

근접장 주사 광학 현미경을 이용한 표면 플라즈몬의 측정

고선아 · 이관수 · 박승룡 · 윤재웅 · 송석호[†] · 김필수 · 오차환

한양대학교 물리학과 마이크로광학 국가지정연구실

Ⓣ 133-791 서울특별시 성동구 행당동 17번지

(2003년 8월 18일 받음, 2003년 12월 24일 수정본 받음)

표면 플라즈몬은 금속 표면에 존재하는 자유전자의 밀도파이며, 광자와 결합하여 존재한다. 본 논문에서는 근접장 주사 광학 현미경을 구성하고 이를 이용하여 표면에서 지수함수적으로 감소하는 표면 플라즈몬과 두 표면 플라즈몬에 의한 간섭무늬를 측정하였다. 표면 플라즈몬은 표면의 작은 광학적 분포에도 민감하게 변화하여, 광학 탐침이 금속 표면에 접근함에 따라서 표면 플라즈몬의 공명 조건에 영향을 준다. 이로인해 광학 탐침이 금속 표면으로부터 약 250 nm 떨어진 곳에서 광의 세기가 최대가 됨을 확인 하였다.

주제어 : surface plasmon, near-field scanning optical microscope.

I. 서 론

일반적인 광학 현미경은 물체로부터 산란 및 회절되어 나온 빛으로 물체를 관측하기 때문에 회절 한계($\lambda/2$) 이하의 물체는 관측할 수 없다. 따라서 일반적인 광학 현미경으로 볼 수 없는 작은 크기의 물체를 관측하기 위해서 매우 빠른 탐침을 시료의 표면에 직접 접촉시키거나 또는 매우 근접시킨 후 표면을 주사하여 관측하는 주사 탐침 현미경(scanning probe microscope) 방법이 많이 사용되고 있다. 이러한 주사 탐침 현미경은 원자수준의 고분해능으로 표면구조의 3차원 정보를 얻을 수 있으며, 그 외의 물리적인 성질들을 같은 분해도로 알아낼 수 있는 장점을 가지고 있다. STM(Scanning Tunneling Microscope), AFM(Atomic Force Microscope), 근접장 주사 광학 현미경(Near-field Scanning Optical Microscope; NSOM) 등이 대표적인 주사 탐침 현미경들이다. 특히 NSOM은 표면 측정과 동시에 광 신호 측정을 행할 수 있어 양자소자의 광학적 성질 측정 등 다른 주사 탐침 현미경에서는 관측할 수 없는 광학적 현상을 볼 수 있는 유용한 도구이다.

최근 NSOM은 나노 크기에서의 표면 측정,^[1] 근접장 광기록 등에 응용^[2,3] 되고 있으며, 이를 이용한 표면 플라즈몬을 연구도 활발히 이루어 지고 있다. 특히 금속표면의 주기적인 모양을 가지고 있는 표면 플라즈몬의 밴드갭과 이를 이용한 표면 플라즈몬 채널 가이드에 관한 연구와^[4] 불연속적인 금속에서의 표면 플라즈몬의 여기^[5]와 금속박막에 얇은 groove가 존재할 때 표면 플라즈몬의 투과^[6]에 대한 연구가 발표되었다. 이러한 연구들은 NSOM을 이용하여 표면 플라즈몬을 측정함으로써 표면 플라즈몬의 특성을 직접 보고자 하는 연구이다.

표면 플라즈몬은 금속과 유전체의 경계 면에 강한 전기장이 형성되어 표면의 민감한 변화에도 반응을 한다. 따라서

NSOM으로 표면 플라즈몬을 직접 측정하고자 할 때 탐침이 금속박막의 표면에 다가가면 탐침의 영향으로 표면 플라즈몬에 영향을 줄 것이다.

본 논문에서는 NSOM을 제작하여 감쇠전반사 방법으로 얻어진 표면 플라즈몬을 탐침의 높이에 따라 측정함으로써 표면 플라즈몬이 탐침의 영향을 받는 것을 확인 하였다. 그리고 탐침의 영향을 받지 않는 높이에서 표면 플라즈몬을 측정해야 S/N비가 커서 이미지 대비가 큰 결과를 얻을 수 있음을 확인 하였다.

