

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2022.22.3.145>
JIIBC 2022-3-22

금속층에 기반한 격자구조형 고성능 플라즈마 바이오센서

High-Performance Plasmon Bio-Sensor with Grating Profile based on Metallic Layer

호광춘*

Kwang-Chun Ho*

요약 금속 격자를 통한 광전송을 분석하기 위하여 모드 전송선로 이론 (MTLT)에 기반한 해석 모델을 제안하였다. 이 모델은 높은 전송을 담당하는 모드의 분산 관계뿐만 아니라 전송에 대한 물리적 의미를 잘 제공한다. 이러한 개념들은 표면 플라즈몬 폴라리톤 (SPP)이 여기되는 가시광선~근적외선 파장 범위에서 사용되는 실제 금속에 대해서도 정확한 정보를 제공한다. 또한, 그 분산 관계를 통하여 전송 모드의 특성을 평가할 수 있다. 그 전송 모드는 Fabry-Pérot 유사 모드와 SPP 사이의 하이브리드 모드이다. 그 하이브리드 모드의 특성을 결정하기 위하여 금속격자의 다른 격자주기와 격자비율 고려하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 이러한 변수들에 의존하는 고성능 플라즈마 바이오센서의 감지 특성과 모드 전송 현상을 명확하게 분석하였다.

Abstract An analytical model based on a modal transmission-line theory (MTLT) is developed to investigate the optical transmission through metal gratings. This model gives well physical meanings for the transmission as well as for the dispersion relations of the modes responsible for high transmission. These concepts provide accurate information even for real metals used in the visible~near-infrared wavelength range, where surface plasmon polaritons (SPP's) are excited. Furthermore, the dispersion relations allow the nature of the propagation modes to be assessed. The propagation modes are hybrid between Fabry-Pérot like modes and SPP's. It is important to consider different period and aspect ratio of metal gratings in order to determine the nature of the hybrid modes. In this paper, the sensing characteristics and mode propagation phenomena of high-performance plasma bio-sensors that depend on these variables were clearly analyzed.

Key Words : Surface Plasmons, Optical Bio-sensors, Diffraction Gratings

1. 서론

과거부터 금속 필름에 있는 서브파장 hole의 주기적인 배열을 통하여 관찰 가능한 광전송 현상이 발생한다

는 연구가 보고되어왔다^[1]. 이 관찰은 향상된 광전송을 담당하는 복잡한 프로세스와 다양한 응용에 대한 잠재력을 탐구하는 많은 연구로 이어져왔다^[2]. 참고문헌 [1]에서 관찰된 향상된 광전송 프로세스를 명확하게 분석하기

*중신회원, 한성대학교 전자트랙
접수일자 2022년 4월 10일, 수정완료 2022년 5월 10일
게재확정일자 2022년 6월 10일

Received: 10 April, 2022 / Revised: 10 May, 2022 /
Accepted: 10 June, 2022

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

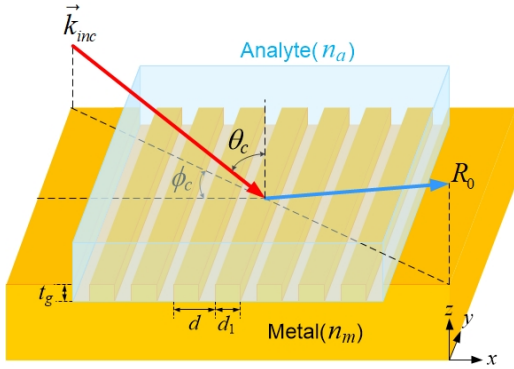


그림 1. 금속 회절 격자에 기반한 SPR 센서의 구성도.
Fig. 1. Schematic diagram of the SPR sensor based on metallic diffraction grating.

위하여 많은 이론적 연구에서 금속 lamellar 격자, 즉 주기적 hole 배열의 1차원 등가 격자구조를 고려하였다. 그러나, 여러 연구^[3]에서 지적인 바와 같이, 1차원의 경우 TM 편광에서 슬릿 내부에 항상 전파 모드가 존재하는 반면, 2차원의 경우 hole에 대한 차단 파장이 존재한다. 결과적으로 두 가지 유형의 구조에서 발생하는 전송 프로세스가 다르기 때문에 1차원 구조와 2차원 구조 사이의 광전송 현상을 평가할 때 주의를 기울여야 한다.

