

# 펄토초 레이저의 근접광 증폭을 위한 3차원 나노 구조 설계 및 제작에 관한 연구

## 3D nano-device design and fabrication for near field enhanced femtosecond pulse laser

김승철, 진중환, 박인용, #김승우

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

Key words : Near-field optics, Femtosecond laser, Focused ion beam

### 1. 서론

1960년대 레이저가 개발된 이래 Q-switching, mode locking 등을 이용한 다양한 광 증폭기술이 개발되었고 이를 통해 레이저의 출력이 향상되었다. 그러나 이러한 증폭 기술은 대부분 원하는 출력을 얻기 위해서는 출력에너지보다 큰 에너지를 가하여 얻기 때문에 효율 및 크기 면에서 많은 단점을 갖고 있다. 최근 외부 에너지를 가하여 주지 않고도 비선형 광학현상을 이용하여 빛을 집속 또는 증폭할 수 있는 연구들이 활발히 진행되고 있다. 이러한 연구 분야 중 하나인 근접광 기술은 빛의 파장보다 작은 영역에서의 빛과 물질과의 상호 작용을 다루는 기술로서 이 현상을 이용하면 빛의 회절 한계보다 더 작은 크기로 빛을 집속 시키거나 빛의 파장보다 작은 개구를 통해 빛을 전달 시킬 수도 있다. 이 기술을 이용하면 빛의 파장보다 작은 영역에서 빛과 매질간의 상호작용을 통해 복잡한 펄핑 시스템이나 증폭기술을 사용하지 않고도 빛을 증폭한 것과 같은 효과를 얻을 수 있다.<sup>1,2,3</sup>

펄토초 레이저는 특성상 짧은 펄스 폭을 가지면서도 강한 첨두 출력을 갖고 있기 때문에 이를 이용한 다양한 광학적 연구가 진행되고 있다. 이러한 고효율의 펄토초 레이저를 이용하면 NSOM 기술, Surface Enhanced Raman spectroscopy(SERS)등의 다양한 비선형 광학현상을 유도할 수 있다. 일반적으로 펄토초 레이저를 증폭하는 기술로는 Chirped Pulse Amplification(CPA) 기술을 사용하는데, 이 기술의 경우 다단의 증폭단을 사용하여 일반적인 레이저 광원들에 비하여 그 크기가 매우 크며 비용도 많이 드는 단점이 있다. 이에 CPA 방식을 사용하지 않고 빛을 증폭하려는 연구들이 진행되어 오고 있으며, 근접광 현상을 잘 활용하게 되면 이러한 복잡한 시스템이 없이도 빛을 증폭하는 것이 가능하다. 대표적인 근접광 현상 중에 하나로서 근접광 증폭 현상이 있다. 이는 Lightning-rod Effect 라고도 불리는데 입사시켜주는 빛의 파장보다 작은 수~수십 nm의 크기를 갖는 전도성 재료에 빛을 입사시켜 주게 되면 재료 내부의 자유 전자들이 빛의 광 주파수에 의해 공진이 유도되게 되고 이러한 자유 전자들의 운동에 의해 입사되는 빛의 주파수를 갖는 강한 전기장이 형성되는 원리를 말한다.<sup>4</sup> 이러한 근접광 증폭 현상은 재료의 전기적 특성 및 재료의 3차원적 구조, 크기 및 형태에 따라 증폭비가 달라지게 되며 입사하는 빛의 파장에도 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 그러나 근접광 증폭현상은 일어나는 영역이 상대적으로 수 nm 이하로 작아 Apertureless Near-field Scanning Optical Microscopy 과 같은 시스템에 제한적으로 응용되었다.

이를 극복하기 위해 CNT array 또는 나노 선과 같은 원기둥 형태나 탐침 형태 등 다양한 형태의 근접광 증폭기의 디자인이 제시되어 왔으나 아직 그 증폭영역이 상대적으로 좁다는 단점이 해결되지 못하였다. 최근 들어 증폭영역을 확장시키기 위해서 Bow-tie 형태의 새로운 디자인이 제안되었다.<sup>4,5</sup> Bow-tie 형태는 2개의 삼각형의 꼭지점이 서로 마주보고 있는 형태로서 각 삼각형 내부의 공진된 자유 전자

들간의 상호 인력에 의해 좀 더 넓은 구간에서 근접광 증폭을 구현할 수 있다.

본 연구에서는 펄토초 레이저의 근접광 증폭을 구현하기 위하여 나노 디바이스를 설계 및 제작하였다. Frequency Difference Time Domain(FDTD) 방법을 이용한 전자기 시뮬레이션을 통해 최적화된 디자인을 설계하였으며 이를 제작하기 위하여 Focused Ion Beam(FIB)공정을 통하여 최적화된 형태와 같은 근접광 증폭기를 성공적으로 구현하였다.

