 도시된 바와 같이, 단위 셀의 피치(Λ)는 240nm이고, 수소화 비정질 실리콘(a-Si:H)으로 이루어진 나노 기둥(nanopost)은 $h=320\text{nm}$ 의 높이를 가지며 약 0.46λ 파장 길이에 해당한다.

【0125】 한편, 나노 기둥(nanopost)들은 단위 셀의 x축에 대해 45° 회전되며, 그 결과 입사하는 x-편광(x-polarized light) 또는 y-편광(y-polarized light)이 u축과 v축을 따라 두 개의 직교 성분으로 분해될 수 있다.

【0126】 여기서 u축과 v축은 각각 도 2에 도시된 나노 기둥의 가로(w_2)와 평행한 축과 세로(w_1)와 평행한 축을 나타낸다.

【0127】 u축과 v축 사이에서 $|\Delta\phi_{u-v}| = \pi$ 의 위상차로 단위 전송이 발생한다고 가정하면, 나노 기둥으로 입사하는 x-편광은 완전히 y-편광된 광으로 변환될 수 있다.

【0128】 또한, 본 발명에서는 유한차분 시간영역법에 기반한 툴(Finite-Difference Time-Domain method-based tool, FDTD Solutions, Lumerical, Canada)을 사용하여 구조물의 최적 치수를 결정하기 위한 시뮬레이션을 수행하였다.

【0129】 이러한 시뮬레이션에서, x-편광은 본 발명의 일 실시 예에 따른 단위 셀에 수직으로 입사하도록 설정되었으며, y-편광은 도 2의 (b)에 묘사된

것처럼, 나노 기둥의 넓이(w_1 , w_2)를 변화시킴으로써 투과 효율(Transmission Efficiency, T_{Ey}) 및 위상 변화(Phase Shift, ϕ_{Ey})의 관점에서 검증했다.

【0130】 결과적으로, 본 실시 예에 따른 나노 기둥(nanopost) 치수의 적절한 조정에 의해, 투과된 y-편광의 위상 변화는 0에서 2π 까지 조정될 수 있으며, 교차 편광계(cross-polarized scheme)를 형성하는 데 있어, 광파면에 결정적인 손실은 없었다.

【0131】 본 실시 예에서는, 도 2의 (b)에서 십자 표시되어 있는 8개의 나노 기둥들(nanoposts)이 완전한 2π 위상 제어를 제공하기 위해 선택되었다.

【0132】 도 2의 (c)에서도 볼 수 있듯이, 파장 $\lambda=690\text{nm}$ 에서 수직으로 입사한 x-편광은, 나노 기둥을 통과하면서 89%를 전송 효율(검은색 점으로 표현됨)을 나타내었고, 이러한 전송 효율은 거의 변화가 없었다.

【0133】 또한, x-편광은 나노 기둥을 통과하면서 $\pi/4$ 의 점진적인 위상 이동(청색 점으로 표현됨)이 진행되었다. 이들 모두는 y-편광과 관련된다.

【0134】 선택된 나노 기둥 각각에 대해, 긴 축들(u-axes)과 짧은 축들(v-axes) 사이의 위상차도 계산되었다.

【0135】 도 2의 (c)에 도시된 바와 같이, 추정된 위상차들은 별모양으로 표현되며, δ 의 근사값을 모방한 것으로써, 모두 0.05π 라디안 이내의 차이 값을 보이고 있다. 각 나노 기둥은 설계 파장에서 거의 완벽한 반파장판(HWP)으로 취급됨을 알 수 있으며, 나노 기둥의 긴 축들(u-axes) 및 짧은 축들(v-axes)은 각각 파장

판(waveplate)의 저속(slow) 및 고속(fast) 축에 대응한다.

【0136】 본 발명에 따른 유전체만으로 형성된 나노 기둥은 특정 모드의 전파를 허용하기 위해 일단면이 잘려진 형태의 모서리가 되도록 단면 처리된(truncated) 도파관으로 이해할 수 있다.

【0137】 나노 기둥의 폭은 특정 모드에서 실효 굴절률(effective index)을 변조하기 위한 변수 값이 되며, 나노 기둥의 일단면이 도파관의 일단면이 되므로 나노 기둥의 일단면에서 광이 분산됨과 동시에 다른 위상 변이들을 야기할 수 있다.

【0138】 각 나노 기둥들마다 긴 축들(u-axes) 및 짧은 축들(v-axes)의 길이가 다를 수 있으므로, 모든 나노 기둥들에 있어서 두 개의 유효 굴절률(n_{eff_u} 및 n_{eff_v}) 값이 발생할 수 있으며 이 두 값들은 긴 축(u-axis) 및 짧은 축(v-axes)의 길이에 의해 결정된다.

【0139】 또한, 도 3에 도시된 바와 같이, 다음의 수식(1)에 따라, 상술한 두 개의 유효 굴절률(n_{eff_u} 및 n_{eff_v}) 값에 대응하는 위상 변이를 계산한다.

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff}} h \quad (1)$$

【0140】

【0141】 각 나노 기둥들마다 π 영역 근방에서 위상 차를 유발하였으며, 두 실효 굴절률(n_{eff_u} 및 n_{eff_v}) 사이의 차이 값(Δn_{eff_u} 및 Δn_{eff_v})은 도 2의 (c)에 나타난 시뮬레이션 결과와 일치한다.

【0142】 반면, 서로 근접한 두 개의 나노 기둥들은, u축과 v축을 따라 발생하는 각각의 실효 굴절률들 간 차이인 차이값(Δn_{eff_u} 및 Δn_{eff_v})이 거의 동일했으며, 두 개의 나노 기둥들 모두 거의 일정한 $\pi/4$ 의 위상 변이를 유도하였다.

【0143】 한편, 본 발명에 따른 메타렌즈가 편광 변환 및 파면 형성을 함에 있어서, 본 발명에 따른 유전체만으로 형성된 메타표면이 이중 기능을 가지고 있는지 여부를 검증하기 위하여, 8개의 나노 기둥들을 통합하여 슈퍼 셀(super cell)을 형성하였고, 이러한 슈퍼 셀을 통해 비정상적인 빔 디플렉터(anomalous beam deflector)를 만들었다.

【0144】 본 실시 예에 따른 슈퍼 셀은 $\pi/4$ 간격으로 선형 증가하는 위상 변이가 주어질 일정한 위상 기울기를 형성하였다.

【0145】 또한, 도 4의 (a)와 (b)에 도시된 바와 같이, x축과 평행하게 편광된 평면 파를 정상적으로 입사시키고, 전기장의 x성분(E_x) 및 y성분(E_y)을 각각 계산하였다.

【0146】 투과 프로파일(transmission profile)은 y성분(E_y)이 x성분(E_x)보다 강하게 나타났으며, 선형 편광의 변환을 나타냈다.

【0147】 또한, 도 4의 (b)의 전기장 프로파일(field profile)은 경사진 전파 각도(oblique propagation angle)와 관련된 평면 파면(planar wavefront)을 나타내며, 비정상적인 굴절(anomalous refraction)을 보여준다.

【0148】 비정상적인 굴절의 각도는 $\theta_t=20.9^\circ$ 으로 측정되며, 정규화된 스넬의 법칙(the generalized Snell's law)에 따라 계산된 각도 값은 21.1° 에 가깝다.

【0149】 정규화된 스넬의 법칙과 수정된 회절 방정식(modified diffraction equation) 간의 동등성에 따르면, 비정상적으로 전송된 빔은 첫번째 회절 차수(이 경우, 양의 1차수)의 광파와 일치한다.

【0150】 도 4의 (c) 및 (d)에 도시된 바와 같이, 편광 투과율(T_{pol}), 양의 1차 회절 차수(D_{+1}), 음의 1차 회절 차수(D_{-1}) 및 0차 회절 차수(D_0)에 대한 효율들은 각각 x성분(E_x) 및 y성분(E_y)으로 계산되며, 600nm 내지 800nm의 스펙트럼 대역 내에서 계산된다.

【0151】 제안된 유전체 메타표면의 총 전송 효율(T_{total})은 비교를 위해 도 4에서 점선과 함께 표시된다.

【0152】 파장 $\lambda=690\text{nm}$ 에서, 총 전송 효율(T_{total}), E_y 편광 투과율($T_{E_y, pol}$) 및 E_y 편광 양성 1차 회절($D_{E_y, +1}$)의 절대 회절 값은 각각 88.6%, 85.5% 및 82.2% 이다.

【0153】 이러한 비 동일성 요소들이 서로 다른 상이한 반사 계수(reflection coefficients)를 나타내기 때문에, 비단위 전체 투과율(non-unity total transmission efficiency)은 실리콘 흡착(5.4%) 및 나노 기둥들에 의해 불가피하게 발생하는 반사(6%)로 설명된다.

