

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2024.24.2.155>

JIIBC 2024-2-23

비대칭 격자구조에 기초한 플라즈마 편광 빔 분리기의 구현

Implementation of Plasmonic Polarization Beam Splitter based on an Asymmetric Grating Profile

호광춘*

Kwang-Chun Ho*

요약 편광 선택적 빔 분리 격자는 수많은 광학 정보처리 시스템에서 널리 사용되고 있다. 본 논문에서는 고효율 플라즈마 편광 빔 분리기 (PBS)를 설계하기 위하여 Littrow 구조에서 Ag 금속 층으로 구성된 소자를 구현하였다. 구현한 PBS는 투과되는 0차 TE 편광과 반사되는 0차 TM 편광에서 높은 회절효율을 달성할 수 있도록 격자깊이 및 격자 비율을 정확한 모드 전송선로 이론 (Modal Transmission-Line Theory)을 사용하여 최적화하였다. 최적화된 결과로부터 PBS는 입사 파장과 각도에 대한 광대역 특성의 장점을 가지고 있으며, TE, TM 편광 모두에 대하여 95% 보다 높은 효율을 나타내었다. 그러므로, 높은 흡광비를 갖는 이 고효율 PBS 광대역 격자는 우수한 광 회절 장치로 사용될 수 있다.

Abstract The polarization-selective beam splitter grating can be widely used in numerous optical information processing systems. In this paper, to design a high-efficiency plasma polarization beam splitter (PBS), the structure composed of an Ag metal layer in Littrow mounting is implemented. To achieve high diffraction efficiency in the transmitted 0th-order TE polarization and the reflected 0th-order TM polarization, the grating depth and grating ratio of presented PBS is optimized by using rigorous Modal Transmission-Line Theory. From the optimized results, PBS has advantages of wide band properties for incident wavelength and angle, and the efficiency is higher than 95% for both TE and TM polarization. Therefore, this highly efficient PBS wideband grating with high extinction ratio can be used as an excellent optical diffraction device.

Key Words : Polarization Beam Splitter, Diffraction and Grating, Leaky-Mode Resonance

1. 서론

편광 빔 분리기 (Polarization Beam Splitter: PBS)는 수많은 광학 정보처리 시스템의 핵심 요소로, 조명된 빔을 서로 다른 방향을 갖는 두 개의 직교 편광 빔으로 분할하는 광소자이다. 복굴절 결정을 기반으로 한 기존

의 PBS는 부피가 매우 크고 무거우며, 다층 코팅 기법은 PBS에 적용할 수 있지만 저비용으로 고효율 및 높은 소멸 비율의 소자를 구현하기가 쉽지 않다. 또한, 미세 가공 기술의 발전으로, 서브파장 격자가 PBS 제작에 적용이 가능하게 되었으며, 격자 기반 PBS의 많은 제작 기법이 제시되었다. 여기에는, 몰드 주입, 금속 와이어, 샌드

*중신회원, 한성대학교 전자트랙
접수일자 2024년 1월 29일, 수정완료 2024년 3월 9일
게재확정일자 2024년 4월 5일

Received: 29 January, 2024 / Revised: 9 March, 2024 /
Accepted: 5 April, 2024

*Corresponding Author: kwangho@hansung.ac.kr
Electronics Track, Hansung University, Korea

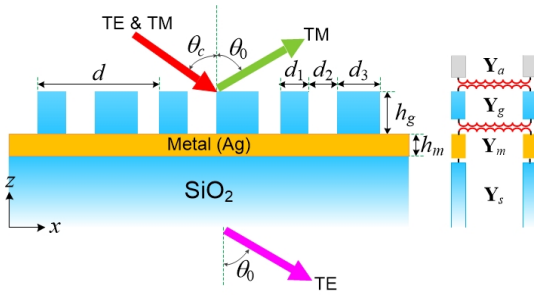


그림 1. 비대칭 격자 프로파일을 갖는 플라즈마 편광 빔 분리의 구성도와 그 등가 전송선로 망.

Fig. 1. Schematic diagram of plasmonic polarization beam splitter with asymmetric grating profile, and the equivalent transmission-line network.