금속 격자구조에 대한 여러 과거 연구에서 surface plasmon resonance (SPR) 분산 곡선으로부터 투과 피크가 관찰되었으며, 결과적으로 이 SPR 여기로 인하여 높은 투과율이 발생한다는 것을 인식하게 되었다^[4]. 또 다른 투과 피크는 입사각에 의존하여 슬릿 내부의 Fabry-Pérot (FP) 공진에 기인한 것으로, FP 관련 피크가 지속적으로 SPR 관련 피크로 변화하여 나타나는 현상으로 설명되었다^[5].

전송 과정에서 SPR의 정확한 역할은 아직까지 논란의 여지가 존재한다. 여러 연구에서 SPR 조건에서 전송이 0에 가깝다는 것을 관찰되었으며, SPR 조건에 매우 근접하여 관찰된 피크는 때때로 SPR 여기에 기인한 것이 아니라, Rayleigh 이상 현상 (anomaly)과 같이 회절된 차수가 소산모드에서 전파모드로 변환할 때 관찰되는 불연속성에 기인한다는 것으로 밝혀졌다^[6]. 이 간단한 연구 결과로부터 전송 피크를 담당하는 결합 모드의 특성이 명확하지 않음을 알 수 있다.

본 연구에서는 2장에서 모드 전송선로 이론 (MTLT)^[7]에 기반한 해석 모델을 개발하였다. 이 해석 모델로부터 전달 공진의 분산 관계 및 전달에 대한 정확한 해석 개념을 얻을 수 있다. 또한, 이를 통해 높은 전송을 담당하는

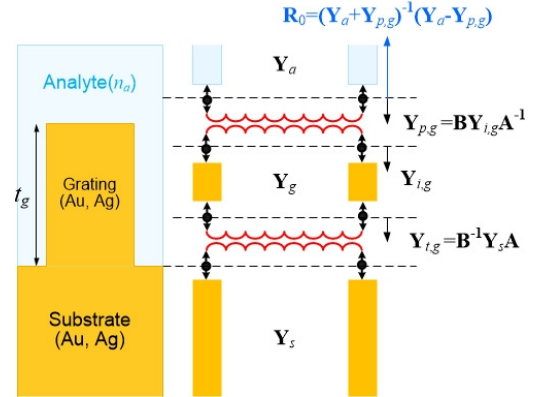


그림 2. 금속 회절 격자구조에 대한 등가전송 선로.
Fig. 2. Equivalent transmission-line network for metallic diffraction grating structure.

모드의 특성을 결정할 수 있다. 이를 바탕으로 3장에서는 금속 격자의 전송 프로세스에서 SPP 모드의 역할에 의존하는 플라즈마 bio-sensor의 감도분석을 세부적으로 검토하였다. 마지막으로 SPP 조건에서 관찰되는 필드 분포에 대하여 설명하였다.

II. 플라즈마 bio-sensor의 수치해석법

그림 1은 격자 결합 SPR bio-sensor 모델의 개략도를 보여준다. 이 기하학 구조에서 입사파의 운동량은 직사각형 금속 격자에서 회절로 발생하는 표면 플라즈몬 파의 운동량과 일치하도록 증가되며 상호 작용한다. 그때, 금속 격자의 홈은 TM 모드의 입사면과 수직이 되는 방향으로 구성하였으며, 금속 격자의 주기는 d , 격자의 ridge 폭은 d_1 , 그리고 격자의 두께는 t_g 와 같이 구성하였다. 이와 같은 기하학적 금속 격자구조의 회절특성을 분석하기 위하여 적용한 전자기 모델링 도구는 그림 2에서 보듯이 정확한 MTLT의 등가 전송선로를 사용하였다. 이 이론은 횡방향 주기구조의 내부에 분포하는 필드의 Fourier 모드인 공간고조파 (space harmonics)와 마이크로파공학의 전송선로 원리를 기반으로 하며, 주기격자 구조를 쉽게 분석하기 위하여 정립된 기술이다. 그림에서 보듯이, TM 모드가 입사된 경우, 각 층들은 다음과 같이 정의된 특성 admittance로 등가화할 수 있다.

