

금 나노 입자의 표면 플라즈몬 공명 현상을 이용한 상변화 층에서의 전자기파 증폭 해석

Analysis of electromagnetic field enhancement in the phase change material based on surface plasmon resonance induced by gold nanoparticles

*강성목¹, #박도철¹, 박영필¹, 김수경², 이학철², 오명렬³, 나광훈³, 박강호⁴, 이성규⁴, 이형근⁴, 조용훈⁵, 김려화⁵

*S. M. Kang¹, #N. C. Park(pnch@yonsei.ac.kr)¹, Y. P. Park¹, S. K. Kim², X. Z. Li², M. R. Oh³, K. H. Nah³, K. H. Park⁴, S. Q. Lee⁴, H. K. Lee⁴, Y. H. Cho⁵, L. H. Jin⁵

¹ 연세대학교 CISD, ²(주)나노스토리지, ³굿젠(주), ⁴한국전자통신연구원, ⁵한국과학기술원 물리학과

Key words : FDTD (Finite Difference Time Domain), Au nanoparticle, surface plasmon resonance

1. 서론

최근 FIB (focused ion beam) 공정 및 Electron-beam 리소그래피(lithography)기술 발전에 의해 나노 스케일 (nano-scale)크기의 구조물에 대한 제작과 요구가 많아지면서 그러한 크기의 구조물에서 관찰되는 독특한 물리적 현상인 표면 플라즈몬 공명¹ (SPR, surface plasmon resonance) 현상에 대한 관심이 높아지고 있다. 표면 플라즈몬은 금속박막 표면에서 일어나는 전자들의 집단적 진동 (collective charge density oscillation)이며, 이에 의해 발생한 표면 플라즈몬 파는 금속과 유전체의 경계면을 따라 진행하는 표면 전자기파이다. 특히 나노 구조물의 종류 및 기하학적 형태와 입사되는 전자기파의 파장에 대해 표면 플라즈몬 공명 현상의 특징들이 민감하게 반응 하므로 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다²⁻⁵. 이러한 표면 플라즈몬 공명 현상을 나타내는 금속은 Au, Ag, Al 등과 같은 외부 자극에 의해 전자의 방출이 쉽고 음의 유전 상수를 갖는 금속들이 주로 사용된다. 그러나 Au 나노 입자는 국소화된 표면 플라즈몬에 기인한 뛰어난 흡광 효율뿐만 아니라, 흡수한 빛을 열로 잘 방출하는 특성 및 화학적 산화에 따른 표면 안정성이 높기 때문에 그 활용 범위가 점점 높아지고 있다. 특히 바이오 센서 및 생명공학 분야에서 Au 나노 입자에 의한 국소 표면 플라즈몬 공명 현상을 이용한 DNA 정보 검출 방법인 형광 검출법⁶에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다⁷⁻⁸.

본 연구는 상변화층(phase change layer)으로 구성된 미디어 위에 Au 단층 금속 입자 배열을 고정된 영역에 위치시키고 이때 금속 입자간의 거리를 변화시켜 밀도의 변화에 따른 표면 플라즈몬 공명 현상 및 SPR 커플링(coupling)⁹⁻¹⁰ 효과를 기반으로 하는 근접장 증폭(near-field enhancement) 효과를 극대화 하기 위한 Au 금속 입자 배열의 최적화 연구를 수행하였으며 이러한 증폭 효과가 상변화층에 끼치는 양을 분석하기 위하여 입사파의 강도(intensity) $|E|^2$ ($|E|^2 = |E_x|^2 + |E_y|^2 + |E_z|^2$) 분석 및 전자기장의 성분별 분석을 수행하였다. 상변화층 미디어의 구조는 일반적인 CD/DVD-RW 구조를 사용하였으며 상변화 물질은 GeSbTe 재료를 해석 모델로 가정하고 전자기파 시뮬레이션 연구를 수행하였다.

2. 시뮬레이션 모델

해석 모델의 구조 및 Au 나노 입자의 배열 구조는 Fig. 1 에서 보여지고 있다. CD/DVD-RW 미디어 구조를 X=2um, Y=2um 크기로 모델링하고 미디어의 윗면에 X=1um, Y=1um 의 고정된 영역에 직경이 20nm 인 구 형태의 Au 나노 입자들을 단일 층으로 위치시켰다. 이때 금속에 전자기파가 가해짐에 따라 매질의 표면에서 수십 nm 이내의 매우 좁은 영역에서는 발생하는 근접장 증폭 효과가 상변화 층에 전달되는 조건을 검토하기 위하여 1x1 um² 의 영역에서 배열된 Au 입자간의 거리(space)를 X 및 Y 로 동일하게 5nm 씩

증가시켜 밀도 변화를 주었으며 405nm, 658nm, 780nm 의 입사 파장을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다