위치 구조, 그리고 비대칭 구조 등이 포함된다^[1-3].

이를 기반으로 지난 몇 년 동안 세 가지 종류의 격자형 PBS가 제안되고 시연되었다. 서로 직교 특성인 TE, TM 편광 파가 모두 반사되고, 둘 다 투과되고, 그리고 하나는 반사되고 다른 하나는 투과되는 특성의 PBS 소자들이다^[4-6]. 그러나, 이러한 격자 PBS는 최신 통합 광학 시스템의 요구 사항을 완전히 충족할 수 없는 지루한 제조 프로세스 또는 열악한 각도 감도의 단점이 있다. 결국, 효율적인 집적을 위한 우수한 흡광률 (extinction ratio), 넓은 파장 범위에 대한 고효율, 더 큰 각도의 대역폭 및 초소형의 크기를 제공하는 PBS의 설계에 대한 필요성은 여전히 극복해야 할 많은 연구 과제를 가져왔다. 이 논문에서는 이전 연구 결과들을 기반으로 비대칭 프로파일을 갖는 서브 파장 격자와 금속 층으로 구성된 광대역 PBS 설계를 제안하였다. 누설 모드 공진 효과를 기반으로 제안된 서브 파장 비대칭 프로파일 격자 PBS는 넓은 스펙트럼과 비교적 넓은 각도의 대역폭에서 좋은 흡광률을 제공한다. 더욱이, 높은 회절 효율성이 결합된 장점을 제공한다. 그 PBS는 각각 0차의 TE 파는 투과하며, 0차의 TM 파는 반사하는 편광 분리의 특성을 나타낸다.

본 논문에서 제시한 금속 층을 포함하는 비대칭 격자 구조의 PBS를 설계하고 그 특성을 수치적으로 분석하기 위하여 정확한 모드 전송선로 이론 (MTLT)^[7]을 사용하였다. 기하학적 매개변수 (격자 비율, 격자 두께, 격자 주기)와 비대칭 격자 구조 사이의 변위는 TE, TM 모드의 높은 빔 분리현상을 지원하는 모드 간의 상호 작용을 제어할 수 있도록 조정하였다.

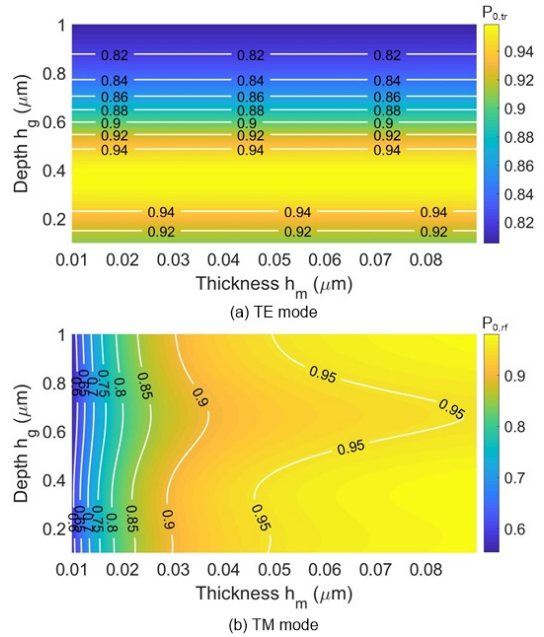


그림 2. 금속 층의 두께와 격자깊이에 대한 0차 모드의 회절 전력: (a) TE 모드의 투과 전력, (b) TM 모드의 반사 전력.

Fig. 2. Diffraction powers of 0th-order versus grating depth and thickness of metal layer: (a) transmitted power of TE mode, and (b) reflected power of TM mode.