$$Y_j = (\omega \epsilon_0 n_j^2) / K_z \quad (1)$$

여기서, $j = a, g, s$ 를 나타내며, 고유치인 K_z 는 다음과

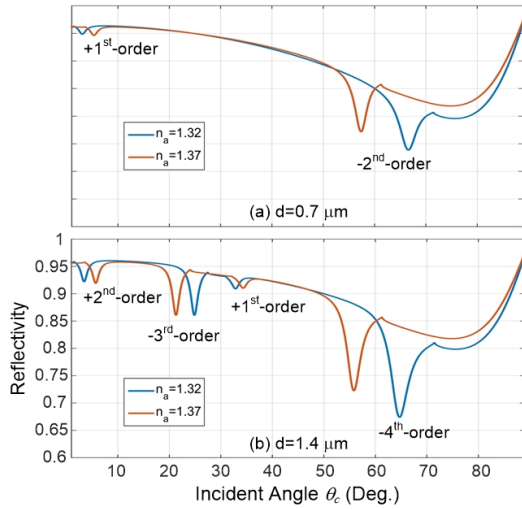


그림 3. Au 단층에서 두 가지 다른 분석 물질에 대한 SPR 센서의 각도 곡선.
 Fig. 3. (Color Online) Angular curves of SPR sensor with two different analyte at Au monolayer.

같은 m 차 회절모드의 전파상수로 구성된 대각행렬을 나타낸다.

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

또한, 이중 격자구조들 사이의 불연속 특성은 공간고조파 성분의 Fourier 계수인 행렬 \mathbf{A}, \mathbf{B} 로 표현된 transformer로 모델링할 수 있으며, transformer의 경계면에서 아래 방향으로 들여다본 입력 admittance들 ($\mathbf{Y}_{p, g}, \mathbf{Y}_{i, g}, \mathbf{Y}_{t, g}$)은 그림에 주어진 수식과 같이 Fourier 계수 행렬의 조합으로 정의할 수 있다. 이 정의된 admittance 행렬을 사용하여 분석물질과 광 bio-sensor 경계면에서 발생하는 광 신호의 반사율을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\mathbf{R}_0 = \left(\mathbf{Y}_a + \mathbf{Y}_{p, g} \right)^{-1} \left(\mathbf{Y}_a - \mathbf{Y}_{p, g} \right) \quad (3)$$

이 구조는 x -방향으로 무한히 길며, 모든 수치해석 결과는 입사 신호의 전력으로 정규화하였고, TM 모드로 편향된 광 신호가 임의의 기울어진 각도($\phi_c = 0$)로 입사되었다고 가정하였다. 그리고, 금속 격자구조를 구성하는 금속 Au, Ag의 굴절률은 가시광선 및 근적외선 영역에서 동작하는 2진동자 Lorentz-Drude 모델을 사용하여 계산되었다^[8].

일반적으로, 금속 격자 기반 시스템에서 고차의 공간고조파에 의존하는 dip을 사용하면, 좋은 감도의

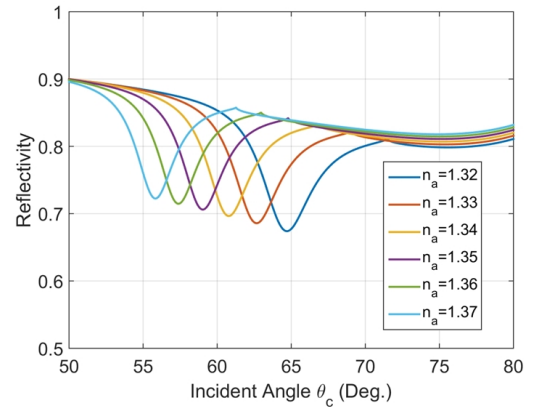


그림 4. Au 단층에서 6 가지 다른 분석 물질로 구성된 SPR 센서의 각도 곡선.
 Fig. 4. (Color Online) Angular curves of SPR sensor with six different analyte at Au monolayer.

