

## NSOM 장치의 제작 및 특성 평가

이주인 · A. K. Viswanath · 유성규 · 신정규\* · 유필원\*

한국표준과학연구원 양자표준부, 대전 305-600  
\*광주과학기술원 정보통신공학과, 광주 500-712  
(1999년 6월 26일 접수)

### Fabrication and evaluation of NSOM apparatus

Joo In Lee, A. K. Viswanath, Sungkyu Yu, Jung-Gyu Shin,\* and P. W. Yu\*

Division of Quantum Metrology, Korea Research Institute of Science and Standards, Taejeon 305-600

\*Department of Information and Communications, Kwangju Institute of Science and  
Technology, Kwangju 500-712

(Received June 26, 1999)

**요 약** - Near-field scanning optical microscope(NSOM) 장치를 자체 제작하고 이의 특성을 조사하였다. 탐침과 시료 사이의 거리 조절을 위해 압전 소자와 He-Ne 레이저를 이용하였으며, 100 nm 이하의 분해능을 얻을 수 있었다. 이 NSOM 장치를 반도체 분광 연구에 활용하여 GaAs/AlGaAs MQWs와 InAs/GaAs QDs 시료에 대한 photoluminescence, photocurrent 및 reflectance 등의 분광 실험을 수행하였다. PL 실험의 경우 첨예한 광섬유의 끝단을 통과하는 광원의 세기가 매우 약하기 때문에 신호 대 잡음비가 매우 낮았으나 photocurrent 실험에서는 신호 대 잡음비가 100배 이상 좋아짐을 알 수 있었다. 따라서 NSOM을 이용, photocurrent를 측정할 경우 10 nm 이하의 공간 분해능을 얻을 수 있는 가능성을 보여주었다.

**Abstract** - We made a near-field optical microscope(NSOM) apparatus and evaluated it. To control the distance between a tip and a sample, we used a piezoelectric translator and a He-Ne laser, and consequently obtained the spatial resolution better than 100 nm. For the semiconductor spectroscopic applications, we performed photoluminescence and photocurrent experiments on the GaAs/AlGaAs MQWs samples. In the case of PL experiment, we obtained the low signal to noise ratio due to the extremely small power of a light source passing through the nanometric optical fiber tip. However, photocurrent experiment shows a hundred times better signal to noise ratio than that of PL experiment. This suggests that photocurrent experiment using NSOM have the possibility to provide the spatial resolution better than 10 nm.

### 1. 서 론

최근 10여년간 극소화된 양자구조의 개별적인 분광 특성 평가를 위하여 여러 가지 기술이 시도되었다. 그 중 하나가 광학 현미경을 이용한 분광 특성 평가이다. 광학 현미경을 이용할 경우 레이저 광을 1  $\mu\text{m}$  정도로 집속 시킬 수 있으며, 이러한 micro 분광 시험 평가 연구는 반도체 신소재의 물성 연구에 지대한 공헌을 한 바 있다. 하지만 원리적으로 광 파동을 조사의 수단으로 이용하므로 파동의 근본적인 성질인 회절에 의한 분해능 한계인  $\lambda/2$ 를 넘어 설 수가 없다. 따라서 수십 또는 수

백 nm의 양자구조를 갖는 시료의 개별적 분광 시험 평가를 위하여 새로운 개념의 측정기술을 필요로 하게 되었다.

1928년 Syngge에 의해 near-field scanning optical microscope (NSOM)의 개념이 처음으로 제안되었고 [1] 1982년에 NSOM을 개발하였다 [2]. 이후로 grating의 상을 subwavelength 분해능으로 관측하는데 성공하였고 [3], shear-force feedback을 이용하여 fiber tip과 시료간의 거리를 좀더 일정하게 유지할 수 있게 되었다 [4,5]. 이와 같이 NSOM을 이용하여 반도체 미세구조, 유기물의 단 분자, 생체 단백질 등에 대한 광 특성 연구뿐만