【0154】 한편, 본 실시 예에 따른 빔 디플렉터의 성능은 변환 효율(conversion efficiency, CE) 및 소광비(extinction ratio, ER)의 측면에서 더 분

석되었다.

【0155】 변환 효율(CE)은 투과광 파워에 대한 비정상 굴절 광 파워 (anomalous refracted light power)(D_{+1})의 비율로 정의되며, 소광비(ER)는 dB 단위의 $ER = 10 \log(D_{E_{y+1}}/D_{E_{x0}})$ 로 주어진다.

【0156】 여기서 $D_{E_{x0}}$ 는 x성분(E_x)에 관한 0차 회절을 나타낸다.

【0157】 도 4의 (e)에 도시된 바와 같이, 최대 변환 효율(CE) 및 소광비(ER)는 각각 96.5% 및 37dB이며, 이는 유사한 스펙트럼 대역에서 종래의 하이브리드 이중층 플라즈몬 메타표면으로부터 검출된 값을 초과하는 값이다.

【0158】 종래의 하이브리드 이중층 플라즈몬 메타표면은 초박막 두께($\sim \lambda/6$)를 특징으로 하지만, 본 실시 예에 따른 유전체 메타표면의 두께는 작동 파장($\sim \lambda/2$)에 비해 현저하게 작다.

【0159】 또한, 본 실시 예에 따른 유전체만으로 형성된 메타표면 및 메타렌즈는 80% 이상의 편광 변환 효율(polarization conversion efficiency)을 가지며, 동작 대역폭(operation bandwidth)은 100nm에 가깝다.

【0160】 도 5의 (a)를 참조하면, 지정된 입사 편광에 대해서만 교차 편광된 광을 조작할 수 있는 이전의 메타표면들과는 달리, 본 실시 예에 따른 유전체만으로 형성된 메타표면 및 메타렌즈는 입사 편광의 각도를 변경함으로써 투과되는 광의 편광을 조절할 수 있다.

【0161】 본 발명에서 선형 편광된 입사광은 아래의 수학적 식 (2)로 정의되는 존스 벡터(the Jones vector)를 사용하여 설명할 수 있다.

【0162】 【수학적 식 2】

$$J_{in} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_{in} \\ \sin \varphi_{in} \end{bmatrix}$$

【0163】 여기서 φ_{in} 는 x축에 대한 입사 편광 각도를 나타낸다.

【0164】 본 발명에 따른 메타표면에 존재하는 각각의 나노 기둥들을, 입사하는 광이 포함하는 존스 벡터에 대해 이상적으로 작용하는 반파장판(HWP)이라고 가정하면, 나노 기둥들은 존스 행렬(Jones Matrix)의 형태인 다음의 수학적 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

【0165】 【수학적 식 3】

$$M = \begin{bmatrix} \cos 2\alpha & \sin 2\alpha \\ \sin 2\alpha & -\cos 2\alpha \end{bmatrix}$$

【0166】 여기서, α 는 파장판의 빠른 축과 x축 사이의 각도를 나타낸다.

【0167】 한편, $\alpha=45^\circ$ 일 경우, 본 발명에 따른 유전체로만 형성된 메타표면은, 출력되는 투과광의 선형 편광을 다음의 수학적 식 (4)로 표현할 수 있다.

【0168】 【수학식 4】

$$J_{\text{out}} = \begin{bmatrix} \cos 2\alpha & \sin 2\alpha \\ \sin 2\alpha & -\cos 2\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi_{\text{in}} \\ \sin \varphi_{\text{in}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_{\text{in}}\right) \\ \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_{\text{in}}\right) \end{bmatrix}$$

【0169】 수학식4에서, 입력 및 출력되는 전기장은 파장판의 빠른 축에 대한 각도와 동일한 각도를 가진다.

【0170】 한편, 본 발명의 다른 실시 예로써, 파장 $\lambda=690\text{nm}$ 으로 설계된 빔 디플렉터의 경우, 첫 번째 회절 차수에서의 편광 상태는 편광 타원 지도 (polarization ellipse map)를 기반으로 분석되었으며, 입사 편광 각도는 도 5의 (b)에 도시된 바와 같이, $\varphi_{\text{in}}=0^\circ$ 부터 90° 까지 다양하게 분포된다.

【0171】 이때, 첫 번째 회절 차수에서의 편광 상태는 지배적인 투과광 (dominant transmitted light)을 보존하는 것과 관련된다.

【0172】 $\varphi_{\text{in}}=0^\circ$ 및 90° 에서, 출력되는 광은 y축과 x축을 따라 각각 선형적으로 편광되었지만, 출력되는 광은 중간 입사 편광 각도들(도 5의 (b)의 삽화는 $\varphi_{\text{in}}=45^\circ$ 에서의 가장 타원인 경우를 나타냄)을 갖는 타원 편광을 나타낸다.

【0173】 해당 선형 편광도(Degree Of Linear Polarization, DOLP)와 1차 편광 각도는 도 5의 (c)와 같이 계산된다.

【0174】 여기서 선형 편광도(DOLP)는 선형 편광 품질을 나타내며, 아래의 수
학식5로 표현될 수 있다.

【0175】 【수학식 5】

$$DOLP = 1 - 2\gamma/(1 + \gamma^2)$$

【0176】 여기서 γ 는 주축(major axes)에서 부축(minor axes)의 길이에 대한
비율을 나타낸다.

【0177】 이 비율은 편광 타원 지도에서 나타나는 타원 형태와 관련되며,
DOLP = 1는 완벽한 선형 편광을 의미한다.

【0178】 본 실시 예에 따른 메타표면을 시뮬레이션한 선형 편광도(DOLP)는
0.96을 초과하는 것으로 나타났으며, 이 수치는 높은 선형 편광을 나타낸다.

【0179】 본 실시 예에 따른 메타표면을 시뮬레이션한 결과에 따르면, 이상적
인 반과장판은 출력과 입력 편광 간의 각도 차가 과장판의 축 및 입력 편광 간의
각도 차에 비하여 두 배일 때 형성됨을 알 수 있다.

【0180】 따라서, 도 5의 (c)에 도시된 바와 같이, φ_{out} 은 φ_{in} 와 동일하
며, 본 실시 예에 따른 메타표면을 시뮬레이션 한 1차 편광 각도는 이론 결과와 일
치함을 알 수 있다.

【0181】 도 5의 (d)에 도시된 바와 같이, 입사 편광이 0° 에서 90° 까지 스캔 방식으로 진행된다면, 예상한 것과 같이, $T_{E_y, \text{pol}}$ 및 $T_{E_x, \text{pol}}$ 의 2개의 분해된 편광 투과율은 각각 $T_{E_y, \text{pol}}$ 가 감소하고, $T_{E_x, \text{pol}}$ 증가하는 것으로 나타나며, 총 전송 효율 (T_{total})은 상당히 안정적으로 유지되는 것으로 나타난다.

【0182】 도 6에 도시된 바와 같이, 편광 제어와는 별도로, 본 실시 예에 따른 메타표면 및 메타렌즈가 파면 제어를 할 수 있음을 보여주기 위해, x-편광 및 y-편광과 평행하게 나노 기둥을 투과한 광파면들을 검사하였다.

【0183】 한편, 본 실시 예에 따른 메타표면으로 파면 제어를 할 경우, 교차 편광 방식의 파면 조작은 입사광이 x-편광 또는 y-편광일 때만 유효하다.

【0184】 임의의 선형 편광 각도(arbitrary linear polarization angle)를 갖는 입사광에 대해, 교차-편광 방식(the cross-polarized scheme)을 이용하여 일정한 파면 조작(constant wavefront manipulation)을 하기 위해서, 본 실시 예에 따른 메타표면 및 메타렌즈로 구성된 광학 디바이스는 서로 다른 편광 각도에 대응하는 서로 다른 각도의 빠른 축들을 나타낼 필요가 있다.

【0185】 또한, 광학 디바이스는 반파장판(HWP)과 포커싱 렌즈를 필수로 하므로, 본 실시 예에 따른 메타표면 및 메타렌즈로 구성된 광학 디바이스는 이 두 가지의 부피가 큰 구성요소(반파장판과 포커싱 렌즈)를 대체할 수 있는 초박형 단일층 유전체 메타렌즈를 제안한다.

【0186】 본 실시 예에 따른 메타렌즈에 포함된 나노 기둥들(nanoposts)의 분포를 설명하기 위해, 전자 현미경 이미지(electron microscopy images)로 나타낸 본 실시 예에 따른 메타렌즈가 도 7의 (c)에 도시되어 있다.

【0187】 본 실시 예에 따른 메타표면 및 메타렌즈에 대한 위상 분포(phase distribution)는 다음의 수학적식6과 같이 주어진다.

