

# 근접장 증폭을 위한 단일 금속 박막 나노구조체 해석 Analysis of thin metal film nano structure for field enhancement

\*박인용, 김승철, 진종한, #김승우

\* I.Y. Park, S. Kim, J. Jin, #S. W. Kim(swk@kaist.ac.kr)

한국과학기술원 기계공학과

Key words : Subwavelength hole, Surface plasmon, Field enhancement

## 1. 서론

빛의 파장 크기보다 작은 개구를 통과한 빛은 파장 이하의 작은 크기로 집광될 수 있으나 투과량이 극히 적어 사용에 많은 제한이 있었다. 하지만 Ebessen<sup>1</sup> 등에 의해 제안된 것으로 빛의 파장보다 작은 크기의 나노개구 배열을 금속박막에 제작하면, 파장크기보다 작은 나노개구임에도 불구하고 현저한 빛의 투과량 증가를 보이게 된다. 이 특성을 이용하여 현재 다양한 나노개구에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 빛의 파장크기보다 작은 나노개구에 빛이 통과하게 되면 기존의 빛의 성질과는 다른 특성을 보이는데 회절한계보다 작은 크기로 빛을 집광할 수 있을 뿐만 아니라 수 nm ~ 수십 nm의 공간에서 근접장 성질에 의해 입사한 빛보다 증폭된 빛도 얻을 수 있다. 이 근접장 증폭기술을 응용하면 레이저를 증폭하기 위해서 복잡한 펌핑 시스템이나 외부에너지를 추가로 사용하지 않으면서도 간단하게 레이저를 증폭할 수 있는 장점이 있어 시스템의 크기나 비용을 크게 줄일 수 있다. 그러므로 근접장 증폭 기술은 큰 빛의 세기를 필요로 하는 surface-enhanced Raman scattering (SERS)<sup>3</sup>, second-harmonic generation (SHG)<sup>4</sup>, super continuum generation<sup>5</sup> 등에 응용될 수 있다. 이때 동일한 금속 박막에 제작된 나노개구라도, 나노개구의 크기 및 형상 그리고 나노개구의 배열에 따라 집광된 빛의 크기나 증폭률은 크게 달라지게 된다. 현재는 단순한 모양의 원형이나 사각형 개구보다 증폭률이나 투과량이 큰 C형, I형, bowtie<sup>5</sup> 등 다양한 나노개구 모양이 연구되고 있다.

나노개구를 제작하는 방법으로는 크게 두 가지로 나뉘어 있는데 유리판과 같은 substrate 위에 금속을 증착하여 나노개구를 제작하는 방법과 유리판이 없는 단일 금속박막에 직접 나노개구를 제작하는 방법이 있다. 단일 금속박막의 경우는 유리판이 없으므로 레이저를 집광하였을 때 유리판에 의한 레이저의 흡수나 반사로 인한 손실을 없앨 수 있다. 그리고 나노개구가 뚫려있으므로 유체나 기체를 나노개구로 통과시키면서 증폭된 레이저와의 반응실험에 응용할 수도 있는 장점이 있다. 비교적 증폭률이 좋은 bowtie의 경우, 유리판 위의 금속박막에 제작하게 되면 개구형 뿐만 아니라 antenna 모양 두 가지로 제작할 수 있으나 금속박막 위에 제작하게 되면 개구형으로 제작을 해야 한다. 그러면 bowtie 개구들간의 간격에 따라 증폭률이 달라지게 되는데 antenna 형에 비해서 증폭률이 감소하는 경향을 보인다. 그래서 금속박막 위에 여러 개의 나노개구를 배열로 제작하여도 bowtie 보다 좋은 증폭률을 얻을 수 있는 8자형 나노개구를 본 논문에서는 분석하였다.

그림 1은 8자형 나노개구를 나타내고 있는데 그림과 같이 두 개의 원형이 서로 겹쳐있는 모양을 하고 있다. 두 원형의 중심 사이 거리  $c$ 가 원형의 지름  $d$ 보다 작게 되면 두 개의 원형이 겹쳐지면서 두 원형이 겹쳐지는 가운데 부분 양쪽에 뾰족한 꼭지점을 만들게 되는데, 이 꼭지점에서 최대의 증폭률을 얻게 된다. 그러므로 8자형 나노개구에서는  $c$  값에 따라 꼭지점의 크기 및 간격  $g$ 가 결정되므로  $c$  값이 중요하다고 할 수 있다. 그리고 앞서 설명했듯이 금속박막에 제작했을 경우는 나노개구들 사이의 거리  $p$ 에 따라서 얻을 수 있는 증폭률 역시 달라지므로  $c$  값과 함께

나노개구들 간의 거리  $p$  역시 중요한 값이 된다.

본 연구에서는 근접장 현상을 이용한 펨토초 레이저를 증폭하기 위해서 금속박막 위에 8자형 나노개구를 디자인하고 가장 큰 증폭률을 얻을 수 있는 나노개구의 변수 및 간격  $p$ 를 Finite-Difference Time-Domain (FDTD)을 이용한 전자기 시뮬레이션을 통해 분석하였다.

