

구조화된 금속면에 생기는 표면파의 자기조준 현상

Self-collimation Phenomena for Surface Waves on Structured Metal Surface

오상순, 이성구, 김재은, 박해용*

한국과학기술원 물리학과

hypark@kaist.ac.kr

일반적으로 유전체와 금속사이에서는 표면 플라즈몬(surface plasmon)이 존재할 수 있다⁽¹⁾. 표면 플라즈몬 모드는 유전체와 금속의 경계면에 존재하는 전자기파와 전자의 진동이 결합된 모드로, 경계면에서 유전체와 금속 양방향으로 멀어질수록 지수함수적으로 감쇄하는 전기장 분포를 가진다⁽²⁾. 표면 플라즈몬은 전자기파가 금속 내부로 침투깊이(skin depth)만큼 스며들 수 있기 때문에 존재할 수 있다. 전기장이 내부로 스며들 수 없는 완전도체(perfect conductor)와 유전체 사이에서는 표면 플라즈몬이 존재하지 않는다. 하지만, 일정한 깊이의 주기적인 구멍을 뚫어 전자기파가 표면 내부로 스며들 수 있도록 만들면 완전도체에서도 표면 플라즈몬과 유사한 분산관계를 가지면서 표면에 존재하는 모드가 있음이 최근에 증명되었다⁽³⁾. 이런 식으로 구조화된 완전도체에 생기는 표면파 모드는 구멍의 주기, 깊이 등을 조절하여 분산관계를 조절할 수 있기 때문에 광학소자 분야에서 다양한 응용이 기대되고 있다. 이미 표면 플라즈몬 모드를 가지고 있는 금속에 주기적인 구멍을 뚫으면 복합 표면 플라즈몬 모드를 만들 수 있는데, 이 경우 '실제' 표면 플라즈몬 모드와 주기적인 구멍에 의해 생긴 표면파 모드가 합쳐져 있기 때문에 두 개를 각각 구분 짓기는 힘들다. 이 논문에서는 구조화된 금속 표면에 생기는 복합 표면 플라즈몬 모드를 이용하여 자기조준 현상이 생기는 것을 FDTD(Finite-difference time-domain)방법을 이용하여 관찰하였다.

FDTD 방법을 이용하여 금속 구조에 대한 계산을 하기 위하여 드루드 모델(Drude model)을 사용하였다. 드루드 모델에 의하면 금속의 유전상수(dielectric constant)는 전자기파의 주파수(ω)에 따라서 다음과 같이 주어진다.

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega}$$

ω_p 는 금속의 플라즈마 주파수(plasma frequency)이고, γ 는 충돌 주파수(collision frequency)이다. 여기서는 은(silver)의 경우를 고려하여 ω_p 는 $43\text{rad}/\mu\text{m}(=1.29 \times 10^{16}\text{rad/s})$, γ 는 $1.333/\mu\text{m}(0.8 \times 10^{14}/\text{s})$ 을 사용하였다. 그림 1과 같이 금속 표면에 사각구멍이 주기(a) $1\mu\text{m}$, 한 변의 길이(d) $0.875\mu\text{m}$, 깊이(h) $1\mu\text{m}$ 로 뚫려 있는 구조를 고려하였다.

복합 표면 플라즈몬 모드의 밴드구조를 계산하기 위하여 FDTD계산을 하였는데, 하나의 구멍이 있는 단위 셀에 xy평면 방향으로 블로흐 경계조건(Bloch boundary condition)을 적용하고, z방향으로는 PML(Perfectly matched layer) 경계조건을 적용하였다. 계산 격자 크기는 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.05\mu\text{m}$ 이다. 그림 2와 같은 밴드구조를 얻었는데 세 개의 밴드가 광선(light line) 아래 있음을 볼 수 있다. 첫 번째 브릴루앙 영역(1st Brillouin zone)에 존재하는 파수벡터들에 대하여 FDTD계산을 하면 첫 번째 밴드에 대한 등주파수선(EFC: Equi-frequency contour)을 그릴 수 있다. 그림 3을 보면 주파수