bio-sensor를 구현할 수 있다. 이를 위하여 깊고 날카로운 최솟값의 반사율을 생성해야 하며, 그림 2의 등가 전송선로에서 보듯이 격자의 기하학적 구조를 변경하여 고차 반사 dip을 얻을 수 있다. 더욱이, 고차 반사 dip과 낮은 차수의 반사 dip을 동시에 고려하면, 금속 격자 기반 시스템에서 감도 개선의 또 다른 효과적인 방법을 얻을 수 있다. 이 두 가지 dip을 기반으로 격자 기반 SPR bio-sensor의 감도를 향상시킬 수 있다. 이와 같이 두 개의 dip을 고려한 이중 각도 감도 (angular sensitivity) 수식은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$S_{\theta\theta} = \left| \frac{d(\theta_q - \theta_r)}{dn_a} \right| = \left| \frac{d\theta_q}{dn_a} \right| + \left| \frac{d\theta_r}{dn_a} \right| \quad (4)$$

식 (4)에 의존하는 두 개의 dip을 고려한 Au 금속격자로 구성된 SPR bio-sensor의 향상된 각도 감도 결과를 3장에서 자세하게 언급하였다.

III. 플라즈마 bio-sensor의 감도 분석

그림 1은 본 논문에서 고려한 SPR bio-sensor 구조의 개략도를 보여준다. 그림 2에서 보듯이, MTLT의 등가 전송선로를 사용하여 active 금속인 Au를 사용하는 격자 결합 SPR 센서의 각도 반사 스펙트럼을 분석하였다. 동작 파장은 $\lambda = 0.9 \mu\text{m}$ 이고 격자두께와 격자비율은 각각 $t_g = 0.03 \mu\text{m}$ 와 $d_1/d = 0.9$ 와 같이 선정하였다. 그때, 그림 3과 같이 $d = 0.7 \mu\text{m}, 1.4 \mu\text{m}$ 의 서로 다른

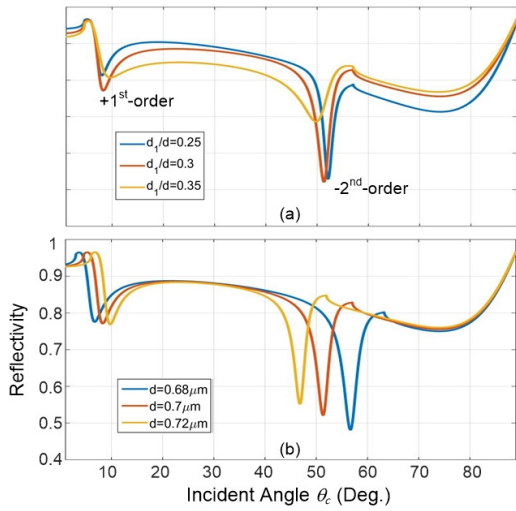


그림 5. Ag 단층에서 가변 총횡비와 주기에 대한 SPR 센서의 각도 곡선.

Fig. 5. (Color Online) Angular curves of SPR sensor for variable aspect ratio and period at Ag monolayer.

주기에 대하여 bio-sensor의 각도 감도를 수치적으로 계산하였다.

그림에서 보듯이, 분석물의 굴절률 n_a 가 증가할수록 dip을 발생시키는 공명 각도가 양의 회절 차수에서는 커지고 음의 회절 차수에서는 작아지는 현상을 나타내었다. 또한, 음의 회절 차수 dip을 사용한 각도 감도가 양의 회절 차수 dip을 사용한 각도 감도보다 큰 것을 알 수 있다. 그림 3(b)의 경우, 음의 회절 차수 -3차와 -4차에서의 각도 감도는 각각 $S_\theta = |\Delta\theta_c / \Delta n_a| = 72$ deg/RIU와 178 deg/RIU와 같았으며, 양의 회절 차수 +1차와 +2차에서의 각도 감도는 각각 32 deg/RIU와 44 deg/RIU와 같이 감지됨을 보였다.