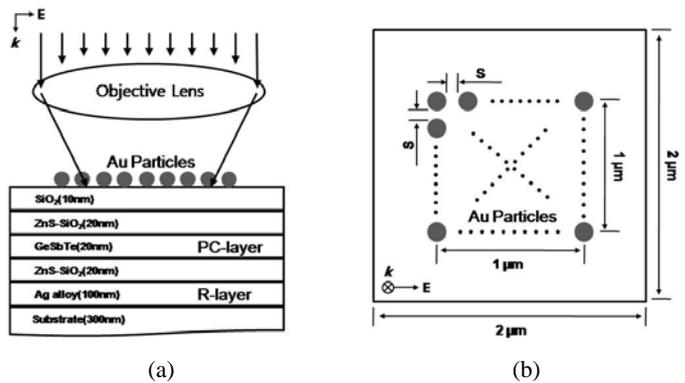


Fig. 1 (a) Schematic of simulation model and media structure, (b) Au nanoparticles array on media surface

제안된 모델의 수치 해석 방법은 유한차분시간영역해석 FDTD (finite difference time domain)¹¹⁻¹²법을 이용하여 맥스웰 방정식 (Maxwell equation)의 해석적 수치계산을 수행하였다. 대물렌즈를 통과한 집광된 빔을 구현하기 위하여 스팟 크기 (spot size)가 1.1um 이고 X 축 방향으로 선편광 된 가우시안 (Gaussian) 빔을 미디어의 표면에 집광시켜 금속 입자의 표면 플라즈몬 공명 현상이 극대화 될 수 있도록 해석 조건을 설정하였다. 3 차원 모델에 대해 흡수경계조건으로 Liao 를 사용하였으며 해석결과와 정확성 확보 및 직경이 20nm 인 Au 나노 입자의 크기를 고려해서 전체 해석 영역에 5x5x5 nm³ 의 셀(Cell)을 사용하여 5000 번 이상의 Time Step 을 통한 반복 계산을 수행하였다. 매질에 대한 유전상수¹³ (dielectric constant)는 Modified-Debye 모델 (Model)이 사용되었으며 이때 사용된 Au 나노 입자의 계수는 Table 1 과 같다.

Table 1 Numerical value of Modified-Debye model for Au (Gold)

λ	Conductivity [S/m]	Relative Permittivity [Infinite Freq.]	Relaxation Time [s]	Static Permittivity
405nm	294200	1	7.0187e-17	-1.3321
658nm	3162200	1	3.7520e-15	-1339
780nm	7854100	1	6.0315e-15	-5349.2

3. 해석 결과

Fig.2 는 Au 나노 입자간의 거리가 5nm 이고 780nm 파장의 빔이 미디어 표면에 입사될 때 전기장의 성분별 분포를 보여주고 있다. Fig. 2 (a)는 미디어의 표면에서 $|E|^2$ 강도

분포를 보여주고 있으며 Fig.2의 (b), (c), (d)는 상변화층 내부에서의 성분별 전자장의 분포를 보여주고 있다. 특히, Fig. 2의 (c)와 (d)에서는 Au 나노 입자 배열이 위치한 모서리와 측면에서 표면 플라즈몬 공명 현상에 의해 빛의 강도가 증폭되어 있음을 보여주고 있다.

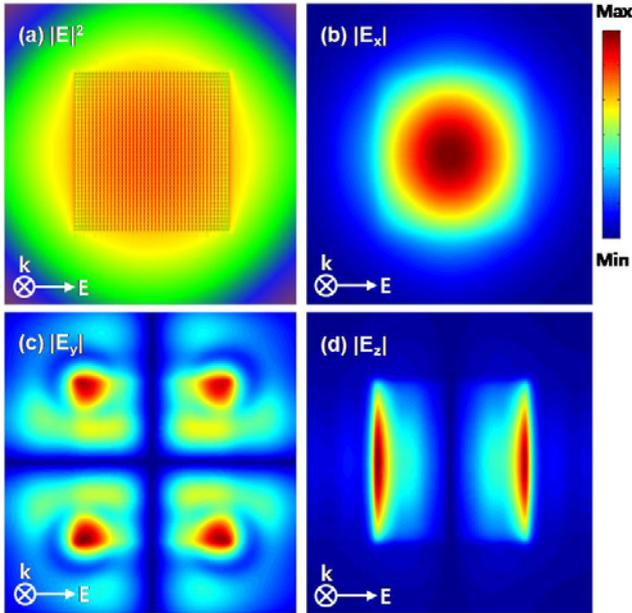


Fig. 2 Computed contours of components of electric field (a) $|E|^2$ distribution on the media surface with single layer array of Au nanoparticles, (b) $|E_x|$ inside GeSbTe layer, (c) $|E_y|$ inside GeSbTe layer, (d) $|E_z|$ inside GeSbTe layer

Fig.3은 각각의 입사 파장에 대해 Au 나노 입자 배열이 없는 경우를 1로 기준으로 하여 Au 나노 입자들의 거리 간격 변화에 대해 상변화층 내부에서 빛의 $|E|^2$ 강도 변화량을 보여주고 있다. 405nm, 658nm, 780nm의 입사 파장에서 Au 나노 입자간의 거리가 0nm인 경우는 입사되는 전자기파의 대부분이 상변화층 내부로 증폭 및 투과가 이루어지지 않았다. 그러나 Au 나노 입자간의 거리가 5~15nm로 밀도가 높은 경우 658nm, 780nm의 입사파장에서는 근접장 증폭 현상이 발생하였으며 거리 간격이 점점 커질수록 Au 나노 입자들이 없는 경우와 비슷해 지는 경향이 보여지고 있다. 특히 780nm의 입사 파장에서 Au 나노 입자간의 거리가 10nm인 경우는 약 80% 이상의 $|E|^2$ 강도 증가율을 보이며 658nm의 입사파장에서 거리 간격이 5nm인 경우는 약 60%의 $|E|^2$ 강도 증가율이 보여지고 있다.

