《연구논문》 Korean Journal of Optics and Photonics, Volume 24, Number 2, April 2013
DOI: http://dx.doi.org/10.3807/KJOP.2013.24.2.053

금속 슬릿 배열로 구성된 편광 선택 가능한 블레이즈드 회절 격자

정영진†

울산과학대학교 전기전자공학부
㊀ 680-749 울산시 남구 대학로 57

(2013년 3월 25일 받음, 2012년 4월 19일 수정본 받음, 2013년 4월 19일 게재 확정)

본 논문에서는 금속 슬릿 배열로 구성된 편광 선택 가능한 블레이즈드 회절 격자를 제안한다. 마이크로 스케일의 블레이즈드 회절 격자를 디자인 하고 이 구조에 추가적으로 나노스케일의 금속 슬릿 구조를 적용하여 편광 선택기능을 부여하였다. 이 소자에 대하여 사례 연구로 예를 디자인하여 FDTD(Finite Difference Time Domain method)방법을 이용한 전산모사를 통해 성능을 검증해 보았다. 임의의 디자인 사례에 대해 대략 77.61% 의 회절효율과 8.99의 편광선택비가 얻어졌으며 편광선택비를 높이기 위한 또 다른 디자인에서는 64.22% 의 회절효율과 81.09의 편광선택비가 얻어졌다.

Polarization Selective Blazed Grating Employing Metal-slit Arrays

Young Jin Jung†

School of Electricity and Electronics, Ulsan College, Ulsan 680-749, Korea

(Received March 25, 2013; Revised manuscript April 19, 2013; Accepted April 19, 2013)

A polarization selective blazed grating employing metal-slit arrays was proposed. Nano-scale metal-slits were applied to the micro-scale blazed grating to give the functionality of polarization selection. Case study was carried out for the proposed structure utilizing numerical FDTD (Finite Difference Time Domain method) simulation. Diffraction efficiency of 77.61% and polarization extinction ratio of 8.99 was achieved with arbitrary parameters and diffraction efficiency of 64.22% and polarization extinction ratio of 81.09 was achieved with other parameters to enhance extinction ratio.

Keywords: Metal slit array grating, Wire grid polarizer, Blazed grating, Surface plasmon
OCIS codes: (050.0050) Diffraction and gratings; (240.6680) Surface plasmons

I. 서 론

빛을 원하는 형태로 조절하기 위해 빛의 파장 보다 큰 마이크로미터 스케일의 구조물을 이용한 소자들이 많이 이용되어 왔다. 그 중 대표적인 예로 회절 격자를 들 수 있다.[1] 이때 대부분의 경우 나노미터 스케일의 구조물을 필요로 하지 않는데, 이는 빛을 공간적으로 원하는 곳에 모으거나 퍼뜨리거나 혹은 원하는 방향으로 보내는 등의 일을 할 때 빛의 파장보다 큰 구조물을 이용해도 충분하기 때문이다.

한편, 최근에는 제조 기술의 발달로 마이크로미터 스케일보다 더 미세한 나노미터 스케일의 구조에 대한 연구가 많이 이루어지고 있으며 이와 함께 이러한 미세구조를 가지는 금속에서의 플라즈몬 현상에대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 매우 짧은 광 접속 거리를 가지도록 하는 커플러에 대한 연구,[2] 금속 슬릿 사이의 거리에 따라 지나가는 빛이 플라즈몬파로 되어 느끼는 유효굴절률 차이를 이용하여 빛의 방향을 조절하는 것에 대한 연구,[3-5] 또한 이러한 금속 슬릿을 이용한 나노렌즈에 금속 막대기(rod)를 두어 빛을 분리하는 것에 대한 연구,[6] 금속 슬릿 나노렌즈를 이용한 이미징,[7] 반도체 레이저에 나노구조의 격자를 두어 유도된 플라즈몬으로 빛을 모아주는 연구[8, 9]등이 있다. 또한, 잘 알려진 wire grid polarizer의 성능을 개선하는 연구들도 이루어지고 있다.[10-13]

한편, 마이크로미터 스케일의 구조물을 이용한 소자와 나노 스케일의 구조물을 이용한 소자의 연구는 각각 이루어져 왔으며 마이크로미터 스케일의 구조와 나노미터 스케일의 구조가 조합되어 같이 사용되는 소자에 대한 연구는 아직까지는 많지 않다.