【0188】 【수학적식 6】

$$\phi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \left(f_0 - \sqrt{x^2 + y^2 + f_0^2} \right)$$

【0189】 여기서, f_0 는 초점 거리이고, (x, y) 는, $(x_0, y_0) = (0, 0)$ 으로 표현되는 원점(origin)을 기반으로, 본 실시 예에 따른 메타렌즈에 포함된 각 단위 셀의 중심과 대응하는 좌표를 나타낸다.

【0190】 도 7의 (a)는 본 실시 예에 따른 메타렌즈의 기하학적 구조(geometry)를 나타내며, 본 실시 예에 따른 메타렌즈의 직경과 초점 길이(focal length)는 각각 $60\mu\text{m}$ 로 형성됨을 나타낸다.

【0191】 도 7의 (b)의 전기장 강도 프로파일(electric field intensity profiles)을 참조하면, x-편광되어 본 실시 예에 따른 메타렌즈에 입사한 광이, xz-평면(xz-plane) 및 xy-평면(xy-plane) 양쪽의 초점 영역(focal region) 근처에서 나타낸 전기장 강도에 대한 시뮬레이션 결과가 나타나있다.

【0192】 이 결과를 살펴보면, y-편광된 광은 $z=60\mu\text{m}$ 의 예상된 위치에서만 단

독으로 포커싱(focusing) 되었다.

【0193】 또한, 파장이 690nm일 경우, 본 실시 예에 따른 메타렌즈는 ~ 0.45 의 개구수(numerical aperture, NA)를 가지며, xz-평면에서 길이 방향으로 $\sim 6.67\lambda$ 파장에 해당하는 $4.6\mu\text{m}$ 의 초점 거리(longitudinal focal length)를 가진다.

【0194】 한편, xy-평면상의 초점 평면(focal plane)에서, 집광된 빔 스폿(focused beam spot)은 최대값의 반에서 최대 폭(full-width at half-maximum, FWHM)으로 720nm의 폭을 가지며, 이는 $\sim 770\text{nm}(\sim \lambda/2\text{NA})$ 의 회절 제한 스폿 크기(diffraction limited spot size) 보다 작다.

【0195】 도 8은 본 발명의 일 실시 예에 따른 메타렌즈의 특성을 측정하기 위한 시스템 및 측정 결과를 나타낸다.

【0196】 광원으로 초연속 레이저(Supercontinuum laser)(SuperK compact, NKT Photonics)에서 방출되는 광대역의 무편광된 광(broadband unpolarized light)을 사용하였다.

【0197】 메타렌즈에서 투과된 광은 튜브 렌즈와 쌍을 이루는 대물렌즈를 통해 수집되며, 카메라상에서 xy-평면상의 강도 분포 이미지(intensity distribution image)를 추출할 수 있다.

【0198】 광이 샘플에 도달하기 전에, 글랜 톰슨 선형 편광자(Glan-Thompson linear polarizer)(GTH10M-A) 및 협대역 투과필터(narrow band-pass filter)(FB690-10, 중심 파장이 690nm 및 FWHM이 10nm 임)를 통해 좁은 스펙트럼 대역에

걸쳐 광은 선형적으로 편광되도록 변환되었다.

【0199】 도 8의 (a)를 참조하면, 서로 다른 편광 성분들의 강도 패턴(intensity patterns)을 모니터할 수 있도록 추가적인 선형 편광기를 통합시켰다.

【0200】 일반적으로 수직 입사하는 x-편광된 광의 경우, z-축을 따라 $2\mu\text{m}$ 씩 증가하면서 이미징 시스템을 변환시킴으로써, y-편광된 광의 강도 패턴(y-polarized intensity patterns)이 포착되었다.

【0201】 기록된 강도 패턴의 중심을 연결하는 횡선을 따라 강도를 추출함으로써 $z=0\mu\text{m}$ 의 위치에 메타렌즈가 배치되며, 도 8의 (b)에 도시된 바와 같이, 교차 편광된 광(the cross-polarized light)은 $z=60\mu\text{m}$ 에서 $z=75\mu\text{m}$ 까지의 범위에서 초점이 맞춰지는 것이 명확하게 밝혀졌다.

【0202】 필터의 0이 아닌 대역폭(the non-zero bandwidth of the filter) 및 메타렌즈의 색 분산 특성(the chromatic dispersion nature of the metalens) 때문에, 측정된 초점 프로파일은 도 7의 (b)에 표시된 시뮬레이션 결과와 비교하여 약간 더 늘어났다.

【0203】 또한, 도 8의 (b)에 도시된 Case 1을 참조하면, $z=68\mu\text{m}$ 에서 포착된 교차-편광된 강도 패턴 중 하나를 나타내며, 메타렌즈를 통과하는 빛은 초점 평면의 중심에서 밝은 점에 초점이 형성된다.

【0204】 이때, 점선인 원은 메타렌즈의 위치에 해당하며, 이를 고려할 때, 메타렌즈가 위치한 영역 밖에서는 빛이 보이지 않는다.

【0205】 또한, 도 8의 (b)에서 초점(focal spot) 주변에서 관측되는 광의 강도는 분석기 때문에 발생하는 것이며, 도 8의 (c)에 도시된 케이스 2처럼 분석기가 없는 경우, 집광된 광 스팟은 보다 미세한 원형을 띄며 균일한 광 강도가 분포되어 있는 것을 특징으로 한다.

【0206】 특히, 도 8의 (b)에 도시된 케이스 1을 참조하면, 메타렌즈 영역의 외부에서는 상대적으로 광 강도가 약하게 나타나는 것은, 입사 광선이 메타렌즈의 크기보다 크기 때문에 x-편광된 입사 광에 의해 발생하는 현상으로 보여진다.

【0207】 이것은 도 8의 (c)에 도시된 케이스 3에서 더 정확히 입증되는데, 분석기의 편광이 x축 방향을 따라 설정되는 경우, 즉, 분석기의 편광은 입사 편광과 평행한 경우, y-편광될 것으로 예상되었던 집광된 광 스팟이 사라진 것을 제외하면, 비슷한 강도 분포가 관찰되는 것을 그 증거로 들 수 있다.

【0208】 도 8의 (d)는 케이스 1 내지 3에 있어, 초점 중심을 가로지르는 1차원 강도 분포를 그래프로 나타냄으로써 상술한 분석을 요약 정리하였다. 케이스 1 및 2의 결과는 케이스 3을 고려하여 정규화되었다.

【0209】 이를 참조할 때, 집광된 광 스팟의 경우, E_y 및 E_x 구성요소 사이의 피크 강도 비율은 약 40 정도에 도달한 것을 알 수 있으며, 전반적으로 y-편광된 광이 집광된 광 스팟을 지배한다고 볼 수 있다.

【0210】 따라서, y-편광된 광이 집중 출력광인 경우, Malus의 법칙에 따라 분석기를 회전시켜 광 강도를 조절할 수 있음을 알 수 있다.

【0211】 또한, 고정된 출력 편광을 갖는 종래의 유전체 메타렌즈들과는 달리, 본 발명에 따른 메타렌즈에 의해 생성된 초점 스팟(focal spot)의 선형 편광은 입사 편광 각도를 조정함으로써 회전시킬 수 있다.

【0212】 여기에서, 출력 편광이 회전 가능하다는 것을 증명하기 위해, 선형 편광기를 회전시킴으로써 집광된 광 스팟의 강도를 모니터링 하였으며, 그동안 분석기의 편광은 y-축에 평행하도록 고정시켰다.

【0213】 도 9의 (a)는 입력 편광자가 $\varphi_{in} = 0^\circ$ 에서 $\varphi_{in} = 180^\circ$ 로 회전했을 때, 초점 스팟(focal spot)에서 측정된 피크 강도를 보여준다.

【0214】 동시 편광되어 $\varphi_{in} = 90^\circ$ 일 경우에 있어서 측정 결과와 이론 모두, 피크 강도를 나타내지 않았으며, 교차 편광되어 $\varphi_{in} = 0^\circ$ 와 $\varphi_{in} = 180^\circ$ 인 경우, 측정과 이론 모두 피크 강도는 최고점을 보였다.

【0215】 이러한 현상은 언뜻 보면 Malus의 법칙과 모순되는 것처럼 보인다. 하지만, 입사 편광 각도가 메타렌즈에 의해 변경되었다는 것을 고려하면 이해할 수 있는 현상이다.

【0216】 또한, 입사 편광이 $\varphi_{in} = 0^\circ$ 에서 $\varphi_{in} = 90^\circ$ 까지 변할 때, 초점이 맞춰진 출력 광의 선형 편광 각도를 정량적으로 조사하였다.

【0217】 이 경우에 있어서, 고정된 입사 편광 각도를 고려하여, 분석기를 회전시킴으로써, 검출된 강도가 최대에 도달했을 때 출력 편광을 결정하였다.