더욱이, 분석물의 굴절률이 1.32에서 1.37까지 변화함에 따라 +1차 회절차수의 dip은 오른쪽으로 이동하고 -4차 회절차수 dip은 왼쪽으로 이동하였다. 그 결과 이 두 dip 사이의 간격 변화가 현저하게 차이가 나는 것을 인식할 수 있다. 명백하게 +1차 dip과 -4차 dip만으로 각도 감도를 분석하는 것 보다, 빠르게 변하는 두 dip 사이의 간격 변화를 기반으로 기존 방식보다 감도가 더 높은 각도 감지 방법을 설계할 수 있다. 그림 3(b)에서, $n_a = 1.32$ 의 경우 $\theta_{-4} - \theta_{+1} = 31.85^\circ$ 이고 1.37은 $\theta_{-4} - \theta_{+1} = 21.45^\circ$ 이므로 두 개의 dip을 고려한 이중 각도 감도는 $S_{\theta\theta} = 208$ deg/RIU와 같이 얻을 수 있다.

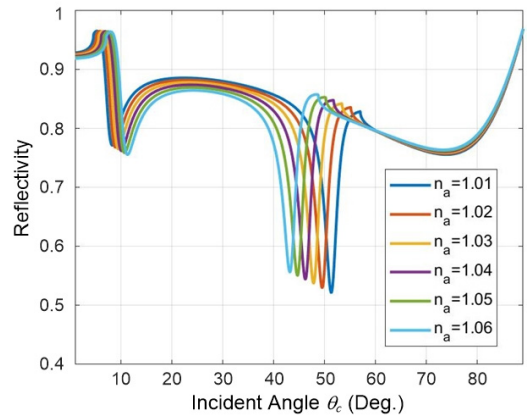


그림 6. Ag 단층에서 6 가지 다른 분석 물질에 대한 SPR 센서의 각도 곡선.

Fig. 6. (Color Online) Angular curves of SPR sensor with six different analyte at Ag monolayer.

이와 같이 서로 다른 회절차수에서 발생하는 두 개의 dip을 고려한 각도 감지 방법은 격자를 구성하는 active 물질에 따라 다르게 발생하므로, 항상 적용 가능한 방법은 아니며, 특별한 금속과 구조에서만 사용 가능하다.

두 개의 dip을 고려한 각도 감지 방법과 비교하기 위하여, 공진 각도의 이동과 SPR 곡선의 깊이-폭 비율을 모두 고려하여 금속 격자의 -4차 회절 차수를 적용하여 bio-sensor의 각도 감도 성능을 자세하게 분석하였다. 그림 4에서 보듯이, Au 금속 격자의 경우, 분석물의 굴절률이 $n_a = 1.32$ 에서 1.37까지 0.01 간격으로 변화함에 따라 공명 각도가 55.8° 에서 64.7° 로 이동하였다. 분석물의 굴절률이 변하는 전체 범위에서 공명 각도의 변화율은 선형적으로 일정하였으며 그때 감지된 각도 감도는 200 deg/RIU와 같이 나타났다.

다음으로, 금속격자가 Ag 금속으로 구성된 bio-sensor의 각도 감도 성능을 분석하였다. 그림 5(a)에서 보듯이, 동작 파장이 $\lambda = 0.65 \mu\text{m}$ 이고 격자두께와 격자주기는 각각 $t_g = 0.03 \mu\text{m}$ 와 $d = 0.7 \mu\text{m}$ 인 경우, 격자비율이 증가함에 따라 +1차 회절차수의 dip은 오른쪽으로 이동하고 -2차 회절차수 dip은 왼쪽으로 이동하였다. 그러나, 이동에 따른 공진 각도 (resonant angle)의 변화는 거의 무시할 정도로 미미하였다. 반면에, 격자비율이 $d_1/d = 0.3 \mu\text{m}$ 인 경우, 격자주기가 증가함에 따라 회절차수의 dip이 어떻게 변하는지 분석한 그림 5(b)에서 보듯이, 격자주기가 증가함에 따라 공진 각도는 현저한 변화를 보여 주었다. 그러나, Au 금속에