II. 근접장 주사 광학 현미경의 제작

파장보다 작은 구멍(탐침)을 통과한 광은 구멍의 크기와 비슷한 거리 내에서 소멸광파로 존재한다. 반대로 소멸광파가 존재 하는 영역에 파장보다 작은 탐침이 존재하게 되면 이 탐침으로 소멸광파가 결합 될 수 있다. 따라서 소멸광파를 측정하기 위해서는 탐침이 관측하고자 하는 물체의 표면에 수십 nm 까지 접근 해야 한다. 이러한 이유로 근접장 주사 광학 현미경은 주사 탐침 현미경과 비슷한 구조를 가지지만, 광을 전달 하거나 또는 집속하기 위해 광섬유로 만들어진 탐침을 이용하는 점이 다르다. 본 논문에서는 광섬유 탐침을 시료 표면에 접근 시키기 위해서 32.768 kHz로 진동하는 튜닝 포크에 탐침을 붙여서 사용하였다. 탐침이 튜닝 포크에 붙어서 시료 표면에 가까워 지면 탐침과 시료표면에서 작용하는 Shear force 때문에 튜닝 포크의 진동 폭이 줄어들게 된다. 이를 그림 1 과 같이 되먹임 회로를 이용하여 튜닝 포크의 진동 폭을 일정 하게 하여 탐침과 시료의 사이의 거리를 수 nm로 고정 시켜 표면의 이미지를 측정하였다. 이와 동시에 광섬유 탐침으로 결합 되는 광의 세기를 측정함으로써 표면에 형성된 광학 정보를 측정 하였다.

제작된 NSOM을 이용하여 프리즘에서 전반사 된 두 개의

[†]E-mail: shsong@hanyang.ac.kr

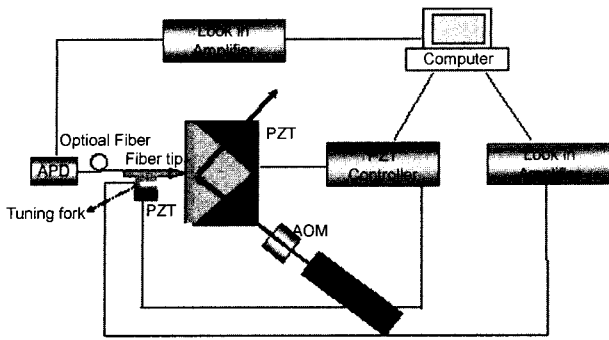


그림 1. Shear force를 이용한 소멸광파와 표면 플라즈몬을 측정하기 위한 NSOM시스템 구성도.

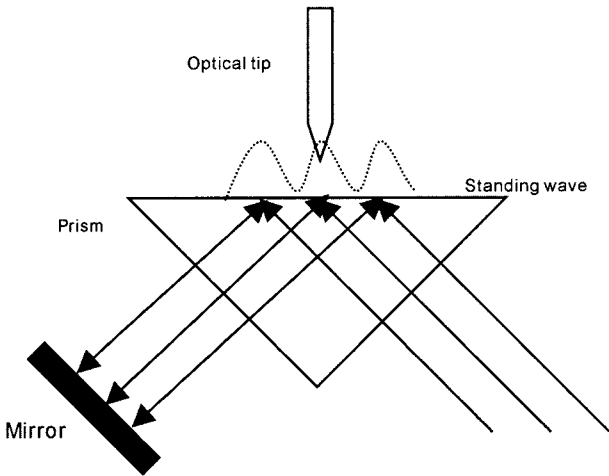


그림 2. NSOM을 이용한 소멸광파의 정상파 측정을 위한 개요도.

소멸광파의 간섭을 측정하였다. 프리즘으로 입사되는 레이저 광원은 프리즘 면에서 전반사 되어 나온다. 여기에 그림 2과 같이 거울을 두어 다시 프리즘으로 입사 하게 만들었다. 이렇게 되면 두 개의 반대 방향으로 진행되는 소멸광파에 의해 프리즘 표면에 간섭무늬가 형성된다.

