

파장보다 작은 크기의 구멍이 주기적으로 뚫린 금속 필름에서의 빛의 투과율 증가에 대한 연구

Transmission Enhancement Of Light By Sub-Wavelength Hole Arrays In Metallic Films

김명우, 김튼튼, 김재은, 박해용

한국과학기술원 물리학과

mwkim99@kaist.ac.kr

T. W. Ebbesen은 1998년에 은으로 된 금속 필름에 파장보다 작은 크기의 구멍을 주기적으로 뚫었을 때 특정 파장에서 그 필름을 통과하는 빛의 투과율이 구멍이 하나인 필름을 통과할 때보다 최고 1000배 가까이 비정상적으로 증가한다는 사실을 실험적으로 증명하였다⁽¹⁾. 이는 주기적으로 뚫린 구멍에 의해 금속 필름을 통과하는 빛이 표면에서 회절되어 생기는 표면 플라즈몬(surface plasmon polariton) 현상에 의한 것으로 설명되었다. 특히 금속 필름에서, 주기적으로 뚫린 구멍은 입사하는 빛에 대해서 회절격자처럼 작용하여 공기중의 빛과 표면 플라즈몬이 커플링할 수 있는 조건을 마련해준다. 이때 여기되는 표면 플라즈몬 - SPP-Bloch wave(SPP-BWs)라 불린다 - 의 파장은 아래의 식과 같이 금속 필름의 표면에 뚫린 구멍의 주기 P와 밀접한 관련이 있으며⁽²⁾, 투과 스펙트럼의 최대값과 최소값에 해당하는 파장의 값을 결정하는 가장 큰 요소가 된다.

$$\lambda_{SPP} = \frac{P}{n_x^2 + n_y^2} \left(\frac{\epsilon_{Ag} \epsilon_d}{\epsilon_{Ag} + \epsilon_d} \right)^{1/2}$$

금속 필름에서 파장보다 작은 크기의 구멍을 통해 빛의 투과율이 오히려 증가하는 이유으로써, 표면 전자기파들이 금속 표면을 따라 진행하다가 주위의 다른 구멍들을 통과하는 빛과 간섭을 일으켜서 비정상적인 투과율 향상이나 축소를 일으킨다고 설명할 수 있다.

본 연구에서는 아래 그림 1과 같이 사각격자 모양의 구멍이 주기적으로 뚫린 금속 필름에 빛을 수직 입사 시켜 투과되는 빛의 스펙트럼을 통해 투과율의 비정상적인 증가를 보이고, 투과율이 비정상적으로 증가되는 파장과 표면 플라즈몬의 모드와의 관계를 알아보려고 한다.

은(Ag)으로 된 금속 필름의 두께는 100nm이며 윗부분은 공기, 아랫부분은 유리로 되어있다. 사각형 구멍의 한 변의 길이는 200nm, 또는 원형 구멍일 때는 반지름 100nm이며, 주기는 500nm에서 800nm까지 변화시키면서 파장이 300nm에서부터 2000nm의 파장을 갖는 빛을 투과시켜서 투과율을 계산하였다. 이때 은의 유전율은 Drude model에 따라 아래와 같은 식으로 주어지며, fitting parameter는 다음과 같다. 이때 은의 plasma frequency는 약 3.8eV이다.

$$\epsilon_{Ag} = \epsilon_{\infty} - \frac{\omega_D^2}{\omega^2 - i\gamma_D\omega}$$

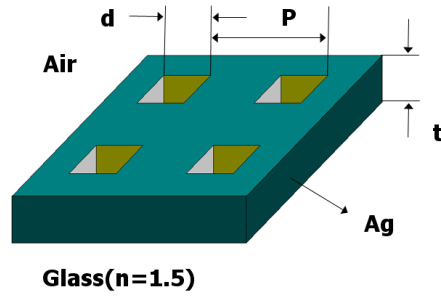


그림 1 계산 구조

계산에는 3차원 Finite-Difference Time-Method를 사용하였으며, 투과율은 아래와 같은 식으로 구하였다. 이때 $T_{tot}(\lambda)$ 는 필름을 투과한 빛의 양, $T_{film}(\lambda)$ 는 금속 필름에 구멍이 없을 때 빛의 투과율, I_{inc} 는 필름으로 입사되는 빛의 양, 그리고 A 는 필름의 넓이와 구멍의 단면적과의 비율이다.

$$T(\lambda) = \frac{[T_{tot}(\lambda) - T_{film}(\lambda)]}{I_{inc} \cdot A}$$

정사각형 모양의 구멍과 원형 구멍에 대해 각각 주기를 500nm에서 800nm까지 100nm단계로 변화시켜 가면서 계산하였다. 그 결과, 아래의 그림 2와 같이 특정 파장에서는 투과율이 1이 넘는 값이 나왔으며, 일반적으로 같은 주기를 가질 때 구멍의 모양에 상관없이 같은 파장에서 투과율이 최대값을 갖는 것으로 나타났다. 이는 위의 식과 같이 구멍의 주기성에 관련된 표면 플라즈몬(SPP-BWs)이 금속 표면에 존재하며, 빛의 투과율에 영향을 준다고 볼 수 있다.

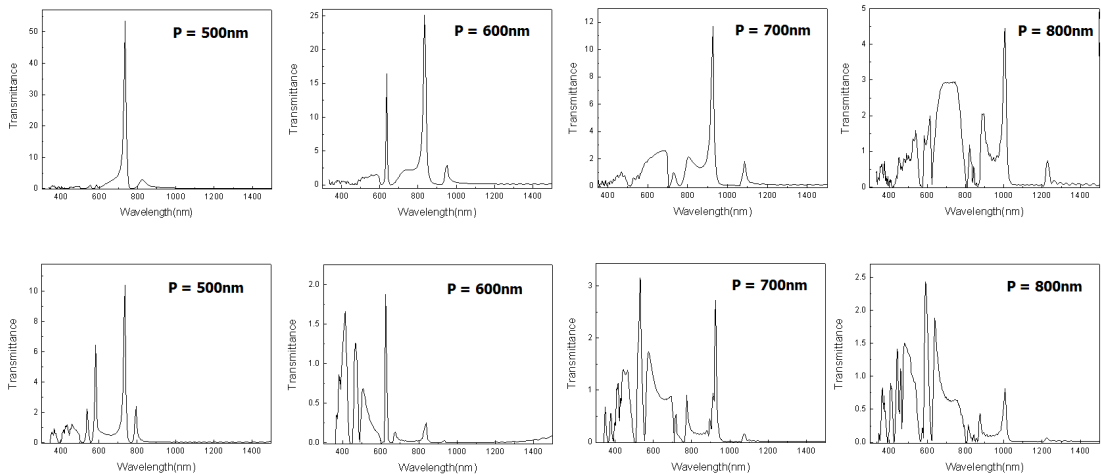


그림 2 : 주기에 따른 투과율의 변화(윗줄 : 정사각형 모양, 아랫줄 : 원형 모양)

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(London) 391, 667-669(1998).
2. S-H Chang and S. K. Gray, and G. C. Schatz, "Surface Plasmon generation and light transmission by isolated nanoholes and arrays of nanoholes in thin metal films", OPTICS EXPRESS 13, 3150(2005)