II. PBS의 설계구조와 수치해석법

그림 1은 본 연구에서 제안한 금속 층을 포함하는 비대칭 격자구조로 구성된 광 PBS의 기하학적 구조와 그 빔 분리현상을 분석하기 위하여 등가회환 등가 전송선로 망을 보여준다. 그림에서 보듯이, PBS는 일반적으로 TE 및 TM 편광 성분이 모두 포함된 단색 평면파가 입사각 θ_c 로 조명된다. 그런 다음 격자구조에 의하여 매우 높은 효율의 0차 TE 및 TM 편광파가 반사되고 전송되는 순서로 분리된다. 그 편광 빔 분리 특성을 NIR 대역을 포함한 광대역에서 정확한 MTLT를 사용하여 수치적으로 분석하였다. PBS를 구성하는 비대칭 격자 구조는 주기 d , 격자 폭 d_1, d_2, d_3 , 격자비율 (duty cycle) $F_k = d_k/d$ ($k = 1, 2, 3$)를 갖는 슬릿 어레이 형태의 SiO₂로 설계하였다. 그때, 비대칭 격자의 Fourier 계수 ϵ_n 는 다음과 같이 정의된다.

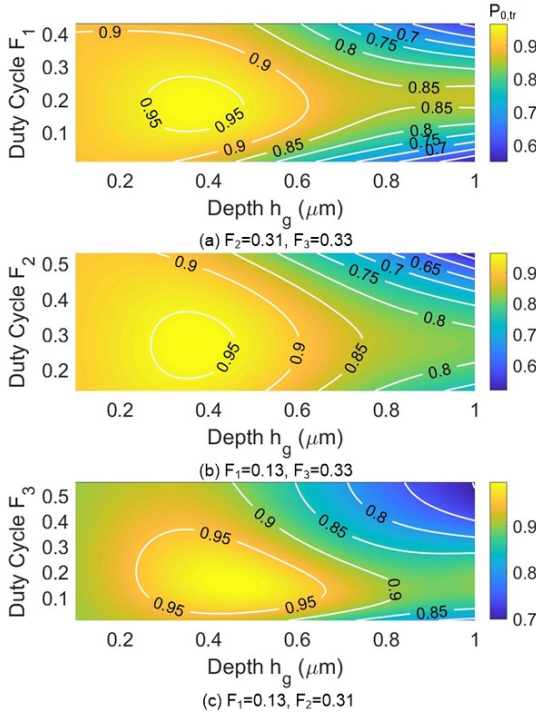


그림 3. TE 모드 하에서 격자깊이와 격자 비율에 대한 0차 모드의 투과된 회절 전력.
 Fig. 3. (Color Online) Transmitted diffraction power of 0th-order versus grating depth and duty cycle under TE mode.

$$\varepsilon_n = (n_s^2 - n_a^2) \left[F_1 \text{sinc}(nF_1) + F_3 \text{sinc}(nF_3) e^{-in\pi(F_1+2F_2+F_3)} \right] \quad (1)$$

이와 같이 구성된 비대칭 격자구조의 기반을 지원하는 금속 층은 두께가 h_m 인 Ag를 사용하였다. Ag 층은 일반적으로 높은 반사/투과 효율과 넓은 반사/투과 대역폭을 제공하기 때문에 PBS와 같은 유형의 소자구조에서는 매우 중요한 설계 요소라 할 수 있다.

전자기 모델링 도구로는, 그림 1에서 보듯이 정확한 MTLT를 적용하였다. 이 이론은 횡방향 주기구조의 내부에 분포하는 필드의 Fourier 모드 분해법과 마이크로파 공학의 전송선로 원리를 기반으로 하며, 서브파장의 주기격자 구조를 쉽게 분석하기 위하여 정립된 기술이다. 그림에서 보듯이, 각 층들은 다음과 같이 정의된 특성 admittance로 등가화된다.

$$\mathbf{Y}_j = \begin{cases} \mathbf{K}_z / (\omega\mu_0) & \text{for TE mode} \\ (\omega\varepsilon_0 n_j^2) / \mathbf{K}_z & \text{for TM mode} \end{cases} \quad (2)$$