광원은 7 mW의 강도를 갖는 633 nm의 파장의 HeNe 레이저를 사용하였으며 프리즘은 굴절률이 1.515인 BK-7을 사용하였다. 그림 3은 프리즘 표면에 형성된 정상파를 제작된 근접장 주사 광학 현미경을 이용하여 측정한 결과이다. TE, TM

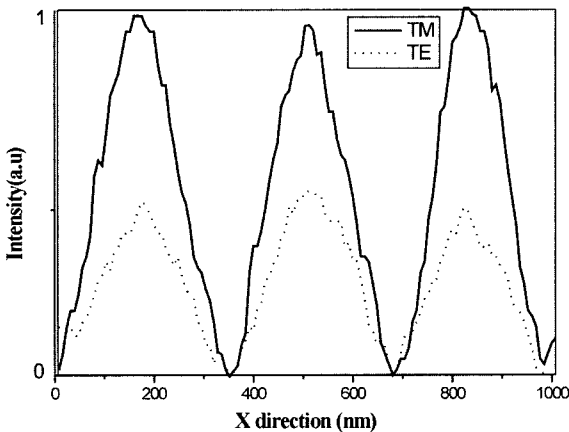


그림 3. 측정된 TM파와 TE파의 소멸광파의 정상파.

모드에 대해 측정을 하였으며, 주기는 350 nm로 측정되었다.

TM파와 TE파의 주기는 일치하였고 TM-모드의 빛의 세기가 TE-모드보다 높게 나왔다. 이것은 전반사시 TM-모드의 투과계수가 TE-모드보다 높기 때문이다. 소멸광파의 정상파를 측정하게 됨으로써 본 실험실에서 제작한 Shear force를 이용한 NSOM으로 근접장 내에서 회절한계 이내의 광학적 정보를 얻을 수 있음을 확인하였다.

III. 근접장 주사 광학 현미경을 이용한 표면플라즈마 파 측정

표면 플라즈몬은 금속과 유전체의 경계 면을 따라 진행되는 전자기파의 일종이며, 표면 플라즈몬의 분산관계는 다음과 같다.^[7]

$$k_{sp} = \frac{\omega}{c} \left(\frac{\epsilon_m \epsilon_g}{\epsilon_m + \epsilon_g} \right)^{1/2} \quad (1)$$

k_{sp} 는 표면 플라즈몬의 파수벡터 크기이며, ω , c , ϵ_m , ϵ_g 는 각각 광의 주파수, 진공에서의 광의 속도, 금속과 금속과 접해있는 유전체의 유전상수이다. 식 (1)에서 알 수 있듯이 표면 플라즈몬의 파수벡터는 유전체 내부에서 진행되는 광의 파수벡터보다 크다. 그래서 유전체 내부로는 광이 전파 할 수 없고 표면에만 존재한다. 이러한 성질 때문에 표면 플라즈몬을 여기 시키기 위해서 높은 굴절률을 가지는 프리즘을 이용한다. 표면 플라즈몬을 여기 시키기 위해서는 식 (2)와 같이 표면 플라즈몬의 파수벡터, k_{sp} 와 입사하는 광파의 파수벡터, k_x 가 일치해야 한다.

$$k_x = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_p} \sin \theta = k_{sp} = \frac{\omega}{c} \left(\frac{\epsilon_m \epsilon_g}{\epsilon_m + \epsilon_g} \right)^{1/2} \quad (2)$$

여기서, ϵ_p , ϵ_g 는 프리즘과 금속 박막위에 있는 유전체의 유전상수이다. 표면 플라즈몬이 여기 되면 금속박막과 유전체의 경계 면에 강한 전기장이 생긴다. 이때 생기는 전기장은 그림 4와 같이 표면에만 국소화 되어 경계 면에서 최대의 값을 가지고 경계 면에 수직방향으로는 지수함수 적으로 감소한다.

이런 전기장의 세기는 표면 플라즈몬이 여기 되지 않았을 때 보다 10~100배 정도 큰 값을 가지며, 표면에 강한 전기장이 형성되기 때문에 표면 플라즈몬의 여기 조건은 금속박막과 접해있는 유전체에 따라 아주 민감하게 달라진다.

