《연구논문》 Hankook Kwanghak Hoeji, Volume 10, Number 3, June 1999
(Journal of the Optical Society of Korea - Korean Edition)

일정광량 방식의 광자주사현미경 제작

김지택 · 최완해 · 조재홍 · 장 수
한남대학교 물리학과
김달현 · 구자용
한국표준과학연구원 공정특성그룹
정승태
삼성전자연구소

(1998년 12월 7일 받음, 1999년 5월 24일 수정본 받음)

가열인장(heating and pulling) 방법을 이용하여 개구부 직경이 약 100 nm 이하인 광섬유 탐침을 제작하였으며, 이를 이용하여 일정광량 방식의 광자주사현미경을 제작하였다. 광섬유 탐침을 물체에 미세하게 접근시켜서 물체면을 주사하기 위하여 원통형 PZT(piezoelectric transducer)를 x-y-z의 3부분으로 나누어 z축의 미세접근 및 1.43 μm × 1.76 μm의 면적을 x-y축으로 주사할 수 있는 3차원 PZT 주사기를 제작하였다. 그리고 광섬유 탐침에서 검출되는 에바네슨트파의 광량이 항상 일정하도록 전자적인 되먹임 회로에 의한 광섬유 탐침이 1 λ(λ는 입사파장임) 이하의 근접장 영역에서 물체로부터의 높이가 일정하도록 하였다. 그리고 이렇게 제작된 일정광량 모드의 광자주사 현미경을 이용하여 정상파 형태의 에바네슨트파를 측정하였다.

I. 서 론

에바네슨트파를 응용한 광자주사현미경(PSTM : photon scanning tunneling microscope)은 금속과 같은 도체 또는 반도체 물질에서 나노미터 크기의 형상을 조사하는 전자주사현미경(STM: scanning tunneling microscope)[1,2]과 그 기본 개념이 매우 유사하나, 본질적으로 가시광을 이용한다는 것과 극미세 형상을 갖는 투명한 유전체나 살아있는 세포를 적용대상으로 한다는 것이 큰 차이가 난다.[3] 이러한 PSTM은 근접장 광학현미경(NSOM : near field scanning optical microscope)이라는 좀더 포괄적인 개념으로 1983년에 D. W. Pohl[4,5]이 최초로 실험적으로 구현 이래로 1983년에 독립적으로 A. Lewis 등[6]이, 1986년에 E. Betzig 등[7]이 이를 제작하였다. 1990년대에 들어와서는 광자주사현미경의 다양한 응용성이 알려지면서 많은 연구팀들이 PSTM의 이론적 분석, 탐침 제작법, 다양한 응용에 대하여 연구를 하였다.[8-14] 또한 PSTM의 장점을 이용한 분자구조 연구나 세포의 관찰 등과 같은 응용연구 및 PSTM 장비의 실용화를 위한 장비개선에 관한 연구 등도 급속도로 이루어졌다.[9,15,16] 다시 언급하면 PSTM은 비금속 또는 세포와 같은 생물체의 나노미터 크기의 극미세 형상을 관찰하고자 할 때, 광의 회절에 기인한 수십 마이크로미터 크기의 분해능 한계로 인하여 이러한 미세한 물체의 관찰이 불가능한 광학 현미경를 대체하는 새로운 개념의 현미경이라고 할 수 있다.[11] 즉 이 현미경은 일반적인 광학현미경의 회절한계를 극복하고 원자단위의 크기를 갖는 비전도성 물체의 형상이나 생체를 비파괴적으로 관찰할 수 있는 새로운 기술의 현미경으로서 전자주사현미경이 관찰할 수 없는 물체의 영역을 보는 새로운 광학 현미경으로 언급할 수 있다.[11]

국내에서도 1993년 이래로 근접장 광학에 대한 연구가 시작되어서 PSTM용 광섬유 탐침에 대한 연구,[17,18] 일정높이 모드의 PSTM,[19] shear force 현미경[20] 등이 국내의 대학교와 연구소에서 연구되고 있다. 본 논문에서는 지금까지 국내에서 널리 알려져 있는 화학적 에칭 방법[16-18] 대신에 취급이 용이한 가열인장 (heating and pulling) 방법으로 PSTM에 사용되는 광섬유 탐침을 제작하고자 한다. 그리고 이렇게 제작된 광섬유 탐침에서 검출되는 에바네슨트파의 광량을 항상 일정하도록 광섬유 탐침이 부착된 PZT(piezoelectric transducer)의 z부분을 전자적 되먹임 회로로 조정하고, 이 조정되는 전류를 가지고 물체의 형상을 그리는 일정광량 방식의 PSTM을 제작하고자 한다. 이러한 일정광량 방식의 PSTM은 국내에서 최초로 시도되는 형태로 다양한 응용이 예상된다.