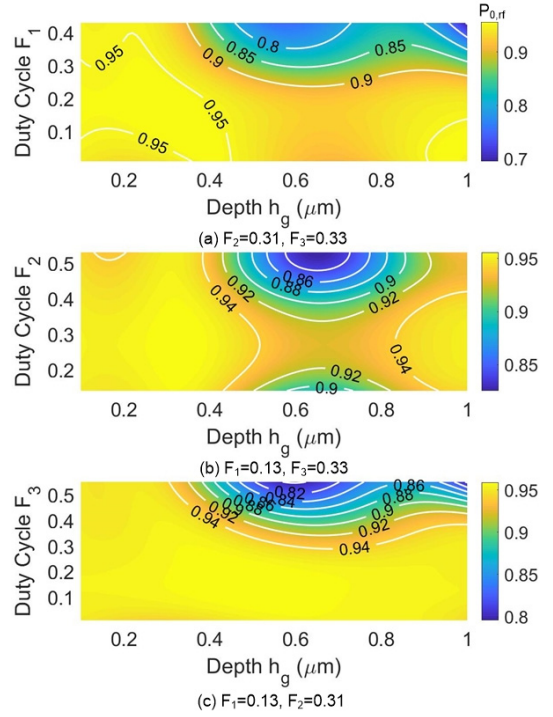


그림 4. TM 모드 하에서 격자깊이와 격자 비율에 대한 0차 모드의 반사된 회절 전력.
 Fig. 4. (Color Online) Reflected diffraction power of 0th-order versus grating depth and duty cycle under TM mode.

여기서, $j = a, g, m, s$ 를 나타내며, 고유치인 \mathbf{K}_z 는 다음과 같은 n 차 회절모드의 전파상수로 구성된 대각행렬을 나타낸다.

$$k_{z,n,j} = k_0 \sqrt{n_j^2 - \left(n_a \sin \theta_c + n \frac{\lambda}{d} \right)^2} \quad (3)$$

또한, 그림 1의 등가 전송선로 망에서 보듯이, 격자구조들 사이의 불연속 특성은 공간고조파 성분의 Fourier 계수들의 행렬로 표현된 transformer로 모델링할 수 있으며, 정의된 admittance 행렬을 사용하여 PBS의 경계면에서 발생하는 광 신호의 반사전력 또는 투과전력을 결정할 수 있다^[8].

이 구조는 x -방향으로 무한히 길며, 모든 수치해석 결과는 입사 신호의 전력으로 정규화하였다. 설계된 PBS 소자에서, SiO₂의 굴절률은 다음과 같은 Sellmeier 분산 방정식을 사용하여 결정하였고,

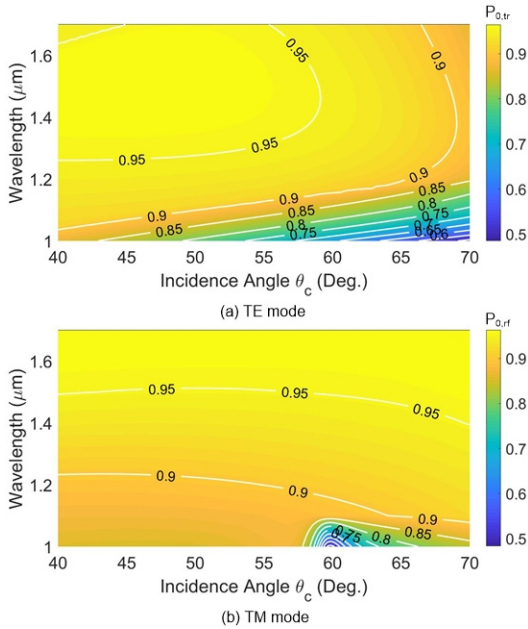


그림 5. 입사각과 동작 파장에 대한 0차 모드의 회절 전력: (a) TE 모드의 투과 전력, (b) TM 모드의 반사 전력.
 Fig. 5. Diffraction power of 0th-order versus incidence angle and operating wavelength: (a) transmitted power of TE mode, and (b) reflected power of TM mode.

$$n_{\text{SiO}_2}^2(\lambda) = 1 + \frac{0.6961663\lambda^2}{\lambda^2 - 0.0684043^2} + \frac{0.4079426\lambda^2}{\lambda^2 - 0.1162414^2} + \frac{0.8974794\lambda^2}{\lambda^2 - 9.896161^2} \quad (4)$$

금속 Ag 층의 굴절률은 Lorentz-Drude 모델을 사용하여 계산되었다^[9].