†E-mail: yjjung1980@gmail.com
Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

본 연구에서는 마이크로 구조에 의한 현상과 나노구조에 의한 현상을 동시에 이용하는 소자를 제안하고 각각의 기능이 동시수행 가능한지를 확인하고자 한다. 마이크로미터 스케일의 구조배열로 회절격자를 만들고 동시에 나노미터 스케일의 금속 구조를 이용해 플라즈몬을 일으켜 편광선택의 기능(wire grid polarizer)을 부여할 수 있다. 이러한 두가지 기능을 동시에 갖는 것이 가능한지를 밝히기 위해 편광 선택이 가능한 블레이즈드 회절 격자를 제안하고 각각의 기능의 수행이 동시에 가능한지를 밝힌다.

II. 설계 및 방법

그림 1(a)는 금속을 사용한 일반적인 반사형 블레이즈드 회절 격자를 나타내고 있다. 블레이즈드 회절격자는 빛이 반사되는 각도와 회절로 인해 보강간섭이 일어나는 각도가 일치하는 회절 격자이다. 회절 격자는 빛의 편광 상태와 상관없이 모든 빛에 대해서 빛을 회절시키며 격자의 역할을 하게 된다. 본 연구에서는 편광에 선택적으로 반응하는 회절격자를 제안한다. 그 구조는 그림 1(b)와 같이 나노스케일의 금속 슬릿 구조가 적용하고 있다. 이 나노구조는 슬릿의 간격이 충분히 좁을 때 하나의 편광은 투과되고 다른 편광은 반사되는 현상을 이용하는 것이다. 금속 슬릿을 통과하는 편광은 금속 슬릿의 내부를 플라즈몬 형태로 통과할 수 있지만 통과하지 못하는 편광은 플라즈몬 모드가 형성되지 않아 통과하지 못하게 된다. 이 원리는 wire grid polarizer에 적용되어 고온에서의 높은 신뢰도를 갖는 편광자로 PBS(polarization beam splitter), 프로젝터 등에 사용되고 있다.[10, 12]

그림 1(b)와같이 제안하는 구조물이 회절격자의 기능과 편광의 기능을 동시에 잘 수행하는지를 확인해 보기 위해 한가지 사례를 디자인하여 FDTD (Finite Difference Time Domain method)를 이용한 전산모사를 통해 검증해 보았다.

그림 2는 나노스케일의 금속 슬릿 구조의 상세한 설명을 나타내고 있으며 사례연구를 위해 사용된 변수의 값은 표 1에 정리되어 있다. 여기서 l은 금속과 금속 사이의 거리를 나타내며 w는 금속의 너비를 나타낸다. 그리고 θ_s는 회절격자 형상의 각도이다. 여기서 빛이 반사되어 나가는 반사각(θ_r)은 θ_s의 두배가 된다. 이와 같은 변수값을 가지고 실제로 제작하는데에는 어려움이 있을 것으로 생각되며 이를 극복하기 위해서는 마이크로스케일의 구조물을 미리 만들고 그 위에 같은 높이의 금속층으로 쌓는 등의 제작을 위한 노력이 있어야 할 것으로 판단되나 이것은 본 연구에서는 논외이며 전산모사를 통해 이론적인 빛의 현상을 밝히는 것에 목적을 두기로 한다.

한편, 회절이 일어나는 각도와 회절이 일어나는 파장의 관계는 식(1)과 같다.

$$m\lambda_m = d\sin\theta_m \tag{1}$$

여기서 m은 임 의의 정수로 회절 차수를 의미하며, λ_m는 회절되는 빛의 파장, d는 회절 격자의 주기, θ_m은 회절이 일어나는 각도를 나타낸다. 여기서 1차(m=1) 회절각 θ_1을 θ_r과