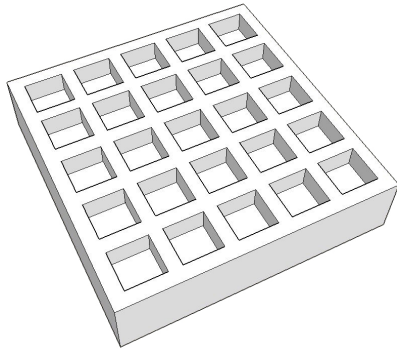


그림 1. 주기적인 사각기둥 구멍이 뚫린 금속 구조

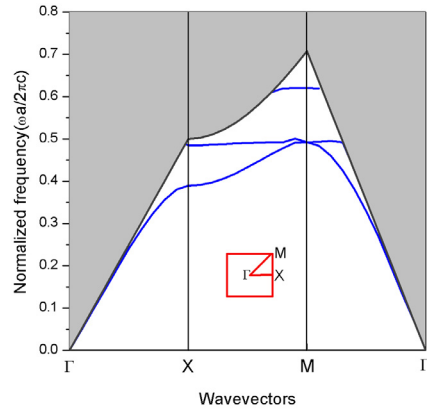


그림 2. 복합 표면 플라즈몬 모드의 밴드구조

0.422(c/a)에서 ΓM 방향으로 매우 평평한 등주파수선이 존재한다. 이것은 이 주파수에서 복합 표면 플라즈몬 모드가 ΓM 방향으로 자기조준 될 수 있음을 의미한다. 이를 확인하기 위해 x 방향으로 $13\sqrt{2}a$, z 방향으로 $\sqrt{2}a$ 인 단위 셀을 잡고(a는 격자의 주기), ΓM 방향으로 전파하는 전자기파를 계산하여 전기장을 그려보았다. x=0인 점에서는 대칭 경계조건(symmetric boundary condition)을 사용하였고, z방향으로는 블로흐 경계조건, 그리고 나머지 방향으로는 PML 경계조건을 사용하였다. 그림 4는 시간이 $200/c_{\mu m}(=6.667 \times 10^{-13} s)$ 일 때의 전기장의 분포를 그린 것인데, 여전히 전자기파가 금속 표면에 속박되어 있으면서도 x방향으로 퍼지지 않고 잘 조준되어 감을 확인할 수 있다.

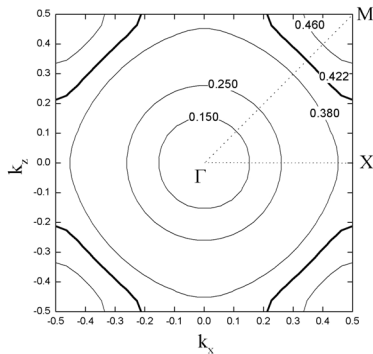


그림 3. 복합 표면 플라즈몬 모드의 등주파수선

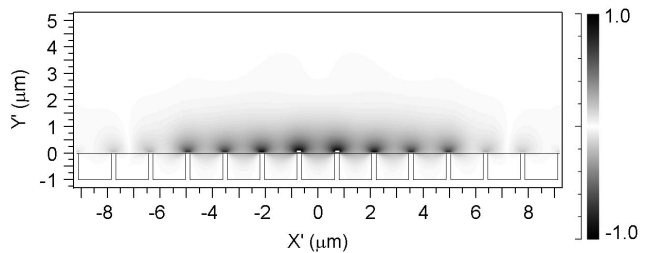


그림 4. 자기조준되어 진행되는 복합 표면 플라즈몬 모드의 전기장($t=200/c_{\mu m}$)

참고문헌

1. H. Raether "Surface Plasmons on smooth and rough surfaces on gratings, Springer-Verlag New York (1988)
2. W. Barnes, A. Dereux, T. Ebbesen, "Surface plasmon subwavelength optics", Nature 424, 824 (2003).
3. J. B. Pendry, L. Martin-Moreno, F. J. Garcia-Vidal, "Mimicking surface plasmons with structured surfaces", Science 305, 847 (2004).