II. 광자주사현미경의 제작

2.1. 기계부와 3차원 주사기의 제작

PSTM의 기계부의 전체적인 구조는 시료가 놓이는 도브 프리즘(dove prism)의 지지대, 원통형 PZT에 광섬유 탐침을 붙인 주사기와 이를 고정시키는 z축 방향의 지지대(PZT holder, translator, translator holder) 및 초기접근장치인 스텝핑 모터를 고정하는 밑판으로 구성된다. 이러한 PSTM의 광섬유 탐침을 시료에 접근시킬 때 광섬유 탐침과 시료가 부딪힘으로 인한 손상을 막기 위하여 초기에는 컴퓨터를 이용하여 조정하는 스텝핑 모터로 광섬유 탐침이 물체에 접근하도록 하였다. 그리고 표면의 형상을 보고자하는 물체를 올려놓는 도브 프리즘을

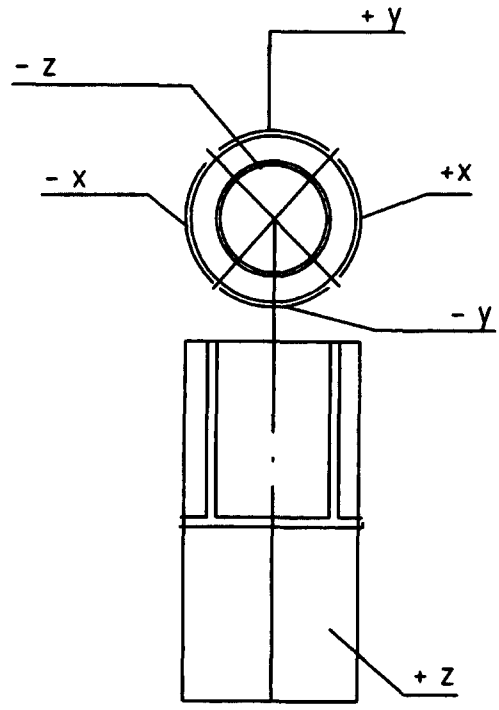

그림 1. 구조를 단순화하기 위하여 하나의 원통형 주사기를 분할하여 x-y-z 방향의 미세변위가 가능하도록한 길이가 2", 외경이 0.25", 두께가 0.02"인 가느다란 원통형의 주사기의 구조 및 전극 배치도.

고정하는 프리즘 지지대는 시료와 광섬유 탐침 사이의 상대적 위치를 수평적으로 조절할 수 있도록 설계하고 제작하였다.

PSTM 장치를 이용하여 광파장 이하의 미세구조를 관찰하는데 가장 중요한 역할을 하는 것은 3차원 주사기이다. 광섬유 탐침(tapered optical fiber tip)을 고정시켜 시료의 표면을 주사하면서 시료의 표면과 광섬유 탐침이 동일한 에바네슨트파의 세기를 따라 일정한 거리를 유지하도록 한다면 탐침은 시료의 표면형상을 그대로 따라가게 된다. 이때 탐침의 움직임은 주사기에 걸리는 전압에 의해 제어되고, 이 제어되는 전압으로 시료의 표면형상을 그린다. 본 논문에서는 이와 같은 특성을 만족시키기 위해 길이가 2.0", 외경이 0.25", 두께가 0.020"인 가느다란 원통형의 PZT 주사기를 사용하였으며, 하나의 원통형 PZT 주사기를 분할하여 x-y-z 방향의 미세변위가 가능하도록 하였다. 원통형 주사기의 길이의 1/2은 바깥전극을 4등분하여 각각의 부분에 ±x축과 ±y축을 위한 전극을 그림 1과 같이 만들고, 탐침은 원통의 한 가운데에 고정하였다. 그리고 나머지 1/2의 외부에는 되먹임 회로로부터 유입되는 별도의 +z축 신호를 위한 전극을 만들고, 내부에는 -z로 수축하는 전압을 가하여 PZT의 열팽창을 보상할 수 있으면서 z축 전극의 길이를 변화시켜 각축의 감도를 조절할 수 있게 하였다. 본 논문에서 사용한 PZT 주사기의 분해능은 z축으로는 85Å/V이고, x축 및 y축으로는 169 Å/V이다. 그리고 이 광섬유 탐침에 의하여 산란된 PSTM 신호를 검출하기 위하여 Hamamatsu사 PMT(모델 : R2228)를 사용하였다. 그리고 PMT에 의해서 검출된 신호의 잡음을 제거하고 증폭하기 위하여 저잡음 증폭필터(Stanford Research System, SR 560)를 사용하였다.