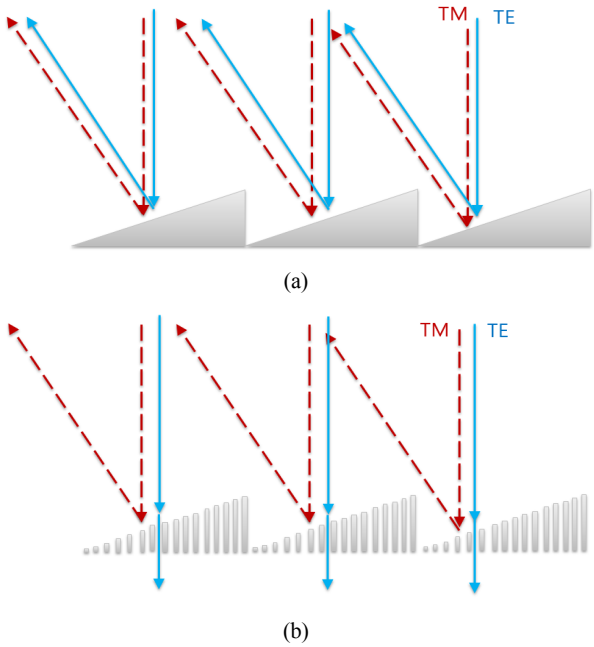


FIG. 1. Wave behavior of each polarization for the normal blazed grating (a) and proposed polarization selective blazed grating (b); In the case of (a) both TM and TE are reflected and the case of (b) TM is reflected and TE is transmitted.

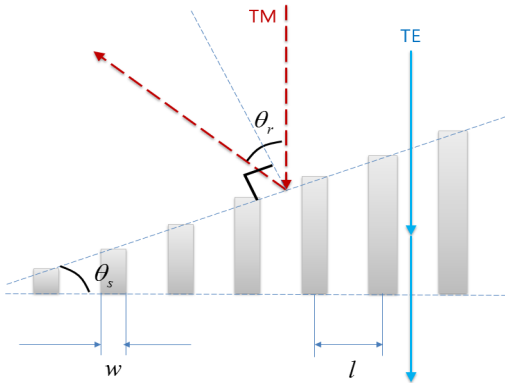


FIG. 2. Detailed structure description of the proposed polarization selective blazed grating where, θ_s is the grating slope of shape, θ_r is the reflection angle, w is the width of metal and l is the length between metals respectively.

TABLE 1. Parameters and used values for the study

Parameters	values
d	1.5 μm
l	100 nm
w	50 nm
θ_s	$\tan^{-1}(1/5) = 11.3^\circ$

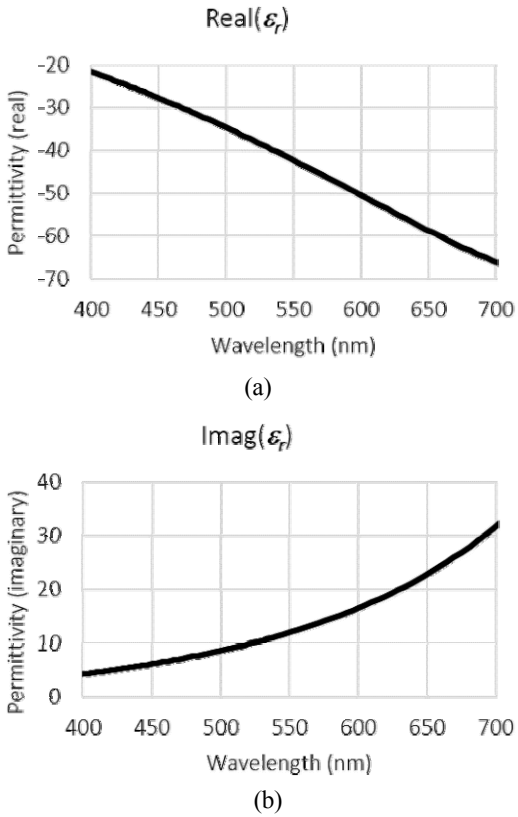


FIG. 3. Relative permittivity of the metal (Al) used for the simulation; (a) is real value and (b) is imaginary value. (Extracted from the simulation software of FDTD Solutions by Lumerical Solutions, Inc.)