결정된 PBS의 물리적 요소들에 기초하여, 반사되는 TM 모드와 투과되는 TE 모드의 n 차 편광은 아래와 같은 등가 전송선로 망의 power balance 특성을 만족하도록 분석되었다.

$$1 = \sum_n \text{Re} \left(\frac{Y_{cn}}{Y_{a0}} \right) |R_{cn}|^2 + \sum_n \text{Re} \left(\frac{Y_{sn}}{Y_{a0}} \right) |T_{sn}|^2 \quad (5)$$

예를 들어, 입사 경계면에서 반사되는 $n=0$ 차 TM 모드의 반사 회절전력과 TE 모드의 투과전력은 식 (5)에서 보듯이 $|R_{a0}|^2$, $\text{Re}(Y_{s0}/Y_{a0})|T_{s0}|^2$ 와 같이 정의된 전력에 의하여 그 편광 현상이 분석되는 것이다. 식 (5)에서 Y_{cn} , Y_{sn} 은 그림 1에 도시된 등가 전송선로 망의 특성 admittance 행렬 \mathbf{Y}_a , \mathbf{Y}_s 를 구성하는 n 차 공간고조파의 특성 admittance를 의미한다.

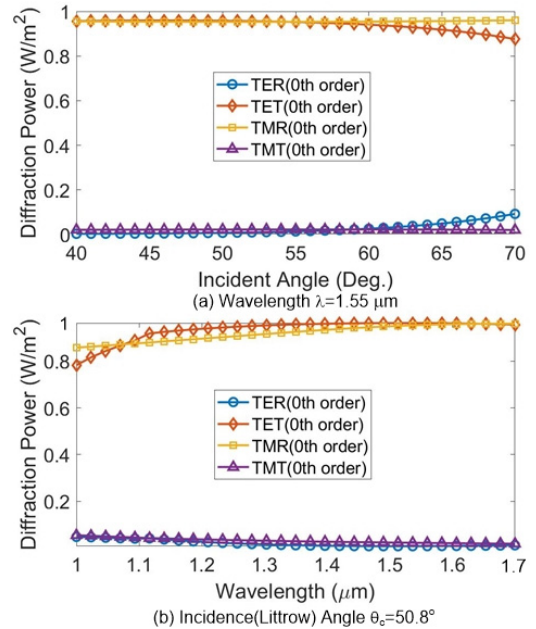


그림 6. (a) 입사각과 (b) 동작 파장에 대한 0차 모드의 회절 전력.
 Fig. 6. (Color Online) Diffraction power of 0th-order versus (a) incidence angle, and (b) operating wavelength.

III. 매개변수에 대한 PBS의 효율분석

높은 편광 빔 분리 특성을 갖는 PBS를 설계하기 위하여, 그림 1의 비대칭 격자구조에서 발생하는 회절 효율을 MTLT를 사용하여 수치 해석하였다. 그림 2는 TE 및 TM 편광에 대한 Littrow 마운팅 하에서 격자비율이 각각 $F_1=0.13$, $F_2=0.31$, $F_3=0.33$ 이고, 주기가 1100 nm, 동작 파장은 1550 nm인 구조에서 연결 금속 층의 두께 h_m 및 격자깊이 h_g 에 대하여 0차 회절 모드의 효율을 보여준다. Littrow 마운팅 하에서의 입사각은 다음과 같이 정의된다.

$$\theta_c = \sin^{-1} \left(\frac{\lambda}{2d} \right) \quad (6)$$

그림 2에서 보듯이, TE 모드는 격자깊이 h_g 가 200 nm와 500 nm사이에서 금속 층의 두께 h_m 에 의존 없이 0차 회절 모드에서 95% 이상의 높은 투과 효율을 얻을 수 있었다. 더욱이, TM 모드는 금속 층의 두께 h_m 이 50 nm보다 크고 격자깊이 h_g 가 600 nm인 지점에서 0차 회절 모드의 반사 효율이 95% 이상 높게 나타남을 보였

다. 실제로 생산을 위해서는 제조 시 발생하는 허용오차를 고려해야 한다. 실제, 최적화된 수치해석 결과로부터 얻어진 격자깊이와 금속 층의 두께에 대한 편차는 PBS의 성능을 어느 정도 감소시키는 원인을 제공한다. 그러나, 본 논문에서 제시한 PBS는 그림 2에서와 같이 일정한 범위의 h_m 과 h_g 에서 95% 이상의 높은 효율의 제작 내성을 보이므로 대량 생산 시 좋은 가이드라인이 될 것이다.