2.2. 초기접근장치 및 PZT를 이용한 정밀접근장치

광섬유 탐침을 미세하게 움직이는데 중요한 역할을 하는 것은 물론 주사기이지만, 이것은 기본적으로 압전소자인 PZT로 작동되므로 수 mm 이상의 큰 움직임에는 부적합하다. 이를 위해서 본 장치에서는 마이크로미터와 Vexta사의 5상 스텝핑 모터(모델 : SPD5517)를 이용하여 초기접근장치를 만들었다. 마이크로미터는 시료와 탐침 사이가 충분히 멀리 떨어져 있을 때 그 사이를 눈으로 확인하면서 접근시킬 때 이용하며, 한 펄스당 0.18° 씩 돌아가는 스텝핑 모터는 마이크로미터에 연결하여 탐침을 시료표면의 1 μm 이내까지 접근시키는데 사용하였다. 이러한 초기 접근장치는 0.25 μm/펄스의 분해능을 갖는다. 이렇게 스텝핑 모터를 이용하여 광섬유 탐침을 시료에 초기접근시킨 후 PZT에 연속된 전압을 가하여 좀더 정밀한 접근을 하게 되는데, 이때 쓰이는 전원은 컴퓨터에 접속되어 있는 D/A 변환기(Keithley Data Acqusition, DAS-50)로부터 0 V로부터 10 V의 전압을 받아서 고전압 OP 증폭기(Analog Device, PA88)를 통해 이루어 진다. PZT에 의한 접근이 완료된 후 x축과 y축으로의 주사가 이루어지는데, 이때도 컴퓨터의 주기판에 접속된 D/A 변환기에 의해 12비트의 분해능을 가지고 이루어진다.

2.3. 일정광량에 의한 광섬유 탐침 높이 제어용 되먹임 회로와 3차원 표면영상 알고리즘

그림 2는 PSTM 장치에서 일정한 광이 광검출기에 검출되었을 때 이를 이용하여 광섬유 탐침의 높이를 일정하게 유지하기 위하여 PZT의 z축 구동전압을 제어하는 되먹임 회로이다. 입력단 가까이에 있는 회로는 전류의 절대값을 취하는 역할을 하는데 OP 증폭기 2개와 10 kΩ 저항 5개, 그리고 2개의 다이오드로 이루어져 있으며, 이는 되먹임 회로의 입력이 부호가 반대가 되면 제어기능을 잃는 현상을 방지하기 위해서 사용된다. 그 다음 단에서는 시료표면으로부터 z축 방향으로의 거리에 대하여 에바네슨트파의 광전류가 지수함수 형태로

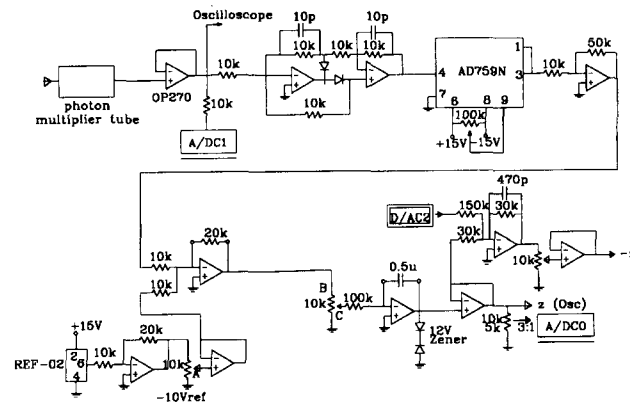

그림 2. PSTM 장치에서 일정광량이 광검출기에 검출되었을 때 이를 이용하여 광섬유 탐침의 높이를 일정하게 유지하기 위하여 PZT의 z축 구동전압을 제어하는 되먹임 회로.

변하므로 이것을 선형의 관계로 바꾸어 주기 위하여 log 증폭기를 사용하였다. 되먹임 회로에서 가장 중요한 역할을 하는 것은 결국 적분기로써 기준전압과 측정된 광전류 신호와의 차이를 적분하여 출력을 시키며, 적분기에 입력되는 차신호의 크기를 조정하거나 시상수(time constant)를 조정하여 최적의 제어를 한다. 적분기에서 출력된 값을 최종 출력단에서 증폭하여 주사기의 PZT에 설치한 z축 전극에 걸어주면, 이로 인해서 광전류는 항상 일정한 값을 유지하게 되고 결국 시료의 표면과 광섬유 탐침의 끝부분은 항상 일정한 거리를 유지하게 된다. 이 회로의 입력단 부근에서는 광전류를 읽고 최종부분에서는 되먹임 전압을 읽는다.

되먹임 회로를 통하여 시료의 표면과 광섬유 탐침 사이를 일정하게 유지한 다음, 시료의 x축 방향으로 광섬유 탐침을 주사하기 위하여 PZT의 x축 전극에 컴퓨터를 통하여 프로그래밍화된 2채널 D/A 변환기(Keithley Data Acqusition, DAS-50)를 이용하여 주사 전압을 인가한다. 사용한 D/A 보드는 앞에서 사용한 A/D 보드에 같이 붙어 있는 것으로 분해능이 12 비트이다. D/A 변환기를 통하여 입력된 신호와 기준전압과의 차이를 적분한 다음, 이를 고전압용 OP 증폭기로 증폭한다. 이때 사용한 고전압용 OP 증폭기(Analog Device, PA88)는 증폭율에 따라 최대 440 V (단극), 또는 ±215 V (양극)의 고전압을 출력으로 낼 수 있다. 이러한 고전압용 OP 증폭기에서 증폭된 출력신호는 최종적으로 PZT의 x축 및 y축 전극에 가해져서 광섬유 탐침을 주사하는데 사용된다.