본 논문에서는 Kretschmann방법을 사용하여 표면 플라즈몬을 여기 시켰으며, 제작한 NSOM을 이용하여 여기 된 표면 플라즈몬의 세기를 측정하였다. 금 박막은 Thermal Evaporator 장치를 이용하여 프리즘과 같은 재질로 만들어진 유리기판 위에 50 nm의 두께로 증착 하였고, 유리기판과 프리즘은 같은 굴절률을 가지는 index matching oil을 이용하여 부착 하였다. 입사한 광은 앞서 소멸광파를 측정했을 경우와 같은 HeNe 레이저를 사용하였으며 프리즘과 금 박막의 유전상수는 2.295, $-11.7+i*1.12$ 이다. 그림 5(a)~(c)는 입사하는 빔의 각도가 각각 44, 44.5, 45.0도 일 때 탐침을 수직방향(z축방향)으로 이동시키면서 표면 플라즈몬이 여기되어 생기는 금속 표면의 근접장

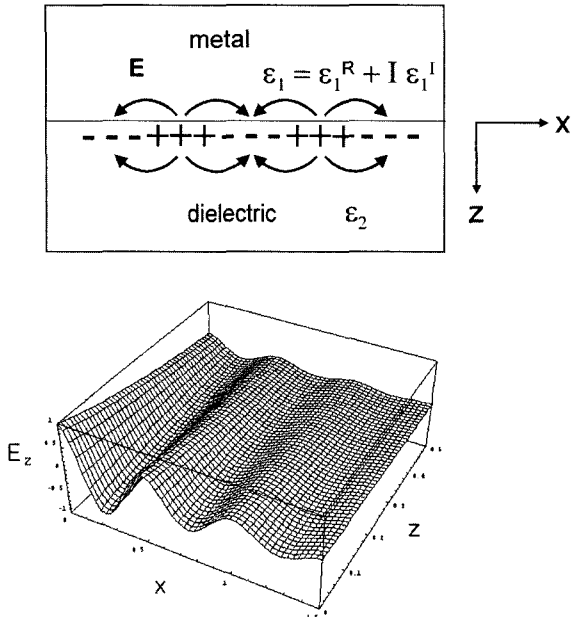


그림 4. 표면에서 최대값을 가지며 그 수직 방향으로 지수 함수적으로 감소하는 표면 플라즈몬의 세기.

을 측정된 결과이다.

실험조건에서 표면 플라즈몬의 여기 조건은 광이 43.8도로 입사 할 때 이다. 그림 5(a)에서 (c)로 갈수록 탐침으로 측정된 광 세기의 최대값이 줄어 드는 것은 표면 플라즈몬의 여기 조건에 조금씩 벗어 나서 금 박막위에 국소화 되는 전기장의 세기가 줄어 들기 때문이다. 그림 5(c)는 입사하는 빔의 각도가 45도일 때 측정된 표면 플라즈몬의 세기와 금 박막이 없는 경우에 해당하는 소멸광파를 비교한 것이다.

표면 플라즈몬의 특성에 의해 탐침으로 측정되는 광의 세기는 금 박막이 있는 경우가 없는 경우보다 20배 이상 크며 소멸광파의 경우 최대 값은 탐침이 프리즘에 접촉(z=0) 했을 때이지만 표면 플라즈몬의 경우는 탐침이 250nm 떨어진 곳에서 최대 값을 가짐을 볼 수 있다.

표면 플라즈몬이 여기 되면 그림 4과 같이 금속과 유전체(공기)의 경계 면에서 최대의 전기장을 가지고 경계 면에 수직방향으로 지수함수적으로 감소 하는 전기장 분포를 보이지만 NSOM으로 측정된 결과 (그림 5)는 탐침이 금속표면과 25)nm 떨어진 곳에서 최대 값을 가진다. 탐침이 금속표면에 접근 하면 탐침에 의해 표면 플라즈몬 모드에 영향을 주게 되어 경계면에서 최대의 전기장 분포를 가지지 못하고 약 250 nm 떨어진 곳에서 최대값을 가진다. 탐침이 금속박막으로부터 멀어 질수록 표면 플라즈몬 모드가 탐침의 영향을 받지 않아 지수함수 적으로 감소하는 것을 알 수 있다. 탐침에 대한 영향을 대략적으로 알아 보기 위해서 그림 6과 같이 프리즘, 금 박막, 공기, 그리고 무한히 넓은 탐침으로 이루어진 계의 투과율을 계산하였다. 실험 결과와 유사하게 투과율은 금속의 경계면이 아니라 금속표면으로부터 일정한 거리만큼 떨어진 곳에서 최대 값을 가진다. 탐침으로 측정되는 최대 광의 세기와 금속표면에서의 광의 세기의 차를 ΔI 로 정의 하면, 실험 결과보다