다음으로, 비대칭 격자구조의 격자비율 (duty cycle) $F_k = d_k/d$ ($k=1, 2, 3$)의 변화에 따른, 0차 TE, TM 모드의 회절 전력을 분석하였다. 먼저, 0차 TE 모드에 대한 그림 3(a)와 (b)에서 보듯이, 격자비율 F_1 이 0.1~0.3, 격자깊이 h_g 가 200~500 nm일 때 회절 에너지가 높게 분포하였으며, 격자비율 F_2 는 0.2~0.4, 격자깊이 h_g 는 200~500 nm일 때 95% 이상의 높은 에너지가 투과된다는 것을 발견하였다. 더욱이, 그림 3(c)에서 보듯이, 격자비율 F_3 는 0.1~0.4, 격자깊이 h_g 는 300~600 nm일 때 높은 에너지가 투과되었다. 이어서 0차 TM 모드에 대한 편광 성능을 분석하였다. 그림 4에서 보듯이, 격자비율 F_1 은 0.1~0.4, 격자깊이 h_g 가 100~400 nm일 때와 격자비율이 0.1~0.2, 격자깊이가 800~1000 nm일 때 반사 회절 에너지가 높게 분포하였다. 격자비율 F_2 은 0.1~0.4, 격자깊이가 100~400 nm일 때와 격자비율이 0.2~0.4, 격자깊이가 900~1000 nm일 때 그와 같은 성능이 나타났다. 마지막으로, 격자비율 F_3 는 0.1~0.3, 격자깊이가 100~1000 nm인 넓은 범위에서 높은 회절 에너지가 반사되었다. 이와 같은 결과는, 본 논문에서 제시한 구조의 편광 감도는 명백하며, 이는 2D 비대칭 회절 격자가 정상적인 입사 하에서 좋은 성능의 다차원 광학 편광 분할을 달성할 수 있음을 의미한다.

그림 5는 각각 TE 편광 및 TM 편광에 대한 최적의 격자깊이 $h_g=400$ nm와 금속 층의 두께 $h_m=50$ nm를 갖는 비대칭 격자비율이 각각 $F_1=0.13$, $F_2=0.31$, $F_3=0.33$ 에서 입사각과 파장의 변화에 따른 반사/투과 효율을 보여준다. 그림 5(a)에서 보듯이, 0차 TE 모드는 입사각이 $40^\circ\sim 60^\circ$, 파장이 1200 nm~1650 nm인 광대역에서 95% 이상의 높은 투과 에너지를 발생시켰다. 또한, 0차 TM 모드도 입사각이 $40^\circ\sim 70^\circ$, 파장이 1400 nm~1650 nm에서 높은 반사 에너지를 발생시켰다. 이와 같은 결과는, 본 논문에서 제시한 구조가 넓은 스펙트럼 내에서 격자의 입사각에 의존하는 높은 성능의 응답을 얻을 수 있다는 것을 입증하는 것이다.