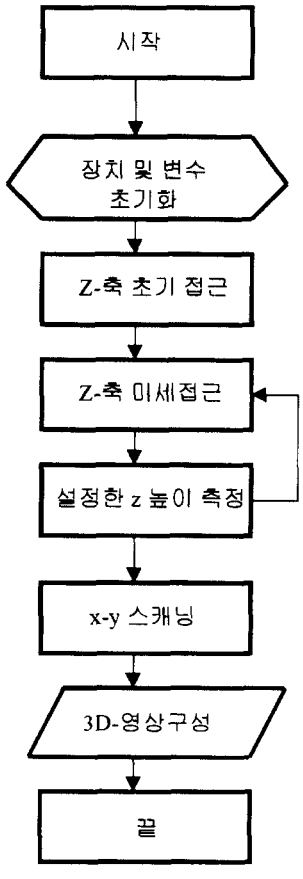

그림 3. PSTM용 3차원 표면영상 그리기 위한 흐름도.

본 PSTM 장치에서는 Turbo C로 구성된 프로그램을 이용하여 그림 3의 흐름도에 의해 시료으로의 광섬유 탐침의 접근과 주사기의 시료표면에서의 x-y방향의 주사를 조절하였다. 이때 되먹임 회로의 기준전압과 측정된 광전류에 의한 전압사이의 차를 적분하는 적분기의 출력을 이용하여 시료의 높이가 구별되고, 이를 시료 표면에서 주사하면서 시료 표면의 3차원 영상을 측정하였다. 이때 시료의 3차원 표면형상이므로 2차원 화면에 알아보기 쉽게 표시해야 한다.

III. 실험장치 및 방법

PSTM에 의한 극소한 시료의 영상을 보는데 분해능을 좌우하는 가장 중요한 것이 광섬유 탐침의 상태이다.[3, 17] 본 논문에서는 취급이 용이하고 재현성이 뛰어난 가열인장 방법을 사용하여 광섬유 탐침을 제작하였다. 사용한 광섬유는 632.8 nm

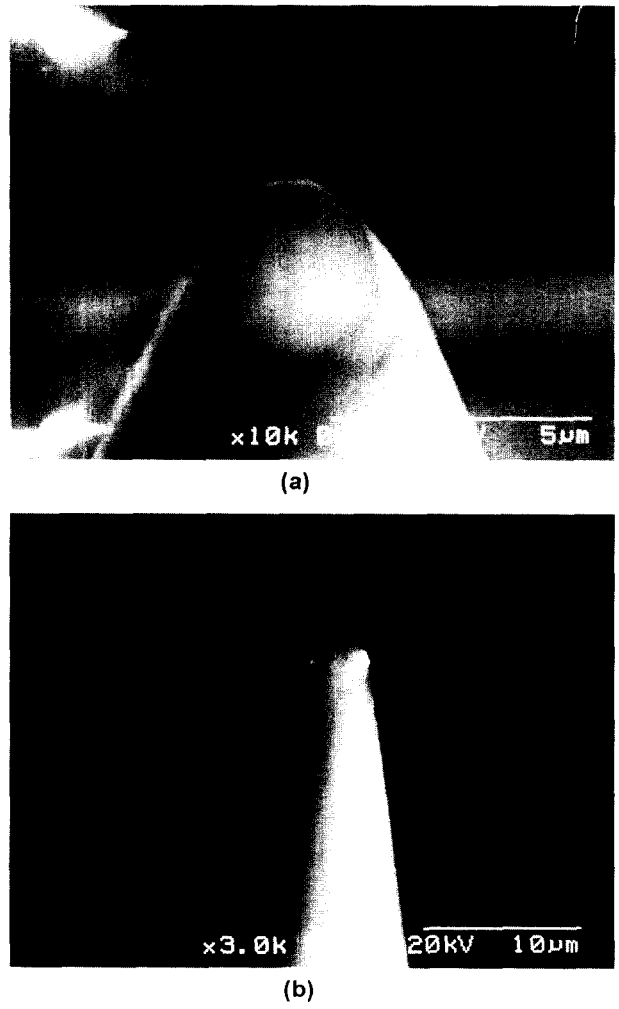

그림 4. micro-pipette puller를 사용하여 가열인장 방법으로 만든 광섬유 탐침의 모양을 보여주는 SEM 사진. (a)는 광섬유 탐침 끝을 87°로 세워서 찍은 사진이고, (b)는 옆면에서 찍은 사진이다. 탐침의 구경(aperture)은 약 100 nm 이하이다.