【0218】 또한, 최대 강도 지점을 식별하는 데 어려움이 있을 수 있으므로, 강도가 완전히 사라진 지점을 찾았다. 여기서 강도가 완전히 사라지는 지점이란 분석기의 편광이 출력 편광과 직각을 이루는 지점을 의미한다.

【0219】 이러한 분석을 바탕으로, 도 9의 (b)에서 오른쪽에 표시된 바와 같이, 분석기의 편광 각도 ($\varphi_{\text{analyzer}}$)는 φ_{in} 과 동일해야 한다.

【0220】 결국, 도 9의 (b)에 도시된 바와 같이, 측정된 편광 각도는 이론적으로 계산된 편광 각도와 일치한다.

【0221】 이러한 결과는 본 실시 예에 따른 메타렌즈가 반파장판(HWP) 및 포커싱 렌즈의 두 기능을 모두 가질 수 있다는 것을 뒷받침한다.

【0222】 즉, 본 발명에 따른 메타표면 및 메타렌즈는 오로지 유전체만으로 구성되어, 가시광 영역에서 동시에 편광 회전과 파면 형성을 할 수 있으며, 다양한 종류의 광학 디바이스들을 통합할 수 있고, 위상 전이(phase shift) 및 편광(light polarization)을 동시에 제어하는 기능을 갖고 있다.

【0223】 이러한 기능을 가진 본 실시 예에 따른 메타렌즈를 이용하면, 양자화 정보를 저장하여 대용량에 이르는 정보를 손쉽게 암호화할 수 있다.

【0224】 또한, 유전체로써 수소화 비정질 실리콘(a-Si:H)을 채택하여 제조 용이성, 저손실 및 높은 굴절률을 가진 메타렌즈를 구현하였다.

【0225】 본 발명에서는 엄격한 시뮬레이션을 통해, 반파장판처럼 동작하는 여덟 개의 나노 기둥들이 완전한 2π 위상을 제공하는 것을 확인할 수 있었다. 동

시에, 이러한 나노 기둥들로 인해 고전송의 효율이 일정하게 유지되었다.

【0226】 그 결과, 비정상적인 편향 효율, 편광 변환 효율 및 소광비에 있어서 종래보다 향상된 성능을 보이는 빔 디플렉터를 설계할 수 있었다.

【0227】 교차 편광에 의해 제한되는 정적 출력 편광을 보여주는 종래의 유전체 메타표면과는 다르게, 본 발명에 따른 메타표면은, 비정상적으로 편향된 광의 선형 편광이 단순히 입사 편광을 변화시키는 것만으로도, 높은 선형 편광도(DOLP)를 가지면서 연속적으로 회전된다.

【0228】 또한, 입력되는 광의 편광 각도를 조절함으로써, 초점이 맞춰진 스폿(focused spot)의 편광을 쉽게 회전시킬 수 있다.

【0229】 따라서, 본 발명에 따른 메타표면 및 메타렌즈는 상술한 설명 및 도면에 도시된 실험 결과에 나타난 바와 같이 종래의 메타표면들에 비하여 더 안정되고 완벽한 위상 및 편광 제어를 할 수 있다.

【0230】 또한, 본 발명에 따른 메타표면 및 메타렌즈는 종래의 메타표면에 비하여 현저하게 감소된 두께로 편광 변환이 가능하며, 하나의 판에 파장판, 포커싱 렌즈 및 편광 빔 스플리터(polization beam splitter) 등을 통합할 수 있으므로, 광학 디바이스 또는 시스템을 초소형, 초박막형으로 구성할 수 있게 한다.

【0231】 또한, 종래의 광학 디바이스에서 렌즈와 같은 구성요소의 정렬을 불필요하게 만든다.

【0232】 이하에서는 도 10을 참조하여 본 발명에 따른 메타표면 및 메타렌즈를 제조하는 방법에 대하여 설명한다.

【0233】 본 발명에 따른 메타표면 및 메타렌즈를 제조하는 방법에 대하여 설명함에 있어서, 본 발명에 따른 메타표면 및 메타렌즈와 동일한 구성 요소에 대하여는 설명 및 도면의 기재를 생략할 수 있으며, 동일한 도면 참조번호를 사용하여 설명할 수 있다.

【0234】 도 10을 참조하면, 본 발명에 따른 메타표면 및 메타렌즈를 제조하는 방법은 기판을 준비하는 단계(s1100), 상기 기판에 유전체 박막층을 증착시키는 단계(s1200), 기 유전체 박막층에 전자빔 레지스트 (electron beam resist)를 증착시키는 단계 (s1300), 전자빔 리소그래피 (electron beam lithography)를 통해 메타렌즈 패턴을 형성하는 단계(s1400), 상기 층에 알루미늄 층을 증착하여 리프트 오프 (lift-off) 하는 단계 (s1500), 상기 유전체 박막층에 에칭(etching)을 하여 메타렌즈 구조를 형성하는 단계 (s1600) 및 상기 메타렌즈 구조에 남아있는 잔여 알루미늄 층을 제거하는 단계(s1700)를 포함한다.

【0235】 이때, 기판을 준비하는 단계(s1100)는 기판의 표면에 존재하는 불순물을 제거하는 웨이퍼 클리닝을 하는 단계, 기판상의 수분을 제거하기 위해 디하이드레이션 베이킹(dehydration baking)을 하는 단계, 및 기판의 표면이 소수성을 띠도록 변형하는 프라임(priming)하는 단계로 구분된다.

【0236】 기판의 표면을 소수성으로 변환하는 과정이 종료되면, 기판을 준비하는 단계가 마무리되며, 이후, 상기 기판상에 화학 기상 증착법 (chemical vapor deposition)을 통해 유전체 박막 층을 증착시키는 단계(s1200)를 진행한다.

【0237】 이때, 본 실시 예에서는 수소화 비정질 실리콘(a-Si:H)을 320nm의 두께로 증착한다.

【0238】 수소화 비정질 실리콘(a-Si:H)의 증착이 완료되면, 상기 층에 스핀 코팅(spin-coated) 방법으로 전자빔 레지스트 (electron beam resist)를 증착하고, 소프트 베이킹(soft baking)를 한다(s1300).

【0239】 소프트 베이킹이 완료되면, 전자빔 리소그래피 (electron beam lithography)를 이용하여 메타표면 패턴을 형성하고, 전자빔이 조사된 레지스트를 제거하여 현상(development)하는 단계(s1400)를 진행한다.

【0240】 이후, 상기 층에 알루미늄(Al)을 증착하여 형성하고, 리프트 오프 (lift-off)를 수행하여 에치 마스크 (etch mask)를 형성하는 단계(s1500)를 진행하며, 이때, 상기 알루미늄 층의 두께는 60nm가 되도록 증착할 수 있다.

【0241】 에치 마스크가 형성되면, 상기 기판에 불소 기반의 유도 결합 플라즈마 반응성 이온 에칭(fluorine-based inductively coupled plasma-reactive ion etching)을 하여 메타렌즈 구조를 형성한다. (s1600)

【0242】 에칭(etching) 과정이 완료되면, 상기 기판에 습식 식각(wet etching)을 통해 남아있는 잔여 알루미늄 층을 제거하여 메타표면 및 메타렌즈를

최종 형성하는 단계(s1700)를 진행한다.

【0243】 또한, 본 발명에 따른 메타표면 및 메타렌즈를 제조하는 방법의 다른 실시 예는 상술한 실시 예에 비하여 간략한 과정으로 구성되며, 다음과 같은 과정을 포함한다.

【0244】 본 실시 예에 따른 메타렌즈 제조 방법은 우선, 플라즈마 강화 화학 기상 증착기(plasma-enhanced chemical vapor deposition)(Oxford, Plasmalab 100)를 통해, 유리 기판상에 320nm 두께의 수소화 비정질 실리콘(a-Si:H) 박막을 증착시킨다.

【0245】 그 다음 수소화 비정질 실리콘(a-Si:H) 박막 위에 전자빔 레지스트(electron beam resist)(ZEP520A)를 스핀 코팅(spin-coated)한다.

【0246】 이후, 전자빔 라이터(electron beam writer)(EBL, Raith150)로 기판상에 메타표면 패턴을 형성하고, 전자빔이 조사된 레지스트를 제거하여 현상(development)한다.

【0247】 이때, 전자빔이 조사된 부분의 레지스트(ZEP520A)는 제거되고, 메타표면 패턴이 남는다.

【0248】 이후 전자빔 증착기 (electron beam evaporation)를 통해, 패턴 위에 60nm 두께의 Al층을 증착시킨다.

【0249】 본 발명의 일 실시 예에 따르면, ZEP 리무버를 이용하여 리프트 오프 (lift-off)를 수행하면 레지스트 패턴은 제거되고, 알루미늄의 에치 마스크

(etch mask)가 형성된다.