아니라 단 원자 단위의 결정성장기술, 고 밀도 광 기록 소자, 분자단위의 광 메모리 소자 등의 응용 연구를 수행하고 있다 [6]. 또한 최근에 펄스 레이저를 이용한 시분해 분광연구와 접목하여 초 미세구조 및 단 분자의 개별적인 동력학 연구가 시도되고 있다. 하지만 fiber tip의 크기가 줄어들면서 시료로부터 측정되는 광신호가 대단히 미약하여 이를 검출하는데 어려움이 따르게 되어 NSOM의 공간 분해능을 향상시키기 위한 연구에 큰 장애 요인으로 작용하고 있다. 이를 해결하기 위한 좋은 방법 중의 하나가 시료를 검출기로 이용하는 것이다. 즉, fiber tip으로 보내어진 광으로부터 여기된 운반자를 광전류(photo-current)로 측정하는 방법이다. 최근 Lienau 연구진에서 광 전류를 이용한 NSOM 연구 결과가 있고 [7], 본 연구에서도 같은 기술을 이용하여 반도체 양자우물에 적용하여 그 응용성을 알아보았다.

본 연구에서는 NSOM 장비를 자체 제작하여 이를 분광 및 시 분해 분광 특성 평가에 응용하고자 하였다. NSOM 장비를 자체 제작하고 NSOM 작동 및 분광 측정을 computer로 자동 제어할 수 있도록 하고 NSOM 장비의 특성 조사를 논의하였고, 반도체 양자구조에 대한 NSOM PL(photoluminescence) 및 PC(photo-current) 등 실험 결과를 기술하였다.

## 2. NSOM 장치 제작 및 특성 조사

### 2.1. NSOM 장치 제작

그림 1은 본 연구에서 구성 중인 NSOM 장비의 개략도이다. NSOM의 탐침으로는 끝을 첨예하게 만든 광섬유를 이용하는데, 미국의 Topometrix 사에서 구입하였다. 첨예한 광섬유의 크기는 50nm로 끝 부분을 제외하고는 빛이 새어나가는 것을 방지하기 위하여 Al로 coating 되어 있다 [8]. 시료는 우선 mechanical X-Y-Z translator

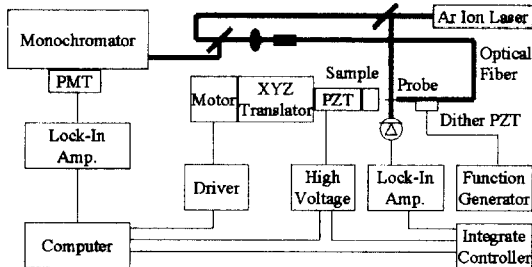


그림 1. Schematic diagram of NSOM system.

로 x,y축은 1  $\mu$ m 분해능으로 이동할 수 있고, z축은 step motor를 부착하여 0.07  $\mu$ m 분해능으로 computer로 제어하도록 되어있다. 또한 압전 소자 (piezoelectric device)를 이용하면 1 nm 이하의 분해능으로 이동이 가능하도록 되어 있다. 압전 소자는 높은 전압을 인가하면 압전 소자가 변형이 되면서 x, y, z축으로 이동하게 된다. 압전 소자에 높은 전압을 인가하는 전압 증폭기 (voltage amplifier; Physik Instrumente)는 최고 -1000 V 까지 전압을 높일 수 있고, 압전 소자를 x, y, z축으로 이동시키기 위하여 5채널로 이루어져 있다.

첨예하게 제작된 광섬유에 Ar 이온 레이저 광을 집속시켜 보내면 반대편 끝에 첨예한 광섬유에 근접광이 형성된다. 근접광이 형성된 광섬유를 시료에 수 nm 거리 까지 접근시키기 위하여 첨예한 광섬유와 시료 사이의 shear force를 이용한다. 즉, function generator를 이용하여 광섬유의 공명 진동수인 약 100 KHz로 시료표면과 평행하게 진동시킨 후, He-Ne 레이저로 Al이 coating된 광섬유에 레이저 빛을 입사시켜 반사된 광을 photodiode로 검출하고 lock-in amplifier로 신호를 측정한다. 압전 소자를 이용하여 시료를 광섬유에 수 nm 까지 접근시키면 광섬유와 시료 사이에 shear force가 작용하여 광섬유의 공명 진동수가 감소하면서 진폭도 감소하게 된다. 이 변화는 곧 lock-in amplifier에 측정되어 광섬유와 시료 사이의 거리를 일정하게 유지할 수 있다. 이와 같이 거리를 일정하게 조절하기 위해서는 lock-in amplifier에 측정된 값을 일정하게 하기 위하여 전압 증폭기에 feedback 신호를 전달하는 회로가 필요한데 이 feedback 회로는 자체 제작하였다. 근접광이 형성된 광섬유가 시료와 수 nm 거리를 유지하게 되면 근접광이 시료에 입사하게되어 시료에서 발광이 시작된다. 이 때 입사된 근접광의 크기는 첨예한 광섬유 크기인 50 nm를 넘지 않게 된다. 하지만 Al coating의 불완전성과 시료가 발광하기 전에 운반자의 이동 등을 고려할 때, 본 연구에서 제작 중인 NSOM 장비의 공간 분해능은 100 nm 정도가 될 것으로 기대한다. 시료에서 방출된 광은 단색화 장치로 보내져 광 증배관으로 검출된다.