에서 단일모드 광섬유(Newport, F-SV)이며, 코아 직경 4.6 μm이고 클래딩 직경이 125 μm이다. 본 실험에서는 최대출력 15 W의 CW CO_2 레이저 및 광섬유 인장장치를 갖춘 micro-pipette puller(Shutter instrument사, P-2000)를 사용하였다. 그림 4는 이 micro-pipette puller 장치를 사용하여 가열인장 방법으로 만든 광섬유 탐침의 모양을 보여주는 SEM 사진이다. 이 사진들중 (a)는 광섬유 탐침 끝을 87°로 세워서 찍은 사진이고, (b)는 옆면에서 찍은 사진이다. 이 사진들에서 밝은 단면은 녹아서 가늘어진 광섬유의 클래딩 단면을 보여준는 것으로 코아는 이 부분보다 훨씬 작고, 각 부분의 직경 비율대로 계산할 경우 탐침의 구경(aperture)이 약 100 nm 이하임을 확인할 수 있었다. 레이저 출력과 펄스시간 간격, 인장력 등과 같은 실험조건을 잘 맞추어 실험하면 직경 40 nm인 광섬유 탐침도 제작할 수 있으나 이는 극히 제한적으로 만들어지기 때문에 실제 실험에 사용한 탐침의 직경은 직경 60 nm를 사용하였다.

그림 5는 PSTM의 각 부분을 전체적으로 연결해놓은 것을 보여주는 장치의 개략도이며, 동시에 에바네슨트파의 정상파를 측정하는 실험장치도이다. 그림에서 보듯이 광섬유 탐침을 스텝핑 모터와 수평현미경을 통하여 근접장 근처의 1 μm 근처까지 초기접근을 시키며, 다시 PZT를 이용하여 시료로부터 0.2 μm 이내까지 정밀접근시킨다. 그리고나서 광섬유 탐침에서 나오는 광량이 높이에 따라 일정하게 유지되도록 하는 되먹임 회로를 이용하여 시료로부터 광섬유 탐침의 높이를 일정하게 유지시켰다. 그리고 이 PZT의 x-y 부분을 조절하여 좌우 스캔을 할 수 있도록 하였다. 광섬유 탐침에 의하여 검출된 에바네슨트파는 PMT로 검출되어 A/D 변환기를 통하여 컴퓨터로 입력되는데, 에러신호는 D/A 변환기를 통하여 PZT의 x-y-z를 조정하는데 사용되고, 영상신호를 영상신호 처리 프로그램에 의하여 3차원 영상으로 재현한다. 이러한 구성으로된 PSTM 장치의 사진이 그림 6이며, (a)는 PSTM 기계부, 광섬유 탐침부, 접근장치의 부분을 보여주며, (b)는 전자제어부를 보여주고 있다.

실험에 사용한 광원은 20 mW의 He-Ne 레이저(Uniphase, 1135P)로 파장은 632.8 nm이다. 이 광속이 프리즘 지지대 위 놓여 있는 크기가 가로 15 mm, 세로 3.6 mm, 높이 5.1 mm인 도브 프리즘(Melles Griot, 01 PDE 407)에 입사하고

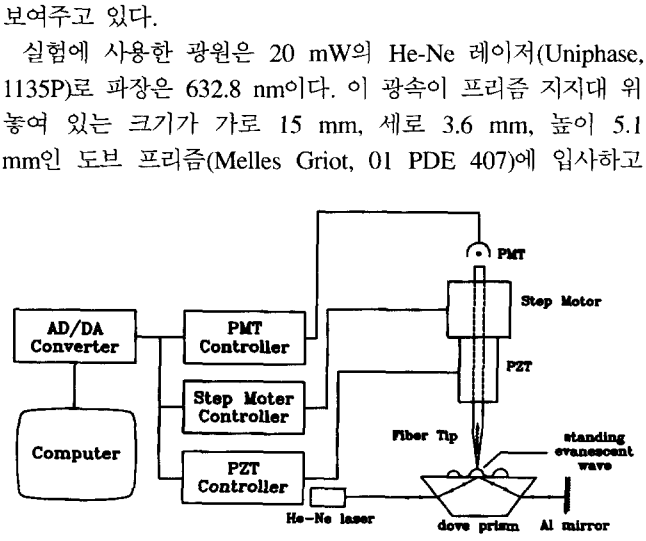

그림 5. PSTM의 각 부분을 전체적으로 연결해 놓은 것을 보여주는 장치의 개략도이며, 동시에 에바네슨트파의 정상파를 측정하는 실험장치도.