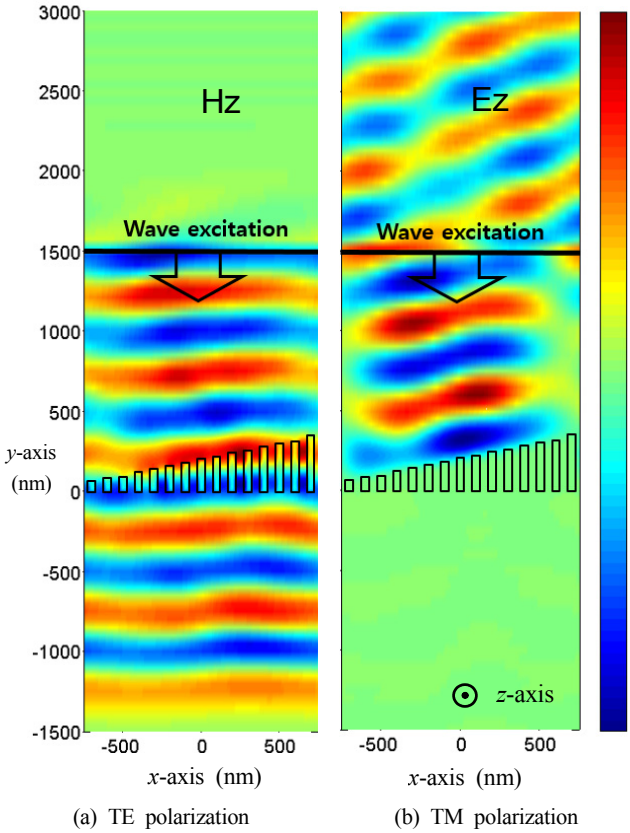


FIG. 4. (a) Hz field distribution for the TE polarization incidence and (b) Ez field distribution for the TM polarization incidence. It can be observed that the most of excited wave is transmitted for the case of TE (a) and the most of excited wave is reflected with reflection angle for the case of TM (b).

동일하게 하면 θ_I에서 최대 효율이 나타나는 블레이즈드 회절격자를 만들 수 있다. 이렇게 소자를 만들 경우 식 (1)에 의해 최대 회절이 일어나는 파장를 계산해 보면 대략 λ_I=576 nm가 (θ_r=2θ_s=22.6°, λ_I=1500 nm×sin22.6°) 된다.

표 1의 값을 가지고 디자인한 소자를 한 주기에 대해서 전산모사영역을 잡고 *x*-축 방향의 경계조건을 *Bloch* boundary condition으로 하여 반복되는 구조가 계산되도록 해 주었다. 그리고 *y*-축 방향의 경계조건은 PML(Perfectly Matched Layer)를 적용하였다. 여기서, 금속은 알루미늄을 가정하였으며 이 알루미늄에 대한 유전율값은 상용 FDTD 프로그램인 Lumerical Solution의 material database에 있는 그림 3와 같은 값을 사용하여 전산모사에 적용하였다.[14]

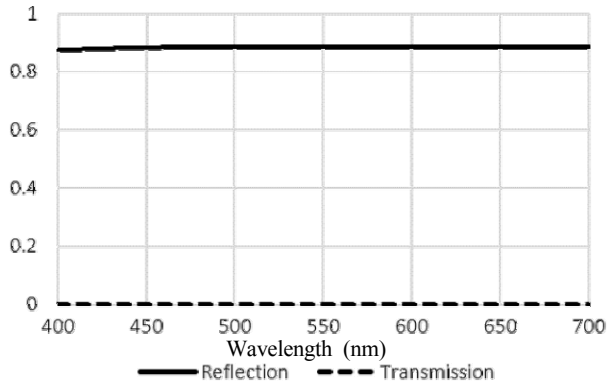
III. 결 과

그림 4는 파장 576 nm의 빛을 가정한 FDTD전산모사의 결과로 전자기장의 분포를 통해 빛의 진행을 보여주고 있다. *Bloch* boundary condition을 적용하여 이루어진 전산모사의 결과로 한 주기에 대해서만 분포를 나타내고 있다. 전체 주기에 대한 전자기장의 분포는 이러한 빛의 분포가 주기적으로 연결되어 있는 모습이 된다.