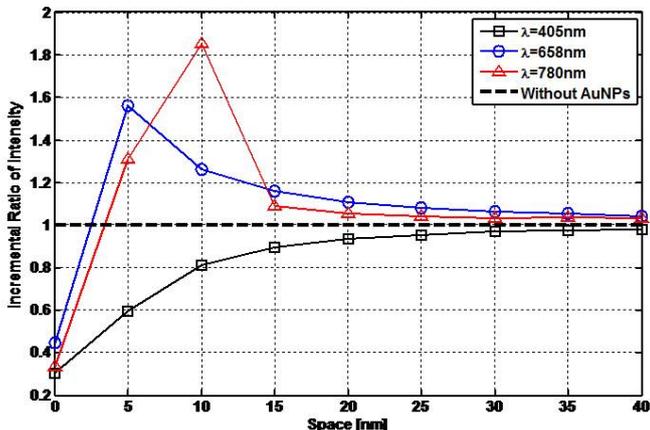


Fig. 3 Incremental ratio of the $|E|^2$ peak intensity in phase change layer according to the variation of space of gold nanoparticles

4. 결론

본 연구를 통하여 Au 나노 입자의 주변에서 발생하는 표면 플라즈몬 공명 현상에 의한 근접장 증폭 현상을 CD/DVD-RW 미디어 내부의 상변화층에 전달하는 Au 나노 입자 배열의 구조 및 입사 파장의 조건을 FDTD 해석을 통하여 분석하였다. 입사되는 파장이 780nm 및 658nm 파장인 경우 Au 나노 입자끼리 접촉되어 있는 단층 배열 구조는 상변화층으로 전자파를 증폭 및 투과 시킬 수 없었지만 약 5~15nm 정도의 거리 간격을 가진 Au 나노 입자 배열은 입사되는 전자파를 증폭시켜 상변화층에 그 영향을 전달할 수 있었다. 즉, 밀도가 높은 Au 나노 입자의 배열 구조는 658nm 및 780nm의 파장에서 근접장 증폭 현상에 의해 입사 빛의 강도 대비 약 60% 및 80%까지 상변화층에 광 증폭 효과를 전달할 수 있을 것으로 보여진다. 본 해석 결과를 통하여 표면 플라즈몬 공명 현상 및 SPR 커플링 효과에 의해 발생된 근접장 증폭 현상을 이용한다면 Au 나노 입자의 밀도가 높은 부분에서 증간된 열을 CD/DVD-RW 미디어의 상변화층에 전달하여 정보를 기록할 수 있을 것으로 기대 된다.

후기

본 연구는 지식경제부 제조기반전략기술개발사업(10028291) 과제의 지원을 받아 연세대학교 정보저장기기연구센터(CISD, Center for Information Storage Device)에서 수행되었습니다.

참고문헌

1. W. L. Barnes, A. Dereux, and T. W. Ebbesen, Nature (London) 424, 824 (2003)
2. Amanda J. Haes, Christy L. Haynes, Adam D. McFarland, George C. Schatz, Richard P. Van Duyne, and Shengil Zou, MRS BULLETIN, 30, 368 (2005)
3. K. Hasegawa, C. Rohde, and M. Deutsch, Opt. Lett. 31, 1136-1138 (2006)
4. K.-H. Su, Q.-H. Wei, X. Zhang, J. J. Mock, D. R. Smith, and S. Schultz, Nano Letters, 3, 1087-1090 (2003)
5. Maria L. Protopapa, Applied Optics, 48, 778-785 (2009)
6. J. Michael Köhler, Andrea Csáki, Jorg Reichert, R. Möller, W. Straube, Wolfgang Fritzsche, Elsevier Science B.V. 76 (2001) 166-172
7. Eliza Hutter and Janos H. Fendler, Adv. Mater. 16, 1685-1706 (2004)
8. Amanda J. Haes, W. Paige Hall, Lei Chang, William L. Klein, and Richard P. Van Duyne. Nano Letters, 4, 1029-1034 (2004)
9. C. Sönnichsen, B. M Reinhard, J. Liphardt, and A P. Alivisatos, Nature Biotechnology, 23, 741-745 (2005)
10. J. P. Kottman and O. J. F. Marin, Opt. Lett. 26, 1096-1098 (2001)
11. K. Kunz and R. Lubbers. The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics (CRC Press, Boca Raton, FL, 1996)
12. Remcom Inc.: XFDTD 6.4 software (2006)
13. E. D. Palik, Handbook of Optical Constants of Solids (Academic, Orlando, FL, 1996)