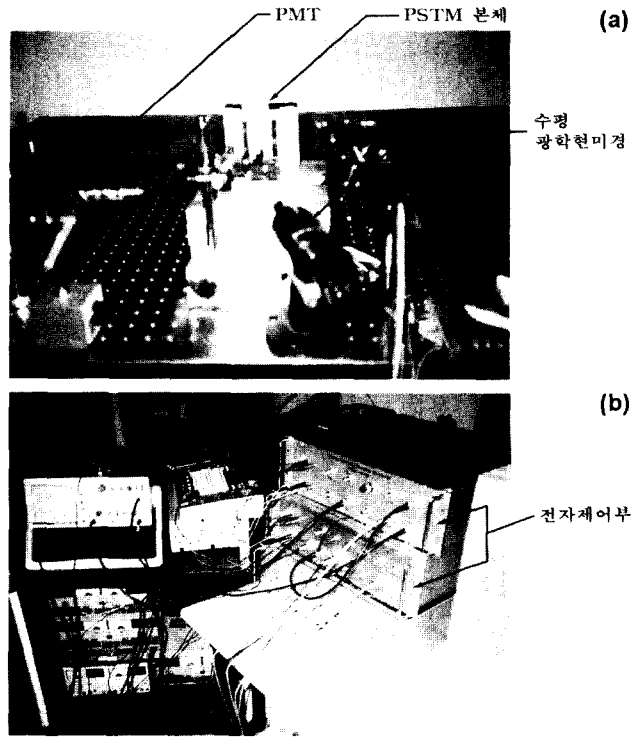

그림 6. 일정광량방식의 광자주사현미경 사진. (a) 기계부와 탐침부 사진, (b) 전자제어부 사진.

도브 프리즘 윗면에 에바네슨트파를 형성하면서 전반사를 한다. 전반사후 도브 프리즘을 지나온 광속을 다시 Al 거울로 되반사시켜서 도브 프리즘 윗면에서 에바네슨트파에 의한 정상파가 형성되도록 하였다.

IV. 실험결과 및 논의

파장이 λ_0인 빛을 임계각보다 큰 각으로 프리즘에 입사하여 전반사를 만들면, 입사된 빛을 평면파로 가정할 때 프리즘 바로 바깥의 전기장은 프레넬 방정식에 의하여 아래와 같은 에바네슨트파가 형성된다.[21]

$$E(x, y, z) = E_0 \exp(-z/d) \exp[i(2\pi/\lambda)x + i(2\pi/\lambda)y] \quad (1)$$

여기서 $\lambda = \lambda_0/[n\sin\theta]$, $d = \lambda_0/[2\pi(n^2 \sin^2\theta - 1)^{1/2}]$이며, n은 도브 프리즘의 굴절률이고, θ는 에바네슨트파가 형성되는 도브 프리즘에 레이저가 입사하는 입사각이다. 에바네슨트파가 프리즘 표면으로부터 거리에 따라 지수함수적으로 감소하므로 광섬유 탐침으로 터널링되는 빛의 양은 PMT에 의한 잡음과 산란된 빛에 의한 배경신호 이외에 에바네슨트파에 의해 (1)식으로부터 다음과 같은 신호 I(z)와 감쇠상수 s를 얻을 수 있다.

$$I(z) \sim \exp(-z/s) \quad (2)$$

$$s = \frac{d}{2} = \frac{\lambda_0}{4\pi\sqrt{(n\sin\theta)^2 - 1}}$$

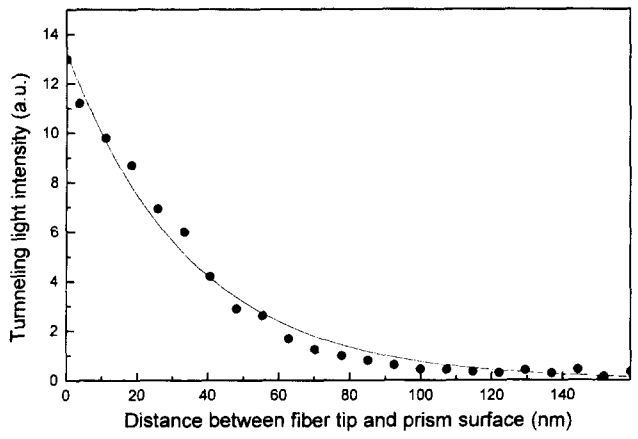

그림 7. 제작된 PSTM의 z축 접근시(탐침이 오른쪽에서 왼쪽으로 접근) 탐침과 시료사이의 거리가 0에서 160 nm 일 때 PMT에 검출된 신호크기들(검은 점들은 측정값이고, 실선은 지수함수로 curve fitting한 결과임).

이때 광섬유 탐침을 프리즘으로 접근시키면 위 식과 일치하는 결과를 얻을 수 있다.

그림 7은 제작된 PSTM의 z축 접근시 광섬유 탐침과 시료사이의 거리가 약 160 nm부터 0 nm사이에서 PMT에 검출된 신호로 (2)식에서 예측한 에바네슨트파의 프리즘 위의 강도분포인 지수함수적 증가와 잘 일치한다. 이렇게 얻어진 지수함수의 경사진 부분의 중간에 탐침이 오도록 시료에 근접시킨 후, 3차원 주사기를 x-y 방향으로 주사하면 표면의 상을 얻을 수 있다. 이때 사용한 광원은 He-Ne 레이저이므로 파장이 632.8 nm이고 도브 프리즘의 굴절률은 BK-7 유리로 만들어졌기 때문에 n = 1.515이고, 도브 프리즘에서 전반시 전반사면에서의 입사각도는 $\theta = 72.0°$ (입사광은 프리즘 전반사면과 평행하게 입사하며, 프리즘의 입사면에서 입사각은 45°임)이므로 감쇠상수 s = 48.5 nm이다. 그러나 실제로 그림 7로부터 구한 감쇠상수는 s = 40 nm로 이론적으로 계산한 식과 약간 차이가 난다. 이 값이 앞서 참고문헌 (19)에서 구한 값들과 거의 일치하고 있으나, 입사각도가 약간 다르기 때문에 약간의 차이가 있다. 정확히 이론값과 실험값이 일치하지 않는 이유는 이론식이 평면파를 가정하였으나 실험에서는 가우시안 레이저 광속을 사용하였기 때문이며, 측정시 입사각도가 정확히 측정할 수 없었기 때문이다.