【0250】 에치 마스크가 형성되면, 상기 기판에 불소 기반의 유도 결합 플라즈마 반응성 이온에칭(fluorine-based inductively coupled plasma-reactive ion etching)(Oxford, Plasmalab System 100)을 통해 메타렌즈 구조를 형성한다.

【0251】 에칭(etching) 이후, 상기 기판에 습식 식각(wet etching)을 통해 남아있는 잔여 알루미늄 층을 제거하고 최종적으로 수소화 비정질 실리콘(a-Si:H)의 나노 기둥(nanopost)만 기판 상에 남도록 하여 메타표면 및 메타렌즈를 형성한다.

【0252】 이와 같이 본 발명에 따른 메타렌즈는, 반파장판(half-wave plate)과 렌즈를 결합함으로써, 광학 장치에 필수적인 요소인 편광과 포커싱 기능을 동시에 컨트롤할 수 있는 가능성을 보여주었다.

【0253】 기존의 반파장판과 렌즈의 기능을 하나로 합치면서도 수백 nm 두께에 해당하는 매우 얇은 두께로 구현이 가능하다.

【0254】 여러 광학 소자들을 한 번에 사용할 경우, 이러한 광학 소자들을 모두 정렬해야 한다는 불편함이 있었지만, 본 발명을 사용할 경우 이러한 불편함은 없어지게 된다.

【0255】 증강 현실, 홀로그램 등의 기술을 간소화하는데 쓰이거나, 광 암호화, 보안, 라이다(LiDAR), 초박형 카메라 모듈 등의 응용 분야에 모두 적용될 수 있다.

【0256】 이상 첨부된 도면을 참조하여 본 발명의 실시 예들을 더욱 상세하게 설명하였으나, 본 발명은 반드시 이러한 실시 예로 국한되는 것은 아니고, 본 발명의 기술사상을 벗어나지 않는 범위 내에서 다양하게 변형 실시될 수 있다.

【0257】 따라서, 본 발명에 개시된 실시 예들은 본 발명의 기술 사상을 한정하기 위한 것이 아니라 설명하기 위한 것이고, 이러한 실시 예에 의하여 본 발명의 기술 사상의 범위가 한정되는 것은 아니다. 그러므로 이상에서 기술한 실시 예들은 모든 면에서 예시적인 것이며 한정적이 아닌 것으로 이해해야만 한다. 본 발명의 보호 범위는 아래의 청구범위에 의하여 해석되어야 하며, 그와 동등한 범위 내에 있는 모든 기술 사상은 본 발명의 권리범위에 포함되는 것으로 해석되어야 할 것이다.

【부호의 설명】

【0260】 #1, #2, #3, #4, #5, #6, #7, #8: 제1 내지 제8단위 셀

【청구범위】**【청구항 1】**

기판; 및

상기 기판 위에 형성되는 적어도 한 개 이상의 나노 기둥들을 포함하며,

상기 나노 기둥은 유전체만으로 구성되며 직육면체의 형상을 가지고,

상기 기판의 가로축을 제1축, 상기 기판의 세로축을 제2축이라고 할 때, 상기 나노 기둥은 상기 제1 및 제2축과 각각 45도의 각도를 이루면서 상기 기판상으로부터 수직하는 방향으로 연장 형성되는, 메타표면.

【청구항 2】

청구항 1에 있어서,

상기 나노 기둥은 상기 기판과 접하는 면과 마주보는 면이 평면이 되도록 면 처리된, 메타표면.

【청구항 3】

청구항 1에 있어서,

상기 기판은 이산화규소(SiO_2)로 구성되고,

상기 유전체는 수소화 비정질 실리콘(a-Si:H)인, 메타표면.

【청구항 4】

일정한 단위 면적으로 구분될 수 있는 기관;

유전체만으로 이루어지고, 상기 기관상에 형성되는 복수의 나노 기둥들을 포함하며,

상기 단위 면적 당 한 개의 나노 기둥이 형성되는 복수의 단위 셀들을 포함하고,

상기 나노 기둥은,

직육면체의 형상을 가지며, 상기 기관의 가로축을 제1축, 상기 기관의 세로축을 제2축이라고 할 때, 상기 제1 및 제2축과 각각 45도의 각도를 이루면서 상기 기관상으로부터 수직 하는 방향으로 연장 형성되고, 상기 단위 면적은 240nm*240nm인, 메타표면.

【청구항 5】

청구항 4에 있어서,

상기 복수의 단위 셀들은,

제1 내지 제8단위 셀들 및 상기 제1 내지 제8단위 셀 각각에 형성된 제1 내지 제8 나노 기둥들을 포함하며

상기 제1 내지 제8 나노 기둥은 수소화 비정질 실리콘(a-Si:H)으로만 구성된, 메타표면.

【청구항 6】

청구항 5에 있어서,

상기 제1 내지 제8 나노 기둥 각각의 가로, 세로 및 높이의 크기가 각각 서로 다른, 메타표면.

【청구항 7】

청구항 5에 있어서,

상기 제1 내지 제8 나노 기둥은 가로, 세로의 크기가 각각 다르고 일정 높이를 가지는 것으로서, 상기 가로 세로의 크기 치수의 변화에 따라 상기 메타표면에 투과된 y 편광이 0에서 2π 까지 제어되는 것을 특징으로 하는 메타표면.

【청구항 8】

일정한 단위 면적으로 구분된 기판;

상기 단위 면적에 따라 구분된 기판상에 형성되는 나노 기둥을 포함하는 복수의 단위 셀들을 포함하며,

상기 복수의 단위 셀들은,

제1 내지 제8단위 셀들 및 상기 제1 내지 제8단위 셀 각각에 형성된 제1 내지 제8 나노 기둥들을 포함하고,

상기 제1 내지 제8 나노 기둥들 각각은,

상기 기관의 가로축을 제1축, 상기 기관의 세로축을 제2축이라고 할 때, 상기 제1 및 제2축과 각각 45도의 각도를 이루면서 상기 기관상으로부터 수직 하는 방향으로 연장 형성되며, 유전체만으로 구성되고, 직육면체의 형상을 가지며,

상기 제1 내지 제8단위 셀은 서로 연결되어 슈퍼 셀을 형성하고,

상기 제1 내지 제8 나노 기둥들 중 적어도 4개의 나노 기둥과 다른 4개의 나노 기둥은 각각 90도 각도를 이루면서 마주보도록 배치되는, 메타렌즈.

【청구항 9】

청구항 8에 있어서,

상기 제1축 및 제2축의 길이를 나타내는 피치 Λ 는 240nm인, 메타렌즈.

【청구항 10】

청구항 9에 있어서,

복수 개의 상기 슈퍼 셀이 서로 연결되어 원판을 이루고,

상기 원판의 직경과 초점 길이(focal length)는 $60\mu\text{m}$ 인, 메타렌즈.

【청구항 11】

기판을 준비하는 제1단계;

상기 기판에 유전체 박막 층을 증착시키는 제2단계;

상기 유전체 박막층에 전자빔 레지스트 (electron beam resist)를 증착시키는 제3 단계;

전자빔 리소그래피 (electron beam lithography)를 통해 메타렌즈 패턴을 형성하는 제4 단계;

상기 층에 알루미늄 층을 증착하여 리프트 오프(lift-off)하여 에치마스크를 형성하는 제5 단계;

상기 유전체 박막 층에 에칭(etching)을 하여 메타렌즈 구조를 형성하는 제6 단계; 및

상기 메타렌즈 구조에 남아있는 잔여 알루미늄 층을 제거하는 제7단계를 포함하는, 메타표면 및 메타렌즈 제조방법.

【청구항 12】

청구항 11에 있어서,

상기 제1단계는,

상기 기판의 표면에 존재하는 불순물을 제거하는 웨이퍼 클리닝을 하는 제1-1 단계;

수분을 제거하는 디하이드레이션 베이킹(dehydration baking)을 하는 제1-2 단계;

상기 기관의 표면이 소수성을 띄도록 변형하는 프라임하는 제1-3 단계를 더 포함하는, 메타표면 및 메타렌즈 제조방법.

【청구항 13】

청구항 11에 있어서,

상기 제2단계는,

상기 기관상에 화학 기상 증착법 (chemical vapor deposition)을 통해 유전체 박막 층을 증착하는 제2-1 단계를 더 포함하며,

상기 유전체 박막 층은 수소화 비정질 실리콘(a-Si:H) 층이고,

상기 수소화 비정질 실리콘(a-Si:H) 층의 두께는 320nm가 되도록 증착하는, 메타표면 및 메타렌즈 제조방법.

【청구항 14】

청구항 11에 있어서,

상기 제3단계는,

스핀 코팅(spin-coated) 방법으로 전자빔 레지스트 (electron beam resist)를 증착하는 제3-1 단계;

소프트 베이킹(soft baking)를 하는 제3-2 단계를 더 포함하는, 메타표면 및 메타렌즈 제조방법.