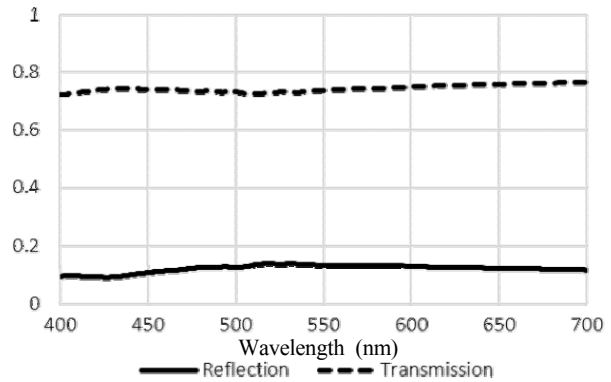
먼저 그림 4(a)는 TE(Transverse Electric to z-axis)편광의 빛이 입사했을 경우 Hz의 분포를 나타내고 있으며 빛이 금속슬릿을 통과하여 진행하고 있는 모습을 볼 수 있다. 이때, 통과하는 빛은 슬릿 내부에서 플라즈몬 모드를 형성하며 통과가 가능하다. 결과에서는 빛이 통과할 때 굴절이 거의 없이 통과하는 모습을 볼 수 있다. 그러나 필요할 경우 금속 슬릿의 간격을 조절하여 빛이 굴절되도록 할 수 도 있다. 금속 슬릿의 간격(d)이 작을수록 유효 굴절률이 증가하게되어 통과하는 빛에 대해서도 빛의 굴절을 조절할 수 있다.[2-3] 그림 4(b)의 경우는 TM편광의 빛이 입사했을 경우 Ez의 분포를 나타내고 있으며 빛이 금속 슬릿의 구조물을 통과하지 못하고 반사하는 모습을 볼 수 있다. 이렇게 반사되는 빛들은 주기적으로 배열되어있는 마이크로 스케일의 격자에 의해서 회절효과를 나타내게 된다. 즉, 블레이즈드 회절격자가 TE편광에 대해서는 반응하지 않고 TM(Transverse Magnetic to z-axis)편광에 대해서만 반응을 하게 되는 것을 볼 수 있다.

그림 5은 투과율(투과광의 파워/입사광의 파워)과 반사율(반사광의 파워/입사광의 파워)을 나타내고 있다. 먼저 TM편광에 대해서 우리가 관심있는 576 nm 파장 대역에서 반사는 대략 89%, 투과는 대략 0.02% 정도로 대부분 반사되는 것을

알 수 있었다. 반사와 투과를 제외한 나머지 파워는 흡수되는 손실로 볼 수 있다. TE편광에 대해서는 576 nm 파장 대역에서 반사가 대략 13%, 투과는 대략 74% 정도로 대부분 투과하는 것을 볼 수 있다. 필요한 경우 금속의 종류와 금속 슬릿사이의 거리 또, 금속 슬릿의 길이 등을 조절하여 반사율과 투과율을 조절할 수 있다.



(a) Transmittance and Reflectance for TM polarization



(b) Transmittance and Reflectance for TE polarization

FIG. 5. Total transmittance and reflectance for (a) TM and (b) TE polarization as a function of wavelength.

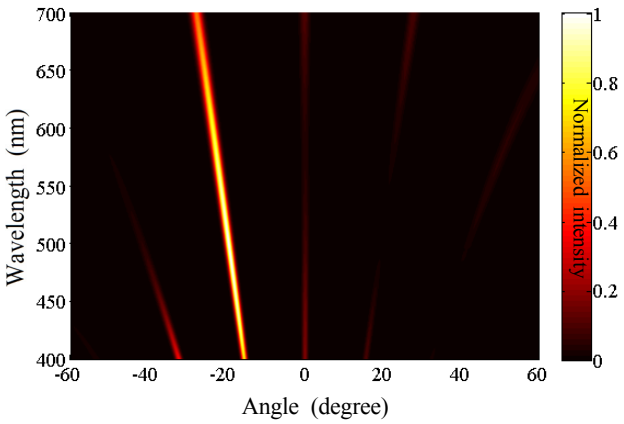


FIG. 6. Diffracted intensity as a function of wavelength and angle (10 period of gratings are assumed). Peak intensity is at around -22.6° for the 576 nm wavelength where we are considering in the case study.