## 2. 근접장 증폭 이론 및 특징

근접장 증폭은 매질의 표면에서 수십 nm 이내의 매우 좁은 영역에서 얻을 수 있는 것으로 주로 SERS에서 많이 연구되어 왔으며 기본이론은 surface plasmon resonance와 lightning-rod effect로 설명될 수 있다. 금속과 유전체의 경계면에 빛이 입사하게 되면 경계면에서 표면전자가 유도되는데, 입사파와 표면전자의 움직임이 공진조건을 만족하게 되면 표면파가 발생하게 되고, 이것을 surface plasmon resonance라고 한다. 이렇게 입사된 빛에 유도된 표면전자들이 끝이 뾰족한 곳에 모이게 되면 표면전자밀도가 급속히 커져 큰 증폭을 얻을 수 있는데 이를 lightning-rod effect라고 한다. 즉, 매질에 입사되는 빛과 전자의 상호작용에 의한 현상인데 surface plasmon resonance는 금속매질의 유전상수와 lightning-rod effect는 매질의 모양과 깊은 관계가 있다. 최적화된 빛의 증폭을 얻는 조건으로 중요한 것은 매질의 유전상수 (dielectric constant), 입사되는 빛의 파장 및 편광방향 그리고 매질의 모양 및 크기 등이다. 금속매질의 유전상수는 실수부 값이 음수이고 허수부 값은 작을수록 증폭이 잘 되는데 이를 가장 잘 만족시키는 금속매질로는 Ag, Au 등이 있다. Ag가 Au보다 증폭률도 좋고 유전상수의 허수부 값이 적어 증폭도 잘 되지만, Au가 Ag에 비해서 산화에 강해 화학적으로 안정화되어 있으므로 Au가 증폭매질로 선호된다. 그래서 본 논문에서도 Au를 금속박막 매질로 선택하였다.

기존의 개구 모양은 원, 타원과 같이 단순한 모양의 디자인이 많이 연구되었는데 그것은 형상제작 능력의 한계에 기인한 것이다. 하지만 최근에는 E-beam lithography, FIB (Focused Ion Beam)<sup>6</sup>과 같은 수 nm 정도의 분해능으로 제작할 수 있는 방법이 개발되면서 다양한 모양이 연구되고 실제 제작되고 있다. 그래서 본문에서도 그림 1과 같이 원, 타원보다는 큰 증폭값을 얻을 수 있으며 FIB 방법으로 실제 제작이 가능한 8자형 나노개구를 분석하였다.

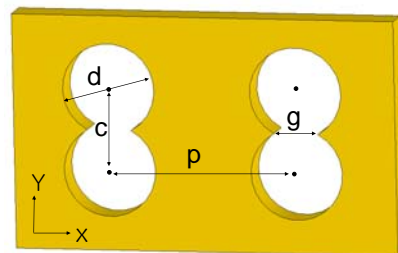


Fig. 1 Schematic of the overlapping double-hole nanostructure showing the important variable values

그림 1은 2개의 8자형 나노개구로 8자형 나노개구 배

열의 주요변수를 보여주는 것이다.  $d$  는 원형의 지름,  $g$  은 두 원형에 생성된 꼭지점 사이 간격 그리고  $c$  는 두 원형 중심 사이의 거리를 의미한다. 그리고 마지막으로  $p$  는 8 자형 나노개구들의 원형 중심간의 거리로 8 자형나노개구의 주기값이 된다.

### 3. 시뮬레이션 결과

근접장 증폭률을 계산하는 방법은 궁극적으로 입사하는 빛과 매질의 상호작용에 의한 Maxwell's equation 을 푸는 것이다. 원이나 타원과 같은 형상은 수식적으로 계산이 가능하지만 형상이 복잡해지면 수식적으로 푸는 것은 매우 힘들다. 그래서 최근에는 근접장 현상을 FDTD 방법을 이용한 시뮬레이션으로 주로 해석을 한다. FDTD 방법은 Maxwell's equation 을 기본으로 하여 매질을 Yee cell 이라고 하는 작은 격자모양으로 나누어 각 점에서의 전기장 및 자기장을 해석하는 것이다. FDTD 방법의 특징은 복잡한 형상에 대해서도 해석이 가능하며 입사되는 빛이 다과장인 경우에도 한번의 계산으로 해석이 가능하다. 그러므로 본 논문에서 근접장 증폭을 위해 사용하는 펄초 레이저와 같은 다과장 광원을 해석하는데 적합하다고 할 수 있다.