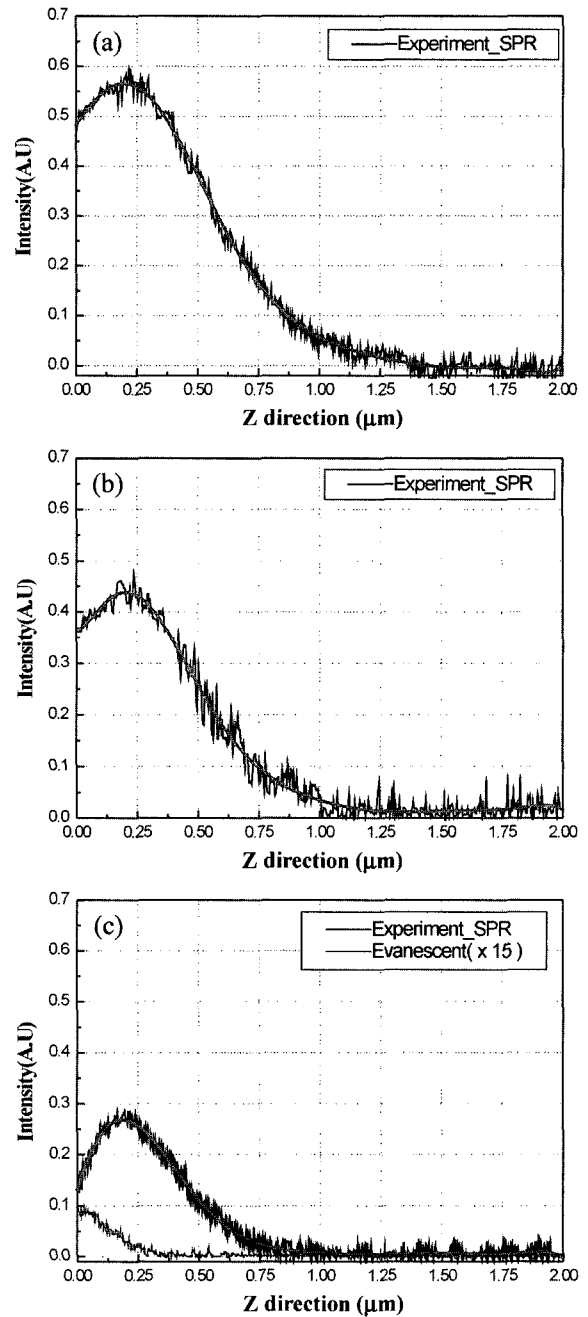


그림 5. NSOM으로 입사각도가 (a) 44.0°, (b) 44.5°, (c) 45°일 때 탐침의 높이에 따른 표면 플라즈몬의 세기.

계산된 결과의 ΔI 가 더 큰 것을 알 수 있으며, 이는 실험에 사용한 탐침이 유한한 크기를 가지므로 무한 하다고 가정할 탐침보다 표면 플라즈몬의 모드에 영향을 덜 주기 때문이라 생각된다. 탐침에 의한 표면 플라즈몬 모드의 변화에 대해서는 좀더 구체적인 연구가 앞으로 필요하다고 생각된다.

표면 플라즈몬은 표면의 변화에 매우 민감하여 NSOM으로 표면 플라즈몬을 측정하고 할 때 탐침의 영향을 받지 않도록 금속박막으로부터 적절한 높이 만큼 떨어진 곳에서 측정해야 한다. 또한 이러한 조건에서 높은 S/N을 얻을 수 있다.

두 개의 표면 플라즈몬에 의해 생긴 정상파를 측정하기 위

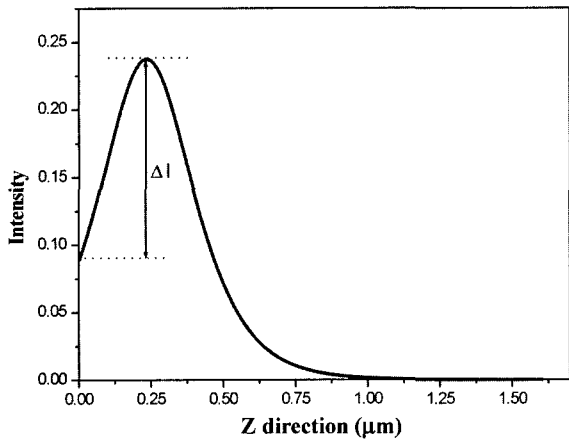


그림 6. 프리즘/금 박막/ 공기/ 탐침 구조로 이루어진 계에서의 표면 플라즈몬의 세기.