### 2. 근접광 증폭 이론

근접광 증폭에 대한 이론 및 응용은 주로 SERS 등에서 많이 연구되어왔으며 기본적인 원리는 빛의 의한 자유 전자들의 공진에 의한 현상으로 알려져 있다. 빛의 파장보다 작은 영역에서 Au, Ag, Al 과 같은 높은 유전상수(Dielectric constant)  $\epsilon$  을 갖는 물체에 빛이 입사하게 되면 입사된 빛의 전기장에 의해서 물체 내부의 자유 전자들이 움직이게 되고 충분히 작은 영역에서 자유 전자들이 공진하며 이동하는 시간이 빛의 주파수와 일치하게 되면 탐침과 같이 전자들이 국부적으로 모이는 곳에서 빛의 증폭이 일어난다. 이 때 증폭 비율은 물체의 유전상수  $\epsilon$ , 형태 및 크기에 따라 달라지며 입사하는 빛의 파장에도 영향을 받게 된다. 일반적으로 Ag, Al 이 광 주파수 영역에서 가장 높은  $\epsilon$  값을 가지고 있는 것으로 알려져 있으나 Ag, Al 의 경우 공기 중에서 쉽게 산화하기 때문에 오히려 산화 층에 의한 영향으로 증폭되는 크기가 떨어지는 단점을 갖고 있다. 반면 Au 의 경우 높은  $\epsilon$  값을 가지면서도 공기 중에 산화가 거의 일어나지 않고 가장 안정적인 소재로 알려져 있다.

근접광 증폭을 유도하기 위한 구조들로는 주로 구 형태의 particle 또는 타원체 형태이거나 나노 선과 같은 원기둥의 형태 그리고 SPM 탐침 등을 이용한 구조였다. 이는 나노 구조를 제작하는데 있어 기존의 노광 기술로는 분해능의 한계에 기인한다. 그러나 최근 E-beam lithography, Focused Ion Beam 공정들을 이용하여 최고 1~2 nm 수준의 분해능으로 제작하는 것이 가능해 졌다.<sup>6</sup> 이러한 기술이 개발된 이후 좀더 다양한 형태의 나노 구조의 디자인들이 제안되었다. 그 중 가장 효율적인 디자인으로 제시되고 있는 것이 Bow-tie 형태의 디자인이다. Bow-tie 형태는 두 개의 삼각형의 꼭지점이 일정한 간격을 두고 정렬되어 있는 형태로서 두 삼각형이 마주보고 있는 간격 내에서 큰 근접광 증폭 효과를 얻을 수 있다. 이러한 모든 현상은 전자기적 현상으로 설명될 수 있기 때문에 Maxwell 방정식으로 해석 될 수 있으며 구나 타원체의 경우는 수식적으로 쉽게 유도될 수 있다. 그러나 그 형태가 복잡해 질 경우 이를 수식적으로 유도하는 것은 어려우며 Maxwell 방정식에 기반한 전자기 시뮬레이션을 통해 근접광 증폭의 크기를 예측할 수 있다. 일반적으로 전자기 시뮬레이션은 FDTD 방법을 사용하는데 FDTD 방법이란 해석하고자 하는 영역을 Yee cell 이라고 정의된 작은 Cell 로 나눈 뒤 각 Cell 에서 시간영역에서 Maxwell 방정식을 푸는 방법을 말한다. FDTD 방법의 경우 입사되는 빛의 파장보다 작은 영역에서

도 해석이 가능하며 계산 알고리즘이 간단하여 계산 속도가 빠르고 특히 펨토초 레이저와 같은 넓은 주파수 영역을 갖는 광원에 대해서도 한번에 해석이 가능한 장점을 갖고 있다.

### 3. 시뮬레이션 결과 및 근접광 증폭기 제작 결과

FDTD 방법을 이용하여 800 nm 의 중심파장, 100 nm Bandwidth 를 갖는 펨토초레이저의 근접광 증폭을 유도하기 위한 구조의 시뮬레이션을 수행하였다. 기본적인 디자인 구조는 Bow-tie 구조이며, Fig. 1 에서 볼 수 있듯이 Bow-tie 의 크기, 두께, 간격 등 5 가지 변수를 조절하여 gap 에서의 증폭값이 최적화된 결과를 얻었다. 재료의 종류는 Au 로 설정하였으며 Modified Drude model 을 적용하여 FDTD 시뮬레이션을 수행하였다.