FDTD 시뮬레이션 조건은 Modified Debye model 을 적용한 두께 100 nm Au film 과 중심과장이 800 nm 이고 펄스폭이 약 10 fs 인 펄초 레이저를 기본으로 하여 8 자형 나노개구에 대하여 수행하였다. 그리고 시뮬레이션 영역의 경계면은 PML (Perfect Matched Layer)로 설정하여 계산공간상의 유한한 크기로 인하여 발생할 수 있는 반사가 없도록 경계면에 입사하는 빛은 모두 흡수된다고 가정하였다. 시뮬레이션은 먼저 같은  $g$  값을 갖도록 하고  $d$  값만을 변화하면서 최적의 원형 지름을 찾아내고  $c$  를 변화하면서 최적의  $c$  값을 구했다. 이 값을 기본으로 하여 금박막 위에 일정한 주기를 갖도록 8 자형 나노개구들을 배치하여 최적의 주기값  $p$  를 구하였다.

Table 1 Optimized design factors for bow-tie nano device

| Design factor | Diameter (d) | Distance (c) | Gap (g) | Period (p) |
|---------------|--------------|--------------|---------|------------|
| Value(Unit)   | 220(nm)      | 219(nm)      | 20(nm)  | 700(nm)    |

표 1 에서와 같이 100 nm 두께의 금 박막에 8 자형 나노개구를 배열하여 최적의 증폭값을 얻을 수 있는 변수들을 FDTD 방법으로 구하였다. 이 때 입사하는 레이저의 편광 방향은 그림 1 의 X 축이며, 그 이유는 공진하는 전자밀도가 크게 나오기 위해서는 꼭지점의 뾰족한 방향과 전자의 움직임이 평행하여야 하는데 X 축 편광방향이 이 조건을 만족시키기 때문이다. 그림 2 는 실제 증폭된 빛의 세기 분포를 보여주는 그림이다.

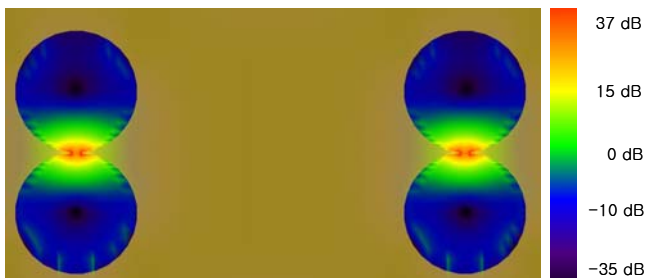


Fig. 2 The result of FDTD simulation of electric field from double-hole structure with 700 nm periodicity and incident beam polarized along the x direction.

그림 2 는 배열 중에서 두 개의 8 자형 나노개구의

FDTD 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 두 개 8 자형 나노개구의 증폭률은 같았으며 예상대로 꼭지점에서 최대 증폭률을 얻었다. 그리고 FDTD 시뮬레이션 결과에서도  $p$  값에 따라 8 자형 나노개구의 증폭률이 달랐는데, 그 이유는 근접장 증폭에 중요한 표면에 유도된 자유전자들의 공진조건이  $p$  에 따라 영향을 받기 때문이다.

### 4. 결론

중심과장이 800nm 인 펄초 레이저를 근접장 원리로 증폭하기 위한 8 자형 나노개구를 FDTD 방법으로 분석하였다. 금 박막에 배열로 제작하였을 때 큰 증폭값을 얻는데 중요한 개구간의 최적화된 거리값과 함께 개구의 크기를 얻었다. 이 것은 펄초레이저를 이용한 비선형 광학 현상 및 회절한계 이하의 분해능이 요구되는 optical data storage, optical lithography 그리고 근접장주사현미경 (Near-field Scanning Optical Microscopy) 등에 응용될 수 있다. 더욱이 본 논문에서 분석한 것은 단일 박막에서 해석한 것으로 기체를 박막 사이로 흘러주면서 큰 빛 세기와 반응하는 실험에 응용이 가능할 것으로 기대된다.

### 후기

본 연구는 과학기술부 창의적 연구 진흥 과제(Creative Research Initiative, CRI)의 지원을 받아 한국과학기술원 BUPE(Billionth Uncertainty Precision Engineering)연구단에서 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. Ebbesen, T., Lezec, H., Ghaemi, H., Thio, T., and Wolff, P., "Extraordinary optical transmission through subwavelength hole arrays," *Nature*, **391**, 667-669, 1998.
2. Brolo, A., Arctander, E., Gordon, R., Leathem, B., and Kavanagh, K., "Nanohole-Enhanced Raman Scattering," *Nano Lett.*, **4**, 2015- 2018, 2004.
3. Bozhevolnyi, S., Beermann, J., and Coello, V., "Direct observation of localized second-harmonic enhancement in random metal nanostructures," *Phys. Rev. Lett.*, **90**, 197403, 2003.
4. M'uhlschlegel, P., Eisler, H., Martin, O., Hecht, B., and Pohl, D., "Resonant optical antennas," *Science*, **308**, 1607-1609, 2005.
5. Jin, E., and Xu, X., "Enhanced optical near field from a bowtie aperture," *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 153110, 2006.
6. Takashi Nagase, Tohru Kubota and Shinro Mashiko, "Direct fabrication of nano-gap electrodes by focused ion beam etching," *Thin Solid Films*, **499**, 279-284, 2006.