

금속 기판 상의 유전체 격자에서의 표면 플라즈몬 파수

Surface Plasmon Polariton Wave Number in the Dielectric Gratings on the Metal Substrate

박정현, 최다운, 이병호

서울대학교 전기공학부 및 액티브 플라즈모닉스 응용시스템 창의연구단

E-mail : byoungho@snu.ac.kr

표면 플라즈몬 폴라리톤(surface plasmon polaritons: SPPs)은 금속 표면에 존재하는 자유 전자가 외부의 전자기파와 결합하여 집합적으로 공진하며 표면을 따라 진행되는 파이다. SPPs를 이용하여 파장보다 작은 크기로 빛을 집속할 수 있다. 이러한 특성 때문에 SPPs를 이용한 나노 크기의 광도파로나 높은 감도를 갖는 바이오 센서, 효율이 높은 박막 태양전지 등의 다양한 연구가 활발히 진행되고 있다⁽¹⁾.

광파의 진행 방향을 따라 구조물의 크기나 형태, 구성하는 물질의 유전율이 주기적으로 변경되는 광소자를 격자(grating)라고 한다. 격자에 의해 생성된 격자 파수(grating wavenumber)에 의해 광파의 운동량(momentum)이 변화될 수 있다. 격자를 이용한 예로 투과 필터(transmission filter)나 브래그 반사 거울(Bragg reflector) 등이 있다.

고전 광학에서의 격자에 대한 이론은 SPP에서의 격자에도 유사하게 적용된다. 광섬유(optical fiber)에서 코어(core)의 유전율을 주기적으로 바꾸어 특정 파장의 빛에 대한 투과율이나 반사율을 조절하는 방법과 유사하게 유전체를 금속이 둘러싸고 있는 형태의 SPP 광도파로에서도 가운데 있는 유전체의 유전율을 바꾸어 원하는 파장 특성을 갖는 광소자를 제작할 수 있다⁽²⁾. 또한 얇은 금속막에 존재하는 파장보다 작은 크기를 갖는 틈새 slit)의 주위에 적절한 주기를 갖는 격자를 배열하여 한쪽 방향으로만 진행하는 SPP 광원(source)을 만들거나 특정 방향으로 진행하는 광파를 생성할 수도 있다⁽³⁾. 격자를 이용한 SPP 구조물을 설계하고 분석하기 위해서는 SPP와 격자의 상호 작용에 대한 이해가 필수적이다. 본 연구에서는 유전체로 이루어진 SPP 격자의 파수에 대한 이론적 모델을 제시한다.

그림 1은 금속 기판 상의 유전체 격자를 나타낸다. Λ 는 격자의 주기, h 는 격자의 높이를 나타낸다. f 는 격자의 채움 상수로서 주기 안에서 격자가 차지하고 있는 비율을 나타낸다. ϵ_0 , ϵ_d 및 ϵ_m 는 각각 공기, 유전체, 금속의 상대 유전율을 나타낸다. 그림 1의 구조물의 왼쪽에서 SPP가 여기(excitation)되어 $+z$ 방향으로 진행하고 있다고 가정하였다. 진행되는 광파의 자유 공간 파장(free space wavelength)은 λ_0 이며, transverse magnetic(TM)의 편광 상태를 가진다. 자유 공간에서의 파수는 $k_0=2\pi/\lambda_0$ 이다.

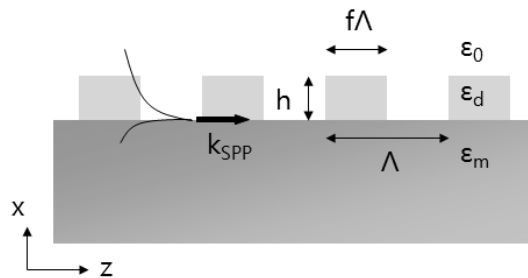


그림 1. 금속 기판 상의 유전체 격자

금속과 공기가 있는 영역(single interface: SI)에서의 SPP의 파수는 식 (1)을 이용하여 구할 수 있다. 두께가 h 인 유전체가 공기와 금속 사이에 존재하는 영역(double interface: DI)에서의 SPP의 파수는 식 (2)를 이용하여 구할 수 있다. 한편 한 주기를 진행하는 동안 SPP가 겪는 위상 변화는 식 (4)와 같이 각 영역에서의 위상 변화의 합으로써 주어진다. 따라서, 한 주기에서의 SPP의 유효굴절률은 식 (5)로써 주어진다.