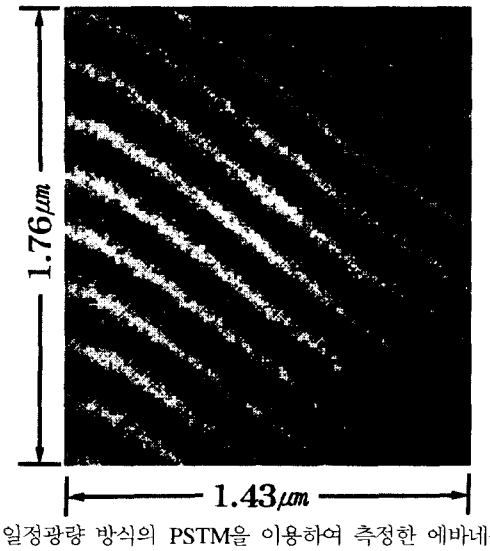

그림 8. 일정광량 방식의 PSTM을 이용하여 측정한 에바네슨트 정상파의 영상. 영상의 크기는 1.43 μm × 1.76 μm이고, 정상파 간격은 0.20 μm이다.

도브 프리즘에서 전반사되어 나온 빛을 거울로 반사시켜 반대방향으로 진행시키면 프리즘 바로 바깥에 에바네슨트파의 정상파를 만들 수 있다. 광섬유 탐침으로 이러한 에바네슨트파 형태의 정상파를 측정할 때, 이 에바네슨트파로부터 광섬유 탐침으로 터널링되어 검출되는 빛의 세기도 앞서 설명한 바와 같이 정상파 형태의 에바네슨트파를 가질 것이므로 그림 8과 같은 모양의 상을 얻을 수 있다. 이때 주사한 면적의 넓이는 1.43 μm × 1.76 μm이다. 그림 11에서 어두운 부분은 검출된 빛의 세기가 약한 곳으로 정상파의 마디에 해당하고 밝은 부분은 정상파의 배에 해당한다. 에바네슨트파 형태의 정상파의 밝은 곳에서 밝은 곳까지의 간격 Λ는 그림에서 보듯이 0.20 μm이며, 이는 평면파가 입사한다는 가정에서 구한 $\Lambda = \lambda/2 = \lambda_0/[2n\sin\theta] = 0.22$ μm의 값과 일치하고 있다. 여기에서 정상파의 형태가 완전한 직선이 아니고 약간 구부러진 것은 주사 경계의 끝부분에서 PZT에 인가된 전압에 대한 비선형적인 반응 때문이며, 이에 대한 전자회로상에서의 보정작업을 계속하고 있다. 그리고 정상파의 왼쪽보다 오른쪽이 어두운 이유는 에바네슨트파의 형태가 가우시안이므로(레이저 광이기 때문임) 가장자리가 약간 어둡기 때문이다.

V. 결 론

가열인장 방법을 이용하여 개구부 직경이 약 100 nm 이하인 광섬유 탐시침을 제작하였으며, 이를 이용하여 일정광량 모드의 광자주사현미경을 제작하였다. 제작된 광섬유 탐침을 물체 표면에 접근시키기 위해서 초기에 스텝핑 모터와 광학현미경을 이용하여 물체면의 위쪽 1 μm까지 초기접근을 시킨다. 그리고 광섬유 탐침을 물체에 보다 미세하게 접근시켜서 물체면을 주사하기 위하여 원통형 PZT를 x-y-z의 3부분으로 나누어 z축의 미세접근 및 1.43 μm× 1.76 μm의 면적을 x-y 주사할 수 있는 3차원 주사기를 제작하였다. 또한 광섬유 탐침에서 검출되는 에바네슨트파의 광량이 항상 일정하도록 전자적인 되먹임 회로에 의한 광섬유 탐침이 1 λ 이하의 근접장 영역에서 물체로부터의 높이가 일정하도록 하였다. 그리고 이렇게 제작된 일정광량 방식의 광자주사 현미경을 이용하여 정상파 형태의 에바네슨트파를 관측하였다. 일정광량의 방식의 PSTM은 물체의 높낮이가 있어도 형상측정이 가능하므로 참고문헌 (19)에서 제작한 일정높이 방식의 PSTM보다는 실용적이라고 할 수 있다. 앞으로는 주사면적을 넓히고, 높낮이를 갖는 다양한 시료들에 대한 자료를 측정할 것이며, 가열인장방식의 탐침 제작방법을 세밀하게 연구할 예정이며, 본 장치의 측정정밀도를 측정하고 계산하는 연구를 지속적으로 할 계획이다.