마지막으로, 그림 6에서 입사각과 파장 대비 효율의 특성을 분석하였다. 동작 파장이 1550 nm인 그림 6(a)에서, TE 편광의 경우 0차 모드의 투과 에너지 (TET), TM 편광의 경우 0차 모드의 반사 에너지 (TMR) 각각 입사각 $40^\circ\sim 70^\circ$ 의 넓은 대역 범위 내에서 95%보다 우수한 성능을 발생시킴을 알 수 있다. 더욱이, 그림 6(b)에서 보듯이, Littrow 마운팅 하의 입사각 $\theta_c=50.8^\circ$ 에서 0차 모드의 TE 투과 편광 (TET)과 TM 반사 편광 (TMR)은 1100 nm~1700 nm의 넓은 스펙트럼 대역 범위 내에서 95%보다 우수한 효율을 발생시킴을 알 수 있다. 반면에, 분석 범위 내에서 0차 TE 편광의 반사 에너지 (TER)와 TM 편광의 투과 에너지 (TMT)는 상호 보완적으로 거의 발생하지 않는 것을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는, 금속 층을 포함하는 비대칭 격자구조로 구성된 광 PBS를 설계하였다. 이러한 비대칭 PBS 격자에서 회절 특성을 분석하고, 격자 파라미터를 평가하기 위하여 반사 또는 투과 에너지의 효율을 평가하였다. MTLT 기반 시뮬레이션 및 최적화를 통해 합리적인 구조 파라미터 범위 내에서, 연결된 금속 층의 정확한 두께와 비대칭 격자깊이를 예측하고 결정하였다. 격자의 최적 프로파일을 사용하여, TE 편광의 경우 0차 모드의 투과 효율이 그리고 TM 편광의 경우 0차 반사 효율이 각각 95% 이상의 높은 에너지 효율이 발생하는 신뢰성을 확인하였다.

더욱이, 1100 nm~1700 nm의 넓은 스펙트럼 대역에서 우수한 편광 선택성을 가진, 본 논문에서 설계한 PBS는 편광 다중화, 광 통신 및 편광 의존 격자 간섭계에 상당한 응용 가능성을 가질 것으로 기대한다.

References

- [1] Carvalho EJ, Braga ES, Cescato LH, "Study of the injection molding of a polarizing beam splitter," Applied Optics, Vol. 45, pp. 100~103, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.45.000100>
- [2] Ekinici Y, Solak HH, David C, Sigg H, "Bilayer Al wire-grids as broadband and high-performance polarizers," Optics Express, Vol. 14, pp. 2323~2334, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.14.002323>

- [3] Wu H, Mo W, Hou J, Gao D, Hao R, Guo R, et al., "Polarizing beam splitter based on a subwavelength asymmetric profile grating," Journal of Optics, Vol. 12, 015703 pp. 1~5, 2010.
DOI: <https://doi.org/10.1088/2040-8978/12/1/015703>
- [4] Zheng J, Zhou C, Feng J, Cao H and Lu P, "A metal-mirror-based reflecting polarizing beam splitter," J. Opt. A: Pure Appl. Opt., Vol. 11 015710 pp 1~6, 2009.
DOI: <https://doi.org/10.1088/1464-4258/11/1/015710>
- [5] Zheng J, Zhou C, Feng J and Wang B, "Polarizing beam splitter of deep-etched triangular-groove fused-silica gratings," Opt. Lett. Vol. 33, pp. 1554~1556, 2008.
DOI: <https://doi.org/10.1364/OL.33.001554>
- [6] Zhou L and Liu W, "Broadband polarizing beam splitter with an embedded metal-wire nanograting," Opt. Lett., Vol. 30, pp. 1434~1436, 2005.
DOI: <https://doi.org/10.1364/OL.30.001434>
- [7] K. C. Ho, and K. Ho, "Longitudinal Modal Transmission-Line Theory (L-MTLT) of Multilayered Periodic Waveguides," IEICE Trans. Electronics, Vol. E88-C, No. 2, pp. 270~274, 2005.
DOI: <https://doi.org/10.1093/ietele/e88-c.2.270>
- [8] K. C. Ho, "Diffraction Analysis of Multi-layered Grating Structures using Rigorous Equivalent Transmission-Line Theory," The J. of IIBC, Vol. 15, pp. 261~267, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.7236/IIBC.2015.15.1.261>
- [9] E. D. Palik, "Handbook of Optical Constants of Solids", Vol. I, Academic Press-New York, 1985.

저 자 소 개

호 광 춘(중신회원)



- 1996 : NYU School of Engineering (Ph.D. in EE)
- 1998 ~ 1999 : 한국통신 연구개발본부 선임연구원
- 2000 ~ 현재 : 한성대학교 기계전자공학부 전자트랙 교수

• 주관심분야 : Optical Electromagnetics, Design and Analysis of Photonic Devices, Optical Biosensors and Bioelectronics

※ 본 연구는 한성대학교 교내연구비 지원과제입니다.