

표면 플라즈몬 공명현상을 이용한 회절한계 이하 고강도 광스팟을 위한 트라이앵글형 개구 설계

Design of triangular-shaped aperture for a small optical spot with high intensity beyond diffraction limit using surface plasmon resonance

*이원섭¹, 강성목², 김태섭¹, #박노철¹, 박경수¹, 박영필¹

*W. S. Lee¹, S. M. Kang², T. S. Kim¹, #N.C. Park(pnch@yonsei.ac.kr)¹, K. S. Park¹, Y. P. Park¹

¹ 연세대학교 기계공학과, ² 연세대학교 정보저장기기연구센터

Key words : Nano Aperture, Localized Surface Plasmon Resonance, Finite-Difference Time-Domain (FDTD)

1. 서론

광정보저장장치, 근접장 주사 현미경 (Near field scanning optical microscopy: NSOM), 리소그래피 등 많은 분야에서 작은 크기의 고강도 광을 필요로 한다. 크기가 작고 강도가 강한 광을 만들기 위해 이용되는 보편적인 방식은 렌즈를 이용해 입사되는 광을 굴절시키는 것이다. 이때 출사빔의 최소 크기는 식 1 과 같이 광의 굴절 한계보다 작아질 수 없다.

$$\Delta = \frac{\lambda}{2n\sin(\theta)} = \frac{\lambda}{2NA} \quad (1)$$

위 식에서 Δ 는 굴절 한계, λ 는 광의 파장, n 는 매질의 굴절율, θ 는 입사각을 의미한다. 위 식을 통해 파장이 짧은 광을 사용하거나, 개구수 (Numerical Aperture: NA)가 큰 렌즈를 사용하면 출사빔의 크기를 줄일 수 있음을 알 수 있다. 그러나 공기 중에서의 $n\sin(\theta)$ 는 1 보다 작기 때문에, 렌즈를 통해 굴절시킨 광의 크기는 $\lambda/2$ 보다 커진다. 이를 극복하기 위해 연구된 것이 Solid Immersion Len (SIL)이다. SIL 은 근접장 영역의 광을 이용하여 1 보다 큰 NA 를 얻을 수 있기에, $\lambda/2$ 보다 작은 굴절 한계를 얻을 수 있다.¹ 그러나 이 역시 2 보다 큰 n 값을 갖는 SIL 을 이용한 근접장 시스템을 제작하기 어렵기 때문에 $\lambda/4$ 이하의 크기를 갖는 출사빔을 얻기 어렵다.

이보다 작은 출사빔을 만들기 위해 연구된 것이 나노개구이다. 나노개구란 금속박막에 광의 파장보다 작게 뚫은 구멍을 말하는데, 광이 나노개구에 입사하면 금속박막에 의해 광의 경로가 차단되어 나노개구의 크기보다 작은 광만이 투과하게 된다.² 그러나 투과되는 광의 양이 제한적이기에 출사빔의 강도가 약한 문제가 있다. 이를 해결하기 위해 표면 플라즈몬 공명 현상 (Surface plasmon resonance: SPR)을 이용한 나노개구의 형상들이 연구되고 있다.²

표면 플라즈몬 공명 현상이란 금속의 표면에 빛이 입사함에 따라 금속과 유전체의 경계면에서 표면 플라즈몬이 집적되어 여기되는 현상을 말한다. 표면 플라즈몬 공명 현상에 의한 출사빔의 증폭률을 증가시키기 위해서는 여기된 전자들이 입사되는 전자장과 공명할 수 있도록 나노개구의 금속 표면에 표면 플라즈몬이 축적될 수 있는 구조를 만들어 주어야 한다. 그렇게 함으로 높은 에너지를 가진 표면 플라즈몬은 나노개구 내부의 금속 모서리에 집적되는 국소 표면 플라즈몬 공명 현상을 야기시킨다.³ 이에 따라 현재 국소 표면 플라즈몬 공명 현상을 이용한 고강도를 가지며 작은 광 크기를 형성할 수 있는 C 형상, H (또는 I) 형상, bow-tie 형상의 나노개구가 주로 연구되고 있다.^{2,4,5}