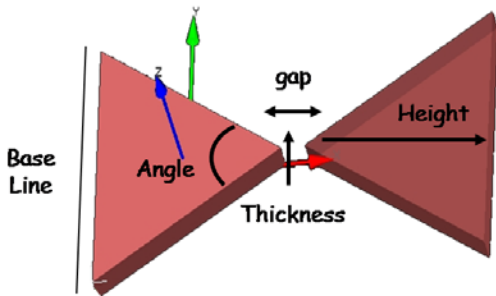


Fig. 1 Design parameter of the Bow -tie nano device

Table 1 에서 보는 것과 같이 FDTD 방법을 이용하여 800 nm 의 파장을 갖는 펨토초레이저에 최적화된 변수들을 구하여 보았다. 입사하는 빛의 편광 방향은 Height 에 평행한 방향이 수직인 방향에 비해서 증폭비가 높게 나타나는 것을 확인하였다. 5 개의 디자인 변수들 중 값의 변화에 가장 민감한 변수는 Height 였으며 그 이유는 내부에 빛의 주파수에 공진하는 자유 전자가 이동하는 길이가 디바이스의 Height 와 일치하지 않을 경우 Damping 효과로 인해 원활히 진동할 수 없기 때문이다.

Table 1 Optimized design factors for bow-tie nano device

Design factor	Height	Angle	Base line	Thickness	Gap
Value(Unit)	175(nm)	30°	94(nm)	50(nm)	20(nm)

시뮬레이션을 통해 최적화된 디자인 변수 값을 바탕으로 실제 디바이스를 제작하였다. 20nm 의 Gap 을 갖는 나노 디바이스를 제작하기 위해서 FIB 공정을 이용하였다. FIB 공정은 E-beam Lithography 공정을 포함한 대부분의 Lithography 공정들에 비해 더 작은 크기를 제작할 수 있고 SEM 을 통해 실시간으로 디바이스를 관찰할 수 있는 장점을 갖고 있기 때문에 이러한 나노 디바이스를 제작하기 위한 공정으로 가장 적합하다. 공정 조건은 약 10 nm 크기를 갖는 Ga Ion Beam 으로 에칭(Etching)하였으며 시편은 Sapphire Wafer 에 Au 를 50nm 를 증착한 시편을 사용하였다. FIB 공정을 통해 Fig 2 에서 보는 것과 같이 약 175 nm 의 Height 를 갖고 20 nm 의 Gap 을 갖는 Bow-tie 구조를 성공적으로 제작하였다.

### 4. 결론

펨토초 레이저의 근접광 증폭을 유도하기 위하여 Bow-tie 형태를 갖는 나노 디바이스를 설계 및 제작하였다. 800nm 의 파장을 갖는 펨토초 레이저에 최적화된 Bow-tie 구조를 설계하기 위하여 FDTD 방법을 이용한 전자기 시뮬레이션을 이용하였다. 전자기 시뮬레이션을 통해 최적화된

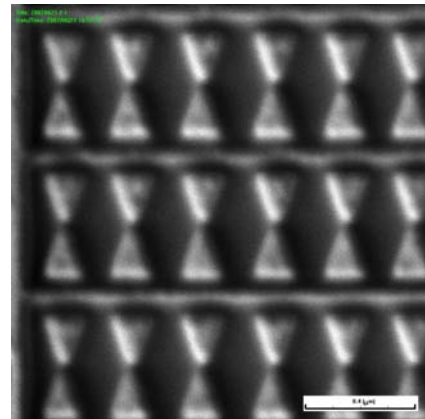


Fig. 2 SEM image of the Bow-tie nano device using FIB fabrication method

디자인 변수를 바탕으로 FIB 공정을 통해 Bow-tie 구조를 제작하였다. 제작된 Bow-tie 구조는 175 nm Height 를 갖고 20 nm 의 Gap 을 가지는 Au Bow-tie 어레이로 제작되었다. 이러한 근접광 증폭기를 이용하여 펨토초 레이저를 이용한 다양한 비선형 광학 현상 및 회절 한계 이하의 빔 크기를 갖는 Optical Data storage 등 광범위한 분야에서 이용될 수 있을 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. Syngge, E. H. London, Edinburgh Dublin Philos. Mag. J. Sci. **1 2** , 6, 356.
2. E. Betzig, J. K. Trautman, R. Wolfe, E. M. Gyorgy, P. L. Finn, M. H. Kryder, and C. H. Chang, Appl. Phys. Lett. **1**, 142, 1992.
3. I.I. Smolyaninov, D. L. Mazzoni and C. C. Davis, Appl. Phys. Lett. , 3859, 1995.
4. David P. Fromm, Arvind Sundaramurthy, P. James Schuck, Gordon Kino and W. E. Moerner, Nano Lett. **4**, 5, 2004.
5. Eric X. Jin, Xianfan Xu, Appl. Phys. Lett. , 153110, 2006.
6. Takashi Nagase, Tohru Kubota and Shinro Mashiko, Thin Solid Films, **43** , 374, 2003.