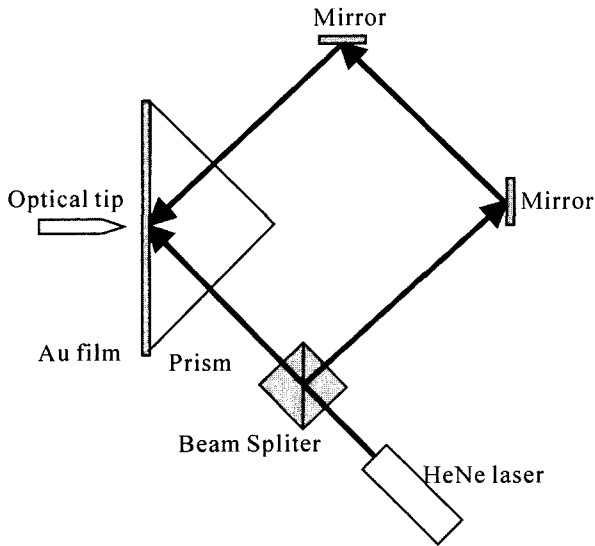


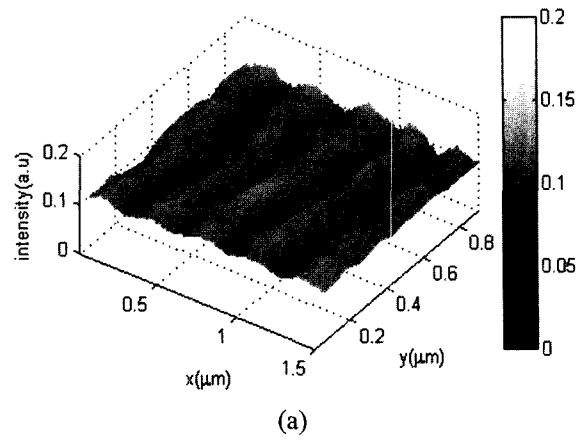
그림 7. 표면 플라즈몬의 정상파 측정을 위한 개략도.

해 탐침을 금속 박막으로부터 250 nm 떨어지게 하였다. 그리고 표면 플라즈몬의 여기 조건으로 광이 입사 하면 반사되어 나오는 광이 소멸 되므로 그림 7과 같이 광을 입사할 때 입사광을 양쪽으로 나누어 입사 시켰다. 그림 8은 1.5 μm×0.9 μm의 면적을 2차원 주사를 하여 측정한 결과이다.

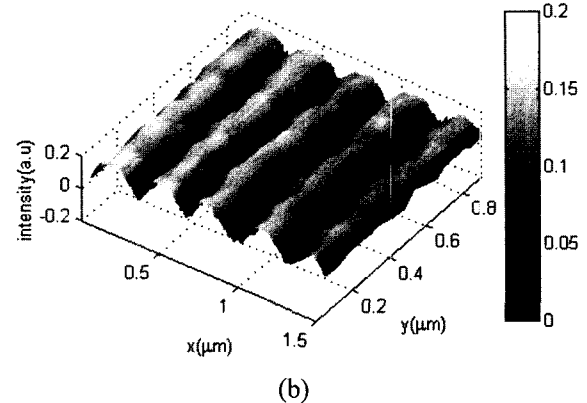
그림 8(a)는 금 박막이 없는 경우이며, (b)는 표면 플라즈몬에 해당한다. 두 경우 모두 입사각은 45도 이며, 측정된 정상파의 주기는 약 300nm이다. 표면 플라즈몬은 그림 5(c)에서 보듯이 소멸광파에 비해 수~수십 배의 강한 전기장이 형성되어서 큰 빛의 투과를 나타내게 되므로, 빛의 세기에 상당한 차이가 생겼다.