그러나 C 형상, H 형상의 나노개구는 빔의 크기가 상대적으로 크고, bow-tie 형상의 나노개구는 제작이 어렵다는 문제가 있다. 그러므로 본 논문에서는 높은 강도의 작은 출사광을 형성하며, 상대적으로 제작이 용이한 트라이앵글형 나노개구를 설계하였다. 또한 플라즈모닉 나노 리소그

래피⁶ 등에 응용될 수 있도록 UV 파장 영역에서 높은 출사광 강도를 갖도록 유한차분시간영역법 (Finite-Difference Time-Domain: FDTD)⁷을 이용하여 연구하였다.

2. 시뮬레이션 조건

표면 플라즈몬 공명 현상은 매질에 입사되는 전자장과 금속 표면 전자의 상호작용에 의한 현상이다. 이에 의해 야기되는 근접장 영역의 출사빔 강도와 크기를 계산하는 방법은, 입사하는 빛과 매질의 상호작용을 맥스웰 회전방정식으로 계산하는 것이다. 그러나 트라이앵글형 개구의 복잡한 형상을 수식적으로 푸는 것은 매우 어렵다. 그러므로 본 연구에서는 FDTD 방법을 이용한 시뮬레이션으로 해석을 수행하였다.

FDTD 해석 방법은 구조물을 Yee cell 이라고 하는 작은 격자모양으로 나눈 후, 각각의 Yee cell 에서 맥스웰 회전방정식을 풀어 전기장과 자기장을 해석하는 방식이다. 그러므로 FDTD 방법을 이용하면 복잡한 형상에 대해서도 해석이 가능하기 때문에, 본 논문과 같이 원형 등의 기본적인 형상이 아닌 나노개구를 설계하는 데에 적합하다고 할 수 있다.

앞서 언급되었듯이 표면 플라즈몬 공명 현상은 전자장과 매질의 상호작용이므로, 금속매질의 유전상수와 입사되는 빛의 파장, 편광방향과 깊은 관계가 있다. 금속매질의 유전상수는 실수부 값이 음수이고 허수부 값은 작을수록 증폭이 잘 되는데 이를 가장 잘 만족시키는 금속매질로는 Ag, Au 등이 있다.⁸ 이 중 Ag⁹의 증폭률이 Au 에 비해 더 좋기 때문에 본 논문에서는 Ag 를 금속박막의 매질로 선택하였다.

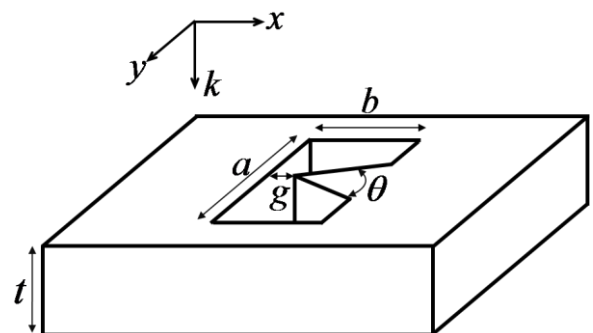


Fig.1 Schematic of the Triangular nanoaperture

그림 1 은 트라이앵글형 나노개구를 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 트라이앵글형 개구는 국소 표면 플라즈몬 공명 현상을 이용하기 위해 사각형의 구멍 안에 삼각형의 마루가 돌출된 형상을 하고 있다. 전자장이 입사하게 되면 여기된 전자들이 삼각형 마루의 모서리에 축적되어 높은 전자장 강도를 갖게 된다. 그러므로 전자들이 축적되기 쉬운 구조인 마루의 꼭지점 부분에서 최대의 전자장 증폭율을 얻게 된다. 그렇기 때문에 트라이앵글형 나노개구에서는 표면 플라즈몬 공명 현상이 잘 일어날 수 있도록

마루의 형상 및 마루와 사각형의 옆면 사이의 거리를 조절하는 것이 중요하다.