【청구항 15】

청구항 11에 있어서,

상기 제4단계에서,

전자빔 리소그래피(electron beam lithography)를 이용하여 메타표면 패턴을 형성하고, 전자빔이 조사된 레지스트를 제거하여 현상 (development)하는 4-1단계를 더 포함하는, 메타표면 및 메타렌즈 제조방법.

【청구항 16】

청구항 11에 있어서,

상기 제5단계는,

상기 층에 알루미늄(Al)을 증착하여 형성하고, 상기 알루미늄 층의 두께는 60nm가 되도록 하는 5-1단계; 및

리프트 오프 (lift-off)를 수행하여 에치 마스크 (etch mask)를 형성하는 5-2단계를 더 포함하는, 메타표면 및 메타렌즈 제조방법.

【청구항 17】

청구항 11에 있어서,

상기 제6단계는,

상기 기관에 불소 기반의 유도 결합 플라즈마 반응성 이온에칭 (fluorine-based inductively coupled plasma-reactive ion etching)을 행하는 제6-1 단계를 더 포함하는, 메타표면 및 메타렌즈 제조방법.

【청구항 18】

청구항 11에 있어서,

상기 제7 단계는,

상기 기관에 습식 식각(wet etching)을 통해 남아있는 잔여 알루미늄 층을 제거하는 제7-1 단계를 더 포함하는, 메타표면 및 메타렌즈 제조방법.

【요약서】**【요약】**

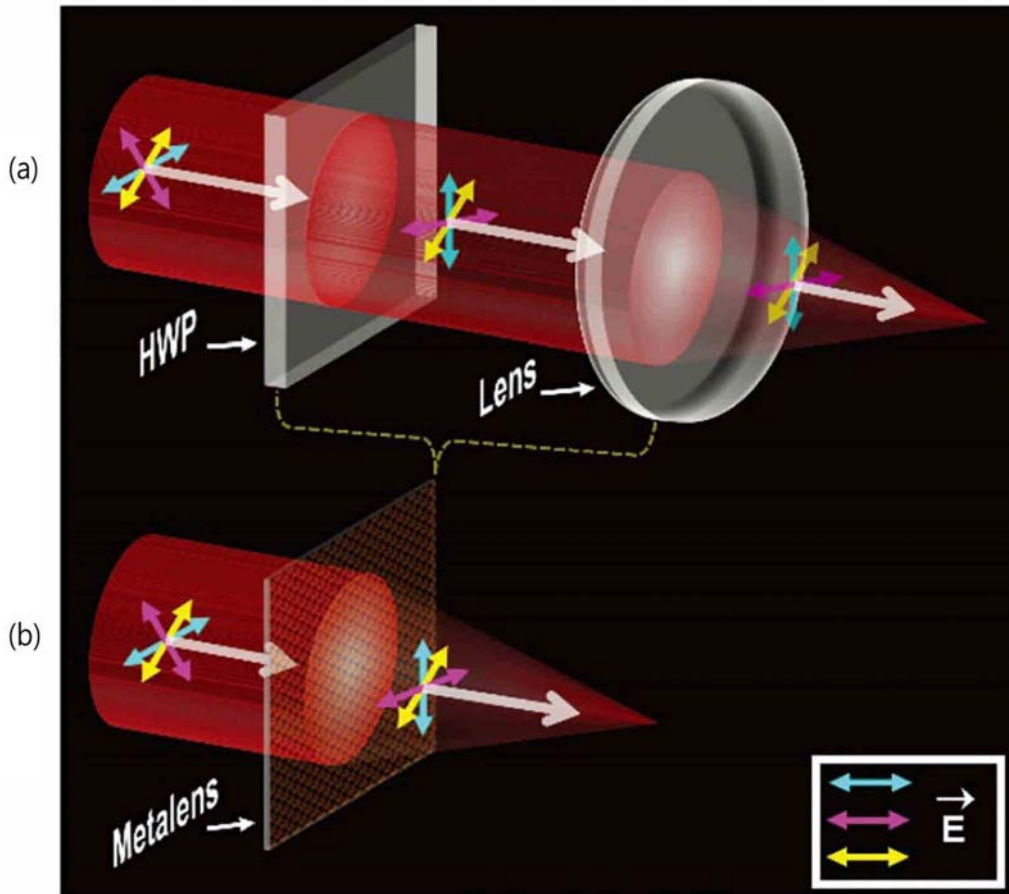
본 발명은 편광과 포커싱 제어가 가능한 반파장판 메타표면, 메타렌즈 및 이들의 제조방법에 관한 것으로, 본 발명의 일 실시예에 따른 메타표면은 기판 및 상기 기판 위에 형성되는 적어도 한 개 이상의 나노 기둥들을 포함하며, 상기 나노 기둥은 유전체만으로 구성되며 직육면체의 형상을 가지고, 상기 기판의 가로축을 제1축, 상기 기판의 세로축을 제2축이라고 할 때, 상기 나노 기둥은 상기 제1 및 제2축과 각각 45도의 각도를 이루면서 상기 기판 상으로부터 수직하는 방향으로 연장 형성된다.