감사의 말

본 연구는 학술진흥재단 자유응모과제(과제번호 : 01-D-0730)의 일환으로 수행되었음을 알려드립니다.

참고문헌

[1] 구자용, 김달현, 김영주, 이우천, 임우혁, Scanning Tunneling Microscope의 개발, 초정밀 측정기술 개발 최종보고서(한국표준과학연구원, 대전, 1992), KRISS-92-102-IR.
[2] Y. Kuk and P. J. Silverman, Rev. Sci. Instrum. **60**, 165-180 (1989).
[3] M. A. Paesler and P. J. Moyer, *Near-Field Optics : Theory, Instrumentation, and Applications* (John Wiley & Sons, Inc., New York, 1996) pp. 3-19.
[4] D. Pohl, European patent application no. 0112401, Dec. 27 1982; US patent 4,604,520, Dec. 20 1983.
[5] D. W. Pohl, W. Denk, and M. Lanz, Appl. Phys. Rev. Lett. **44**, 651-653 (1984).
[6] A. Lewis, M. Issacson, A. Murray, and A. Harootunian, Biophys. J., **41**, 405a (1983).
[7] E. Betzig, A. Lewis, A. Harootunian, M. Isaacson, E. Kratschmer, Biophys. J. **49**, 269 (1986).
[8] L. Salomon, F. De Fornel, and J. P. Goudonnet, J. Opt. Soc. Am. A **8**, 2009-2015 (1991).
[9] H. Heinzelmann and D. W. Pohl, Appl. Phys. A **59**, 89-101 (1994).
[10] T. Pangaribuan, K. Yamada, S. Jiang, H. Ohsawa, and M. Ohtsu, Jpn. J. Appl. Phys. Part 2, **31**, L1302-L1304 (1992).
[11] F. de Fornel, P. M. Adam, L. Salpmon, J. P. Goudonnet, A. Sentenac, R. Carminati, and J.-J. Greffet, J. Opt. Soc. Am. A **13**, 35-45 (1996).
[12] J. C. Weeber, F. de Fornel, and J. P. Goudonnet, J. Opt. Soc. Am. A **13**, 944-951 (1996).
[13] A. Madrazo and M. Nieto-Vesperinas, J. Opt. Soc. Am. A **14**, 618-628 (1997).
[14] K. Tanaka, M. Tanaka, and T. Omoya, J. Opt. Soc. Am. A **15**, 1918-1931 (1998).
[15] S. Jiang, H. Ohsawa, K. Yamada, T. Pangaribuan, M. Ohtsu, K. Imai, and A. Ikai, Jpn. J. Appl. Phys. Part 1, **31**, 2282-2287 (1992).
[16] M. K. Lewis, P. Wolanin, A. Gafni, and D. G. Steel, Opt. Lett. **23**, 1111-1113 (1998).
[17] 김정후,조재흥,장 수, 응용물리, **8**(3), 307-310 (1995).
[18] 임현혁, 김지택, 조재흥, 장수, 김달현, 구자용, 응용물리 **10**, 412-416 (1997).
[19] 이상기, 제원호, 새물리, **35**, 694-699 (1995).
[20] 서울대학교 물리학과 제원호 교수 연구팀과 삼성전자연구소 정승태 박사 연구팀 및 전남대 윤선현 교수 연구팀에서 shear force 현미경 제작에 대한 연구가 이루어지고 있음을 개인적 상호교신으로 알고 있음.
[21] M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics* (Pergamon, London, 1975), Chap.1.

Fabrication of the photon scanning tunneling microscope with constant intensity mode

Ji Taek Kim, Wan Hae Choi, Jae Heung Jo and Soo Chang
Department of Physics, Hannam University, Taejon 306-791, Korea

Dal Hyun Kim and Ja-Yong Koo
Korea Research Institute of Standards and Science, Materials Evaluation Center, Taejon 305-600, Korea

Seung Tae Chung
Samsung Electronics Co., Ltd., Suwon 442-373, Korea

(Received December 7, 1998, Revised manuscript received May 24, 1999)

We made sharp optical fiber tips with less than 100 nm diameter by using the heating and pulling method with a good repeatition and fabricated the photon scanning tunneling microscope (PSTM) using constant intensity mode. The 3-dimensional PZT (Piezoelctric transducer) scanner made of a long PZT tube is consisted of three divided parts, that is, a pair of $\pm$x and a pair of $\pm$y scanning parts and a z scanning part for the fine approach and scanning. The scanning dimension is 1.43 μm$\times$1.76 μm. The height of a optical tip to maintain a constant height within $1/\lambda_0$ (λ_0 is the incident wavelength) from surface of a specimen to a optical tip is controlled automatically by using the electric feedback circuit. The 3-dimensional shape of standing evanescent waves generated on the surface of a dove prism was measured successfully by using the constant intensity mode PSTM.