또한 나노개구 자체의 형상에 따라 전자장이 나노개구에 집중되는 정도가 달라지게 되는데, 이에 따라 전체적인 사각형 구멍의 형상 (a, b) 역시 조절해야 할 필요가 있다.

이에 따라 삼각형 마루의 각도 θ , 마루의 모서리와 나노개구 옆면의 사이 거리 d , 나노개구의 총 가로길이 a , 나노개구의 세로길이 b 와 두께 t 가 변수로 결정하였다.

위 변수들에 대해 Table.1의 값을 적용해 FDTD 해석을 수행하였다.

Table 1 Improved design factors for T-angular shaped nano aperture

Design Parmeter	Angle (θ)	Height (a)	Width (b)	Gap (g)	Thickness (t)
Value (Unit)	70 (deg.)	400 (nm)	220 (nm)	60 (nm)	200 (nm)

금속 매질의 유전상수는 파장에 따라 변하는 복소수의 형태이므로, 매질에 대한 해석의 정확도를 높이기 위해 modified Debye model 을 사용하였다.¹⁰ 또한 해석공간 주변의 6 면은 Liao 흡수 경계조건으로 설정하여 해석공간 주위에서 일어날 수 있는 반사에 대한 영향을 줄였으며, 405 nm 파장을 가진 강도 $|E|^2$ 가 1 인 평면파를 입사시켜 time step 5000 을 주어 정상 상태를 구현하였다. 나노개구의 바닥면에서 15 nm 떨어진 면에서의 전자장을 측정하였다.

3. FDTD 해석 결과

FDTD 방법을 사용해 트라이앵글형 나노개구를 통과한 출력빔의 크기와 강도를 계산한 결과는 그림 2 와 같다. 나노개구의 바닥면에서 15 nm 떨어진 지점에서 전자장을 측정 한 모습이다. 측정면에서 출사빔의 강도 $|E|^2$ 는 32.66 이며, 마루의 모서리 부분에서 가장 강한 강도를 보였다.

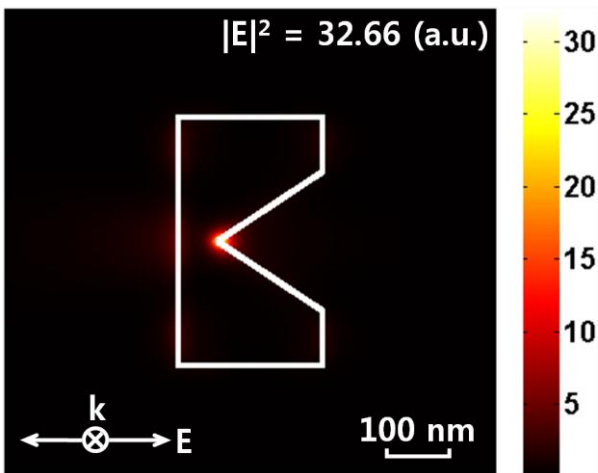


Fig. 2 $|E|^2$ intensity distribution at x-y plane

그림 3은 측정면의 모서리를 중심으로 X, Y 단면에서 광 프로파일을 보여주고 있다. 출사빔의 X 축 강도는 모서리 부분에서 가장 강하며, 모서리에서 멀어지면서 급격하게 감소한 후 소폭 증가하는 경향을 보인다. Y 축 세기 역시 모서리에서 가장 강하며, 모서리에서 멀어지며 급격하게 감소 후 소폭 증가하는 경향을 보인다. 그러나 X, Y 축의 소폭 증가는 최고 세기에 비해 그 강도가 약해 이에 따른 영향은 크지 않다.