$$\eta_0 + \eta_m = 0 \tag{1}$$

$$(\eta_0 + \eta_d)(\eta_d + \eta_m) + (\eta_0 - \eta_d)(\eta_d - \eta_m)e^{ih\sqrt{\epsilon_d k_0^2 - k_{SPP}^2}} = 0 \tag{2}$$

$$\eta_l = k_l / \epsilon_l = \sqrt{\epsilon_l k_0^2 - k_{SPP}^2} / \epsilon_l (l = 0, d, m) \tag{3}$$

$$\phi_{TOTAL} = \phi_{SI} + \phi_{DI} = Re[k_{SI}](1-f)\Lambda + Re[k_{DI}]f\Lambda \tag{4}$$

$$n_{eff} = Re[k_{SPP} / k_0] = n_{SI}(1-f) + n_{DI}f \tag{5}$$

그림 2(a)는 $\epsilon_0=1$, 및 $\epsilon_m=-10.16+0.83i$, $\lambda_0=532\text{nm}$, $\Lambda=80\text{nm}$ 에 대해서 유전체의 굴절률($n_d = \sqrt{\epsilon_d}$)에 따른 유효굴절률(n_{eff})의 변화를 엄밀한 결합 파동 해석(rigorous coupled-wave analysis: RCWA)을 이용한 결과를 나타낸 것이다⁽³⁾. 그림 2(b)는 식(5)에서 제안된 모델을 이용하여 계산된 결과로서, (a)에서의 결과와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서 제안된 모델을 이용하여 다양한 SPP 격자 응용 구조에서의 격자 설계 및 분석이 가능할 것으로 예상된다.

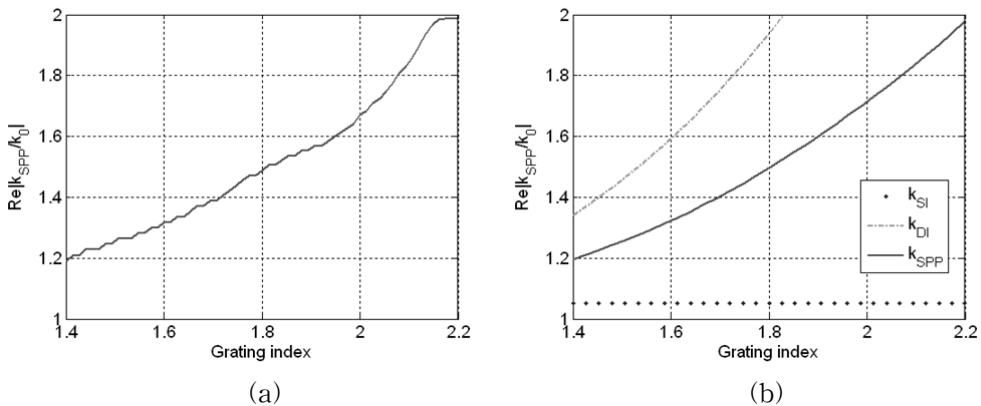


그림 2. 격자 유전체의 굴절률에 따른 SPP의 유효 굴절률.
 (a) RCWA를 이용한 계산 결과⁽³⁾. (b) 제안된 모델을 이용한 계산 결과

※ 본 연구는 한국과학재단/교육과학기술부의 창의 연구단 지원 사업에 의해 이루어졌습니다(액티브 플라즈모닉스 응용시스템 창의연구단).

1. W. L. Barnes, A. Dereux, and T. W. Ebbesen, "Surface plasmon subwavelength optics," *Nature* **424**, 824-830 (2003).
2. J. Park, H. Kim, and B. Lee, "High order plasmonic Bragg reflection in the metal-insulator-metal waveguide Bragg grating," *Opt. Express* **16**, 413-425 (2008).
3. S. Kim, H. Kim, Y. Lim, and B. Lee, "Off-axis directional beaming of optical field diffracted by a single subwavelength metal slit with asymmetric dielectric surface gratings," *Appl. Phys. Lett.* **90**, 051113 (2007).