### 2.2. NSOM 장치의 특성조사

NSOM 장치 제작을 완료하고 NSOM 장치의 특성을 알아보았다. 우선 그림 2는 NSOM 장치의 탐침과 시료의 거리를 접근시켜주는 PZT (piezo-electric trans-

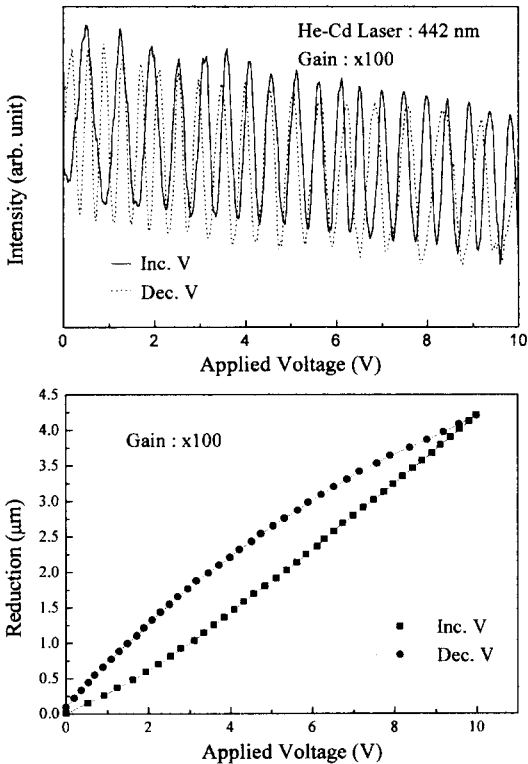


그림 2. The excitation laser light reflected through the fiber probe shows oscillations with a period of  $\lambda_{\text{He-Cd}}/2$ . (upper side) The length calibration of PZT reduction. (lower side)

lator)에 대한 전압 특성을 보여주고 있다. 전압이 증가함에 따라 PZT는 줄어들게 된다. 이때 이동거리 측정은 레이저의 간섭현상을 이용하였다. 즉, 일반적인 광섬유에 He-Cd 레이저의 442 nm 광을 입사시키면 시료와 광섬유간의 거리가 레이저 파장의 정수배 일 때 보강 간섭이 일어나고 반 파장 차이일 때 소멸 간섭이 일어나 시료에서 반사된 광 신호는 그림과 같이 진동하게 된다. 이때 진동 파장은 레이저 파장  $\lambda/2$ 과 일치하게 되어 압전 소자에 인가된 전압에 대한 압전 소자의 이동거리를 측정할 수 있다. 전압 이득이 100배이므로 1000 V에 대하여 전체 늘어난 길이는 약 4.2  $\mu\text{m}$ 이고 전압 이력현상 (hysteresis)이 보여지고 있다. 실제 NSOM 탐침을 조절하기 위하여 인가하는 전압은 300 V로 이 영역에서는 PZT가 약 2.5 nm/V 정도의 이동특성을 보여주었다.