Full width at half maximum (FWHM)으로 구한 출사광의 크기는 X 축 방향으로 20 nm, Y 축 방향으로 15 nm 로 매우 작은 크기를 얻었다.

4. 결론

405 nm 파장의 빔을 증폭시키기 위해 Ag 박막 위에 트라이앵글형 나노개구를 설계하고 FDTD 방법을 이용하여

해석하였다. 이 형상을 통해 나노개구의 바닥면으로부터 15 nm 떨어진 면에서 빔의 강도 32.66 (a.u.)와 X 축 빔의 크기 20 nm, Y 축 빔의 크기 15 nm 를 얻을 수 있었다. 이는 회절한계 이하의 출력빔 크기가 요구되는 광 정보 저장장치, 근접장 주사 현미경 (NSOM), 리소그래피 등에 응용될 수 있다.

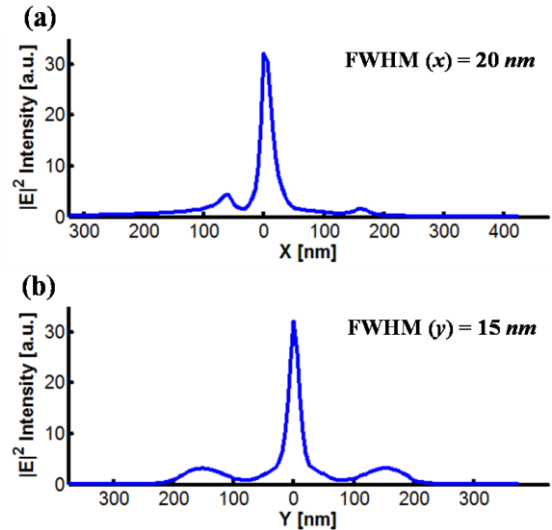


Fig. 3 $|E|^2$ cross section of triangle shaped aperture at (a) x-direction and (b) y-direction

참고문헌

1. Wan-Chin Kim, Yong-Joong Yoon, Hyun Choi, No-Cheol Park, and Young-Pil Park, "Effects of optical variables in immersion lens-based near-field optics, Optics Express, Vol.16, No.18, 13933-13948, 2008
2. Xiaolei Shi, "Resonant optical transmission through a single sub-wavelength aperture for near field applications", Ph.D. thesis. Stanford University, 2003.
3. Sung-Mook Kang, Jin Han, No-Cheol Park, Kyoung-Su Park, Byung-Kwon Min, and Young-Pil Park, "Multiple excitation of localized surface Plasmon to create a 10nm X 10nm strong optical spot using an Au nanoparticle array-based ridge waveguide", Optics Express, Vol.18, No.2, 1576 - 1585, 2010
4. E.X.Jin and X. Xu, "Plasmonic effects in near-field optical transmission enhancement through a single bowtie-shaped aperture", Applied Physics, B84, 3 - 9, 2006.
5. Eric X.Jin and Xianfan Xu, "Finite-Difference Time-Domain Studies on Optical Transmission through Planar Nano-Apertures in a Metal Film", Japanese Journal of Applied Physics, Vol.43, No. 1, 407 - 417, 2004.
6. Yongwoo Kim, Seok Kim, Howon Jung, Eungman Lee and Jae W. Hahn, "Plasmonic nano lithography with a high scan speed contact probe", Optics Express, Vol.17, No.22, 19476-19485, 2009.
7. Remcom Inc.: XFDTD 6.5 software, 2008
8. 박인용, 김승철, 진종한, 김승우, "근접장 증폭을 위한 단일 금속 박막 나노구조체 해석", 한국정밀공학회지, 149 - 150, 2008
9. E. D. Palik, ed., "Handbook of Optical Constants of Solids", Academic, 1996
10. K. Kunz and R. Lubbers, "The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics", CRC Press, 1996