IV. 결 론

본 논문에서는 Shear force를 이용하여 근접장 주사 광학 현미경을 제작하였으며, 이를 이용하여 프리즘 표면과 탐침과의 거리를 일정하게 유지시켜 프리즘 표면에 형성된 소멸광파



(a)



(b)

그림 8. NSOM으로 (a) 소멸광파와 (b) 표면 플라즈몬의 정상파를 면적으로 측정한 결과.

의 정상파를 형성시켜 측정함으로써 근접장 내에서의 광분포와 회절한계 이내의 광학적 정보를 얻을 수 있음을 확인하였다. 이를 토대로 프리즘 표면에 금 박막을 증착하여 입사각도를 바꾸어가면서 표면 플라즈몬을 측정하였다. 측정한 결과 탐침의 영향으로 표면 플라즈몬의 공명 조건이 바뀌게 되어 광의 세기는 표면에서가 최대가 아니라 표면에서 약 250 nm 떨어진 부분에서 최대가 됨을 알 수 있었다. NSOM으로 표면 플라즈몬을 측정할 때 탐침의 영향을 받지 않으면서 최대의 S/N을 얻기 위해서는 탐침을 금속박막으로부터 최소한 길이만큼 떨어진 곳에서 측정해야 하며, 50 nm 두께의 금 박막과 200 nm 크기의 탐침을 사용할 경우에는 약 250 nm 떨어진 곳에서 측정을 해야 탐침의 영향을 받지 않으며, 높은 S/N비를 얻을 수 있다.

감사의 글

본 연구는 본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2001-000-00324-0(2002))지원으로 수행되었으며 지원에 감사 드립니다.

참고문헌

[1] F. Zenhausern, Y. Martin, and H. K. Wickramasinghe,

- “Scanning interferometric apertureless microscopy: Optical imaging at 10 angstrom resolution,” *Science*, vol. 269, pp. 1083-1085, 1995.
- [2] B. D. Terris, H. J. Mamin, and D. Rugar, “Near-field optical data storage,” *Applied Physics Letters*, vol. 68, pp. 141-143, 1996.
- [3] A. Partovi, D. Peale, M. Wuttig, C. A. Murray, G. Zydzik, L. Hopkins, K. Baldwin, W. S. Hobson, J. Wynn, J. Lopata, L. Dhar, R. Chichester, and J. H-J. Yeh, “High-power laser light source for near-field optics and its application to high-density optical data storage,” *Applied Physics Letters*, vol. 75, pp. 1515-1517, 1996.
- [4] S. I. Bozhevolnyi, J. Erland, K. Leosson, P. M. W. Skovgaard, and J. M. Hvam, “Waveguiding in Surface plasmon polariton band gap structures,” *Physical Review Letter*, vol. 86, 14, pp. 3008-3011, 2001.
- [5] L. Salomon, G. Bassou, H. Aourag, J. P. Dufour, and F. de Fornel, “Local excitation of surface plasmon polaritons at discontinuities of a metal film: Theoretical analysis and optical near-field measurements,” *Physical Review B*, vol. 65, pp. 125409-1-125409-5, 2002.
- [6] J. Seidel, S. Grafstron, L. Eng, and L. Bischoff, “Surface plasmon transmission across narrow grooves in thin silver films,” *Applied Physics Letters*, vol. 82, pp. 1368-1370, 2003.
- [7] H. Reather, *Surface plasmon on smooth and rough surfaces and on gratings* (Springer-Verlag, 1988), pp. 4-13.

Measurement of surface plasmon using near-field scanning optical microscope

Suna Ko, Gwansu Lee, Seung Ryong Park, Jaewoong Yoon, Seok Ho Song[†],
Pill-Soo Kim, and Cha-Hwan Oh

Micro Optics National Research Laboratory, Department of Physics, Hanyang University, Seoul 133-791, KOREA
[†]*E-mail: shsong@hanyang.ac.kr*

(Received August 18, 2003, Revised manuscript December 24, 2003)

Surface plasmons (SPs) are charge density oscillations that propagate along an interface between a dielectric and metal. In this paper, the electric field of SPs and the interference of two SPs are observed by using Near-field Scanning Optical Microscope (NSOM). The excitation condition of SPs is changed as the optical tip approaches the metal surface, because the excitation condition of SPs is very sensitive to surface structures. To measure the microscope field of SPs, the distance between metal surface and optical tip must contain a specific interval.

OCIS Codes : 110.6960, 120.6650.