그림 6은 TM편광의 빛에 대한 블레이즈드 회절격자의 파장에 따른 회절특성을 확인하기 위해 회절된 빛의 Far-field 세기를 나타내었다. 회절 각도와 파장에 따라 회절되어 나가는 빛의 세기를 나타내고 있으며 우리가 관심있는 576 nm 대역에서는 -22.6°의 방향으로 회절이 일어나는 것을 확인할 수 있다.

그림 7은 각 차수(m=0, ±1, ±2)에 따른 회절효율을 계산하여 나타내었다. 여기서, 회절효율은 $\eta=P/P_0$이며 P는 회절된 빛의 파워, P_0는 입사된 빛의 파워이다. 블레이즈드 회절이 일어나는 -22.6° 방향에서 회절효율이 77.61% 가 되는 것을 볼 수 있다.

표 2는 일반 블레이즈드 회절격자와 제안하는 회절격자에서 금속 사이의 거리에 따른 성능을 비교하여 나타내고 있다. 일반 회절 격자는 TE, TM편광 모두 반사율이 높고 편광 선택기능이 없는 것을 볼 수 있다. 반면에 제안하는 구조를 적용하여 l을 100 nm로 할 경우 앞에서 밝힌대로 77.61% 의 회절 효율로 일반 회절격자의 TM편광의 77.83% 의 회절격자와 거의 유사한 성능을 보이면서도 편광 선택기능이 있는

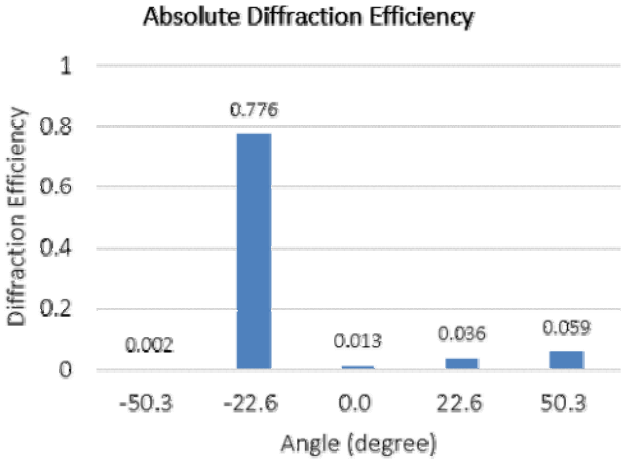


FIG. 7. Absolute diffraction efficiency ($\eta=P/P_0$) of the designed grating for the TM wave incidence where, P is diffracted power and P_0 is the incident power.

TABLE 2. Performance comparison between normal grating and proposed structure

	Normal grating		Proposed structure			
			l = 100 nm, w = 50 nm		l = 250 nm, w = 50 nm	
	TM	TE	TM	TE	TM	TE
Reflection	90.39%	88.74%	88.66%	12.76%	69.10%	1.62%
Relative diffraction efficiency	86.10%	96.44%	87.54%	67.66%	92.93%	48.88%
Absolute diffraction efficiency	77.83%	85.58%	77.61%	8.64%	64.22%	0.79%
Extinction ratio	0.91		8.99		81.09	

것을 볼 수 있다. 그러나 wire gird polarizer 상용 제품의 extinction ratio가 500이상인[10] 것을 감안하면 extinction ratio가 8.99로 낮은 것을 볼 수 있다. Extinction ratio를 높여 주기 위해 *l*을 250 nm로 하여 금속 슬릿 사이의 거리를 넓게 해 주면 TE 편광의 반사가 훨씬 적어지며 extinction ratio가 81.09수준으로 높아지는 것을 볼 수 있다. 그러나 회절 효율은 64.22로 떨어지는 것을 볼 수 있다. 따라서, 제안 하는 소자는 활용 분야에 따라 최적화 할 필요가 있다.

IV. 결 론

마이크로미터 스케일의 구조배열로 회절격자를 만들고 동시에 나노미터 스케일의 금속 슬릿 구조를 이용해 플라즈몬을 일으켜 편광에 선택적으로 반응하는 블레이즈드 회절격자를 새로운 소자로 제안하였다. 제안된 소자에 대한 FDTD 전산모사수행을 통해 회절격자의 기능과 편광자의 기능이 동시에 수행 가능하다는 것을 검증했다. 사례연구를 위한 디자인 예에서 금속으로 알루미늄을 가정하여 TE 편광에 대해 576 nm 대역에서 22.6° 방향으로 대략 77.61%의 회절효율과 8.99의 편광선택비가 얻어졌으며 편광선택비를 높이기 위한 또 다른 디자인에서는 64.22%의 회절효율과 81.09의 편광선택비가 얻어졌다.