【대표도】

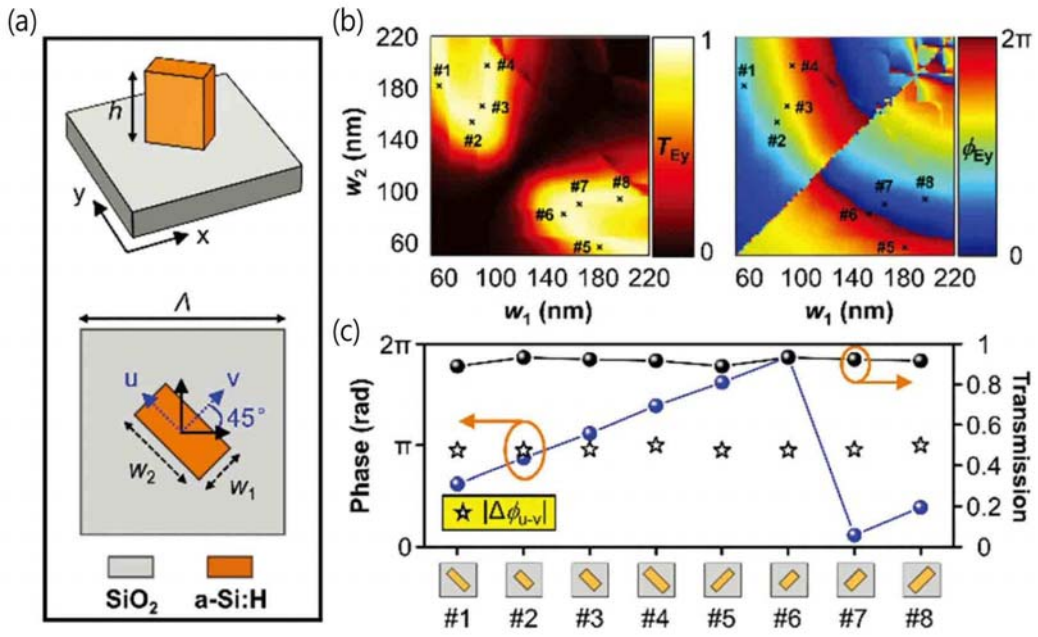
도 1

【도면】

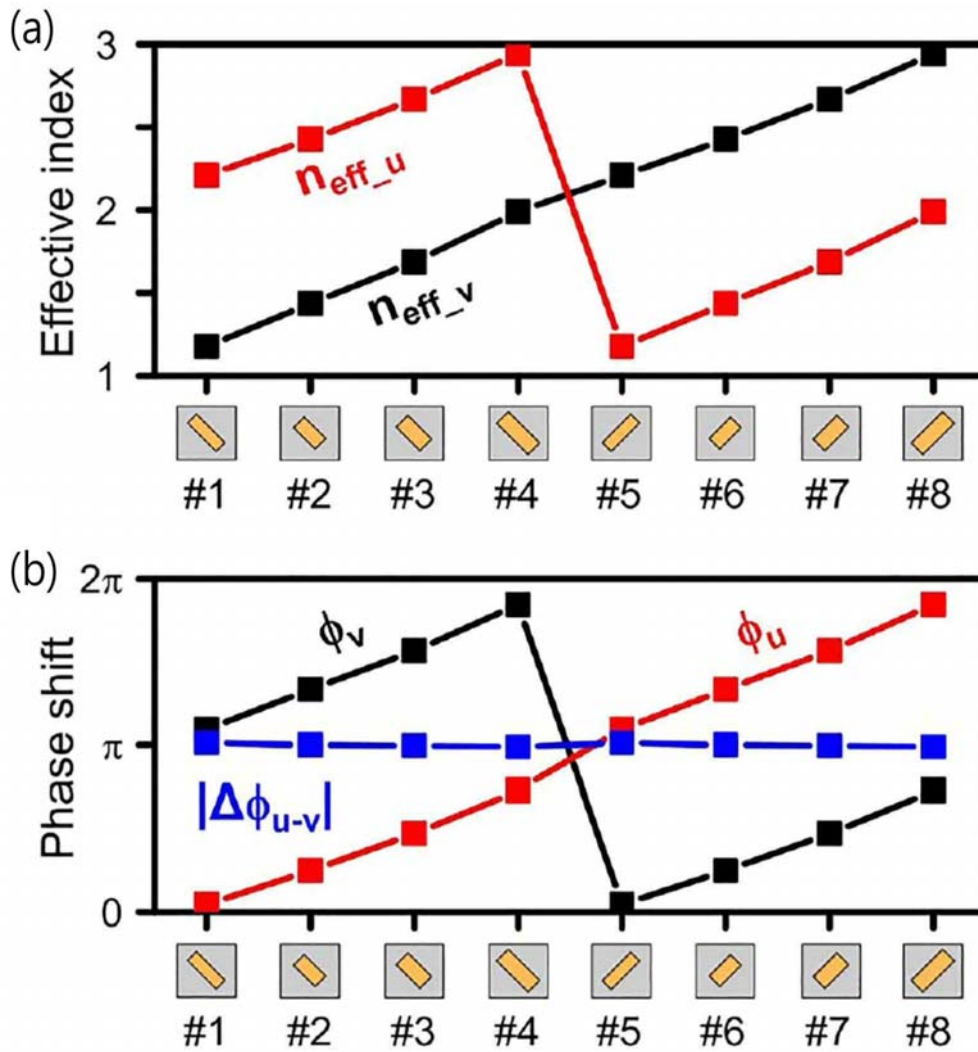
【도 1】



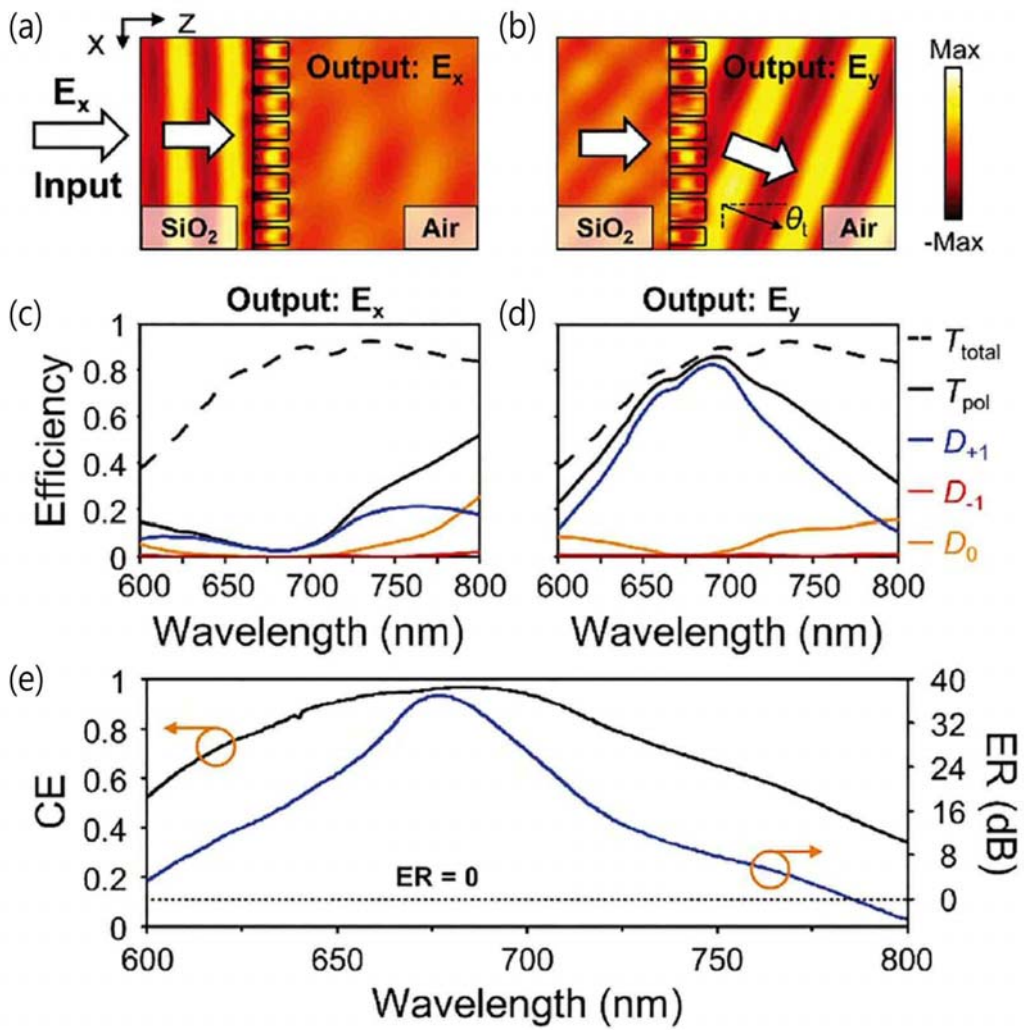
【도 2】



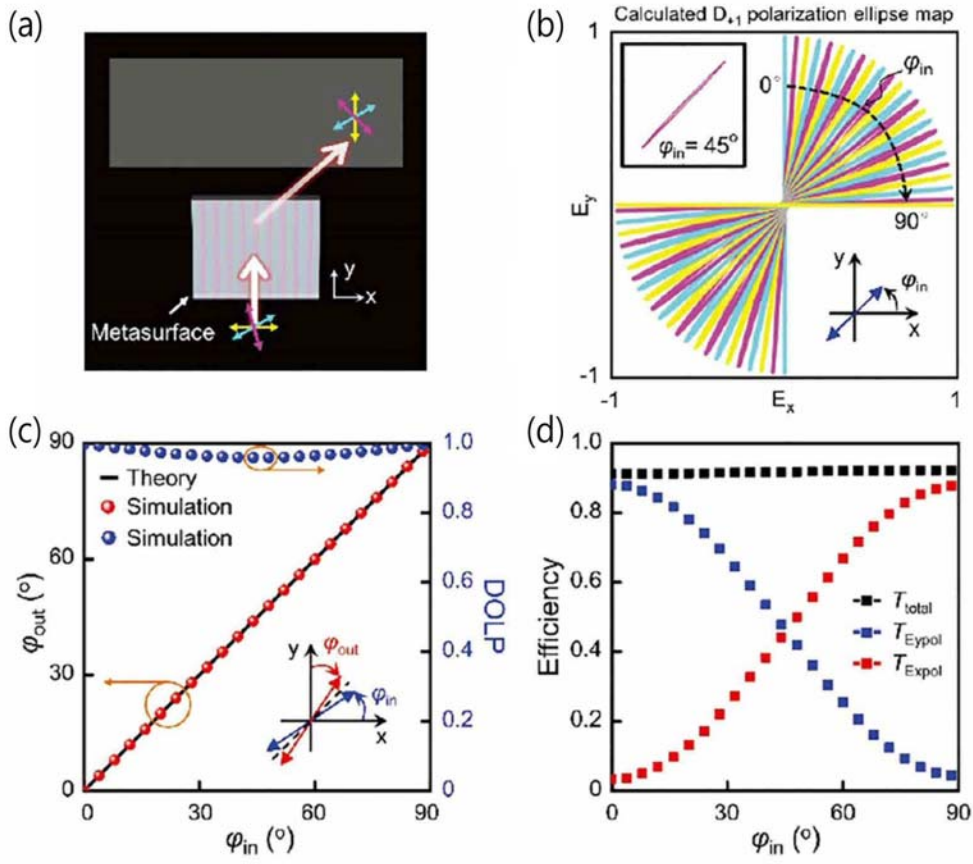
【図 3】