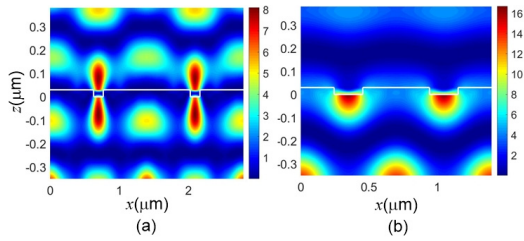


그림 7. (a) Au와 (b) Ag 단층에서 TM 모드에 대한 자기 분포도 ($|H_y|$).

Fig. 7. (Color Online) The magnetic field distribution ($|H_y|$) for TM mode at (a) Au, and (b) Ag monolayer.

서와 다르게 발생하는 회절차수의 변화는 없었다. 이와 같은 수치해석적 결과를 참고하면, 금속격자로 구성된 bio-sensor의 감지특성은 격자주기의 변화에 가장 민감하게 반응함을 알 수 있다.

격자비율이 0.3 μm 이고 격자주기가 0.7 μm 인 경우, 분석물의 굴절률이 $n_a = 1.01$ 에서 1.06까지 변화함에 따라 bio-sensor의 각도 감도의 감지능을 그림 6에 도시하였다. 그림에서 보듯이, Au 금속에서와 같이 분석물의 굴절률이 0.01 간격으로 변할 때 공명 각도의 변화율도 선형적으로 일정하게 변화하였다. 그때 -2차 회절차수에 의존하여 감지된 각도 감도는 190 deg/RUI와 같이 나타났다. 그리고, 두 회절차수에 의존하여 감지된 이중 각도 감도는 $n_a = 1.01$ 의 경우 $\theta_{-2} - \theta_{+1} = 31.9^\circ$ 이고 1.06은 $\theta_{-2} - \theta_{+1} = 43^\circ$ 이므로 $S_{\theta\theta} = 222$ deg/RUI와 같음을 보였다.

금속격자로 구성된 bio-sensor의 공진 특성을 보다 명확하게 해석하기 위하여 공진 시에 격자 배열 주변에서 발생하는 자기장 분포의 y -축 성분($|H_y|$)을 그림 7에 도시하였다. 그림 7(a)는 동작 파장은 0.7 μm , 격자두께와 격자비율은 각각 0.03 μm 와 0.1 그리고 격자주기는 1.4 μm 에서 발생한 필드 패턴을 보여주며, 그림 7(b)는 0.75 μm 의 파장, 0.03 μm 와 0.3의 격자두께와 격자비율, 그리고 0.7 μm 의 격자주기에 대한 필드 패턴이다. 그림에서 보듯이, 공진을 발생시키는 금속 격자 사이의 slit 주변에 강한 자기장 구속이 존재하였다. 즉, 높은 Q -factor와 함께 자체 강도의 최대 향상 계수가 입사된 자체의 강도와 비교하여 약 8~16배 정도 되었다. 일반적으로, 자체 향상 효과는 도파관 공진의 자연스러운 결과라 할 수 있다.

마지막으로, 금속 Ag로 구성된 격자구조의 격자주기

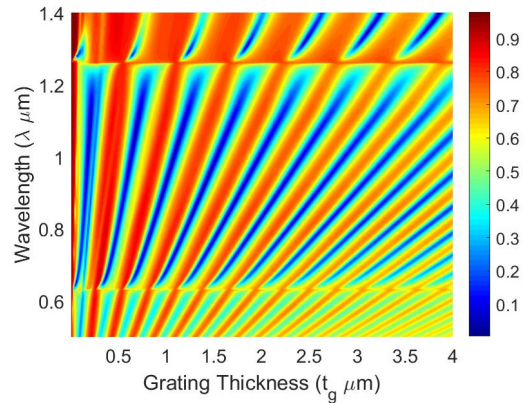


그림 8. 금속이 Ag인 경우, 다른 파장과 격자 두께에 대한 반사 스펙트럼의 등고선 그림.