제안된 소자는 편광과 회절을 개별 소자로 각각 구현하는 대신 하나의 소자로 동시에 구현할 수 있는 장점이 있다. 따라서, 고온에서도 높은 신뢰도를 가지면서도 편광과 회절이 동시에 필요한 분야인 프로젝터등의 분야에서 널리 활용될 수 있을 것으로 생각되며, 금속 슬릿의 간격 등의 디자인을 통해 가시광선영역 이외에 광통신 파장대역에서도 널리 활용 될 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 고출력 레이져분야에서 편광과 회절이 동시에 필요한 경우 고출력에 대한 높은 신뢰도를 갖는 소자로 활용 될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2012년 울산과학대학 교내학술연구비 지원에 의해 수행됨.

References

1. K. K. Sharma, *Optics: Principles and Applications* (Academic Press, 2006)
2. Y. J. Jung, D. Park, S. Koo, S. Yu, and N. Park, “Metal slit array Fresnel lens for wavelength-scale optical coupling to nanophotonic waveguides,” Opt. Express **17**, 18852-18857 (2009).
3. H. F. Shi, C. T. Wang, C. L. Du, X. G. Luo, X. C. Dong, and H. T. Gao, “Beam manipulating by metallic nano-slits with variant widths,” Opt. Express **13**, 6815-6820 (2005).
4. H. X. Yuan, B. X. Xu, B. Lukiyanchuk, and T. C. Chong, “Principle and design approach of flat nano-metallic surface plasmonic lens,” Applied Physics A-Materials Science & Processing **89**, 397-401 (2007).
5. H. X. Yuan, B. X. Xu, and T. C. Chong, “Focusing effect and performance analysis of flat metal slit array lens,” in Optical Data Storage (2007), TuE2.
6. Z. J. Sun, “Beam splitting with a modified metallic nano-optic lens,” Appl. Phys. Lett. **89**, 261119 (2006).
7. T. Xu, C. L. Du, C. T. Wang, and X. G. Luo, “Subwavelength imaging by metallic slab lens with nanoslits,” Appl. Phys. Lett. **91**, 201501 (2007).
8. N. F. Yu, J. Fan, Q. J. Wang, C. Pflugl, L. Diehl, T. Edamura, M. Yamanishi, H. Kan, and F. Capasso, “Small-divergence semiconductor lasers by plasmonic collimation,” Nature Photonics **2**, 564-570 (2008).
9. N. Yu, R. Blanchard, J. Fan, Q. J. Wang, C. Pflugl, L. Diehl, T. Edamura, M. Yamanishi, H. Kan, and F. Capasso, “Quantum cascade lasers with integrated plasmonic antenna-array collimators,” Opt. Express **16**, 19447-19461 (2008).
10. S. Arnold, E. Gardner, D. Hansen, and R. Perkins, “An improved polarizing beamsplitter LCOS projection display based on wire-grid polarizers,” SID Symposium Digest of Technical Papers **32**, 1282-1285 (2001).
11. L. Zhang, C. Li, F. Zhang, and L. Shi, “Design and fabrication of metal-wire nanograting used as polarizing beam splitter in optical telecommunication,” Journal of Optoelectronics and Advanced Materials **8**, 847-850 (2006).
12. C. Pentico, E. Gardner, D. Hansen, and R. Perkins, “New, high performance, durable polarizers for projection displays,” SID Symposium Digest of Technical Papers **33**, 730-733 (2002).
13. D. Zhang, P. Wang, X. Jiao, C. Min, G. Yuan, Y. Eeng, H. Ming, L. Zhang, and W. Liu, “Polarization properties of subwavelength metallic gratings in visible light band,” Appl. Phys. B **85**, 139-143 (2006).
14. Lumerical Solution Inc., “Nanowire grid polarizer as compact photonic polarization control elements-design and optimization with FDTD solutions,”, http://www.lumerical.com.