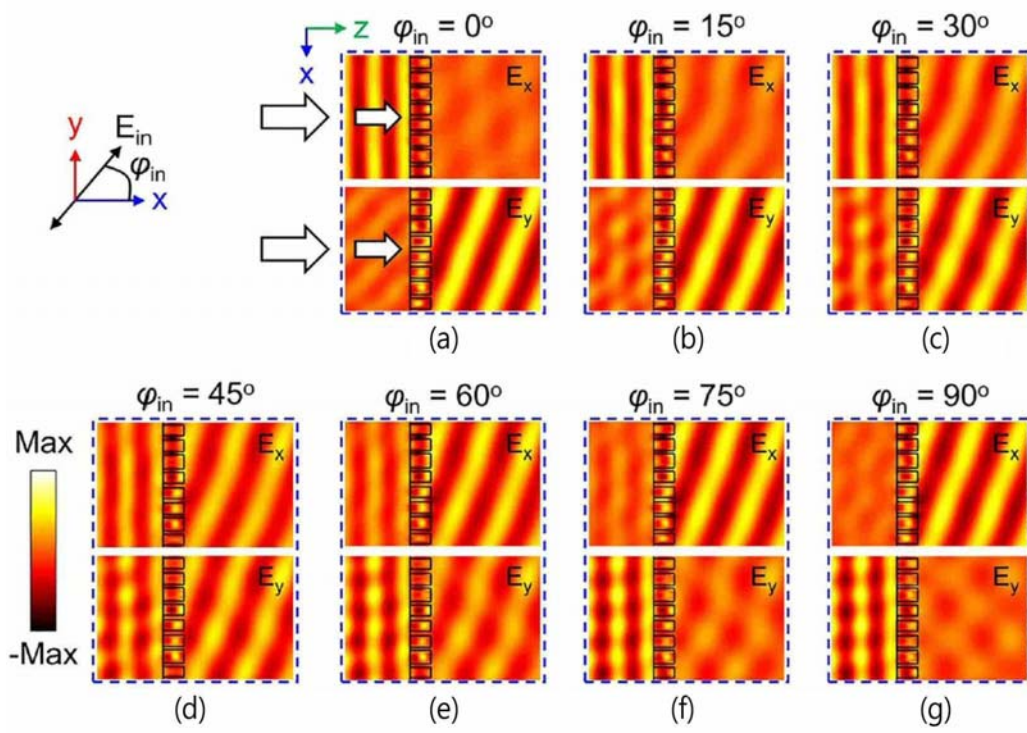
【도 4】



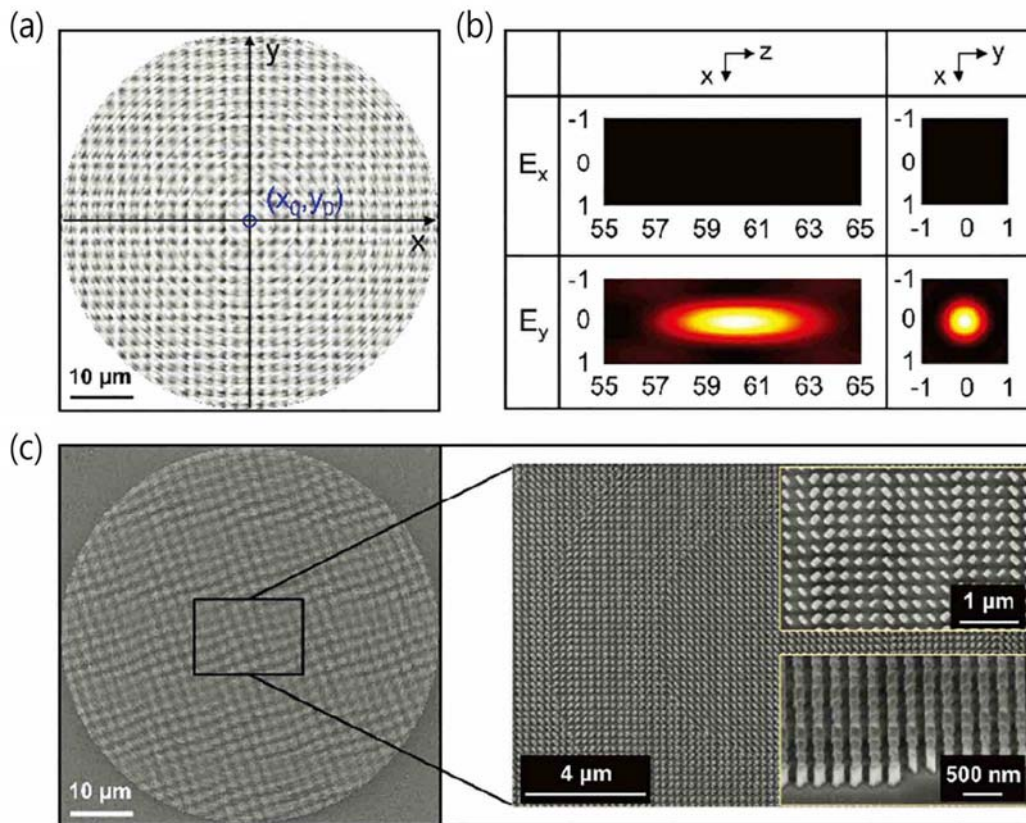
【도 5】



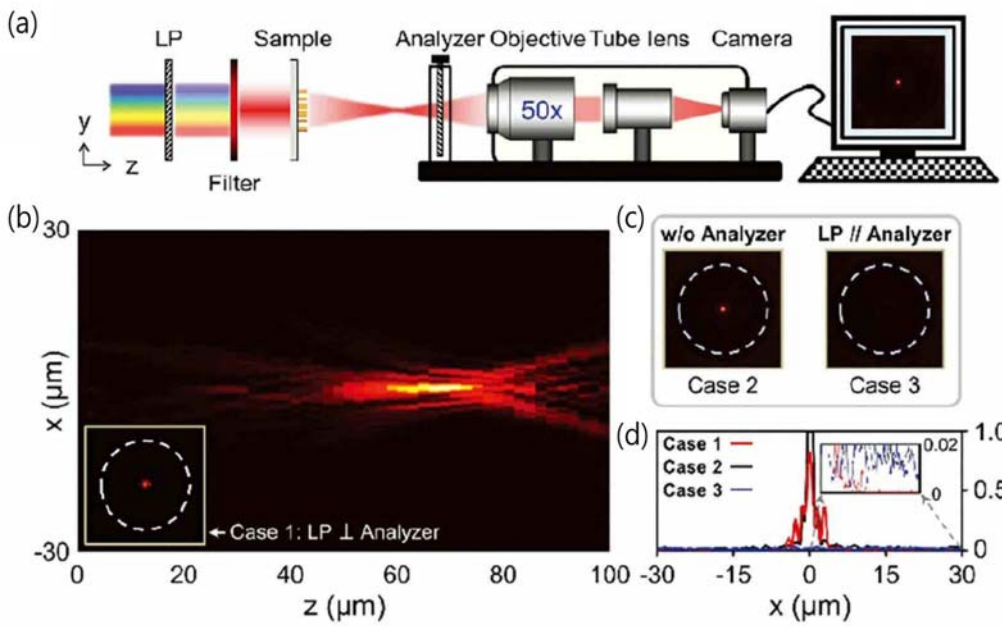
【도 6】



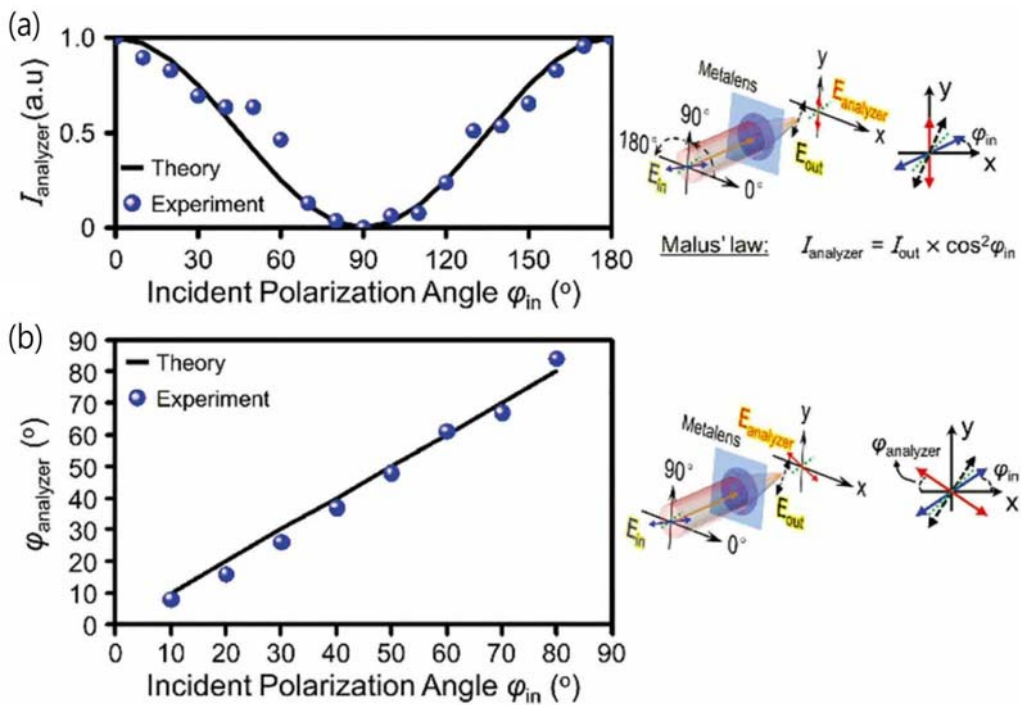
【도 7】



【도 8】



【도 9】



【도 10】