Fig. 8. (Color Online) Contour plots of reflection spectra for different wavelengths and grating thicknesses, in which the metal is Ag.

와 격자비율이 각각 0.7 μm , 0.3이고 분석물의 굴절률이 1.01인 경우, -2차 회절차수의 공진 각도인 51.3° 에서 다른 파장과 격자 두께에 대하여 반사율을 분석하였다. 그림 8에서 보듯이, 예상과 같이 Fabry-Perot 공진기와 같은 현상인 격자 두께가 변경하면 최소 반사율이 발생하는 파장이 변경된다는 것을 분명하게 확인할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 Au, Ag와 같은 금속으로 구성된 격자 구조의 고성능 격자 결합 SPR bio-sensor 특성을 고유치 문제에 기초한 MTLT의 등가 전송선로 사용하여 정확하게 분석하였다. Au 금속 격자의 경우, -4차 회절차수를 사용하여 surface plasmon을 여기시킴으로써 고감도의 bio-sensor 특성을 얻을 수 있었으며, Ag인 경우에는 -2차 회절차수에 의존하여 그 같은 결과를 도출하였다. 또한, 고차 반사 dip과 낮은 차수의 반사 dip을 동시에 고려하면, 즉 이중 각도 감도 $S_{\theta\theta}$ 를 사용하면 금속 격자 기반 시스템에서 감도 개선의 또 다른 효과적인 방법을 얻을 수 있음을 보였다.

결론적으로, 직사각형 금속 격자 기반 bio-sensor 시스템에서 잘못된 프로파일리 있는 격자의 성능을 좋게 유지하기 위하여 더 높은 회절차수와 여러 개의 회절차수를 동시에 취급하는 더 많은 연구가 수행되어야 한다고 생각한다.

References

- [1] T. W. Ebbesen, H. J. Lezec, H. F. Ghaemi, T. Thio, and P. A. Wolff, "Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays," *Nature*, Vol. 391, pp. 667~669, 1998.
DOI: <https://doi.org/10.1038/35570>
- [2] C. Genet, and T. W. Ebbesen, "Light in tiny holes," *Nature*, Vol. 445, pp. 39~46, 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1038/nature05350>
- [3] F. J. García-Vidal, and L. Martín-Moreno, "Transmission and focusing of light in one-dimensional periodically nanostructured metals," *Phys. Rev. B*, Vol. 66, pp. 155412, 2002
DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.66.155412>
- [4] S. Collin, F. Pardo, R. Teissier, and J. L. Pelouard, "Strong discontinuities in the complex photonic band structure of transmission metallic gratings," *Phys. Rev. B*, Vol. 63, pp. 033107, 2001.
DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.63.033107>
- [5] F. Marquier, J. J. Greffet, S. Collin, F. Pardo, and J. L. Pelouard, "Resonant transmission through a metallic film due to coupled modes," *Opt. Express* Vol. 13, pp. 70~76, 2005.
DOI: <https://doi.org/10.1364/OPEX.13.000070>
- [6] N. Garcia, and M. Nieto-Vesperinas, "Theory of electromagnetic wave transmission through metallic gratings of subwavelength slits," *J. Opt. A, Pure Appl. Opt.*, Vol. 9, pp. 490~495, 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1088/1464-4258/9/5/012>
- [7] 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/JIIBC.2015.15.1.261>
- [8] E. D. Palik, "Handbook of Optical Constants of Solids", Vol. I, Academic Press-New York, 1985.
- [9] In-Tae Kim, Kang-Mo Lim and Yeon-Serk Yu, "Reflectance and Transmittance Properties of Holographic Polymer Dispersed Liquid Crystal Gratings," *The Journal of Korean Institute of Information Technology (JKIIT)*, Vol. 5, pp. 196-204, 2007.

저자 소개

호 광 춘(중신회원)



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

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

※ 본 연구는 한성대학교 교내연구비 지원과제입니다.