그림 3은 자체 제작한 feedback 회로를 이용하여 탐침이 시료에 일정한 거리를 유지하도록 조절하는 결과를 보여준다. Feedback 회로의 시 상수 (time constant)를

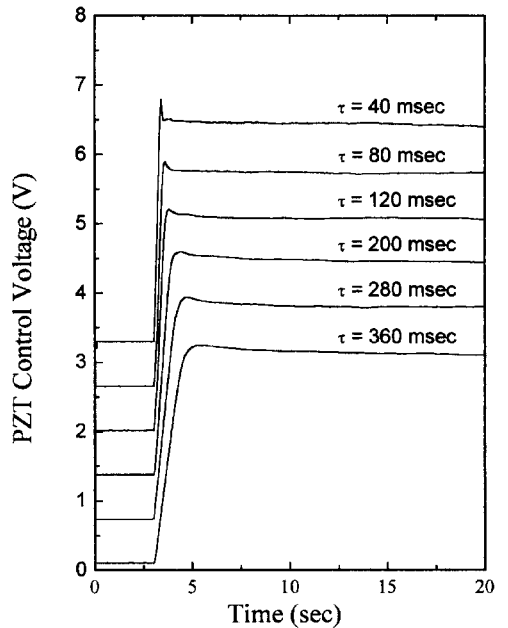


그림 3. The distance control between the sample and NSOM probe with feedback circuit.

변화시키어 각각의 조절 특성을 알아보았다. 시상수가 작은 약 120 msec 까지는 처음 조절 점에 도달할 때 확연하게 overshoot 현상이 보여지고 있다. 이러한 overshoot 현상은 탐침이 시료에 닿아 탐침이 끝이 손상될 수 있기 때문에 처음 조절점을 찾을 때는 feedback 회로의 시상수를 120 msec 이상에서 조절해야 할 것으로 생각된다. 시상수가 큰 경우는 overshoot 현상이 사라지는 반면에 조절 점에 도달하는 시간이 느려져 측정 방법에 따라 적절한 시 상수를 선택하는 것이 중요하다. 이러한 overshoot 현상이 feedback 회로에 의한 것인지 아니면 NSOM 개개의 장비 또는 PZT의 응답 속도 때문인지에 대한 검사를 컴퓨터를 이용하여 수행할 예정이다. PZT를 조절하는 전압의 조절 점으로부터의 요동은  $\pm 10 \text{ mV}$ 로 이는  $\pm 2.5 \text{ nm}$  정도의 PZT 요동에 해당한다. 이 요동을 줄이기 위하여 PZT 조절에 이용하는 He-Ne 레이저를 출력력이 더 큰 다이오드 레이저로 교체할 예정이며, 궁극적으로는 quartz 진동자를 사용한 non-optical 방식을 이용하여 shear force 신호를 안정화시킬 예정이다.

그림 4는 e-beam lithography를 이용하여 Si 기판 위에 Au를 lift-off시킨 시료를 NSOM topography와 SEM (scanning electron microscope)으로 찍은 사진을

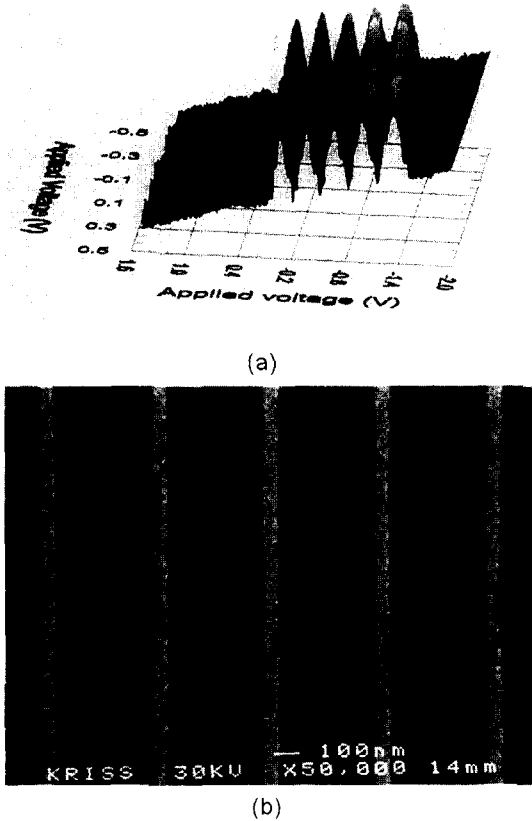


그림 4. The NSOM (a) and SEM (b) images for 0.1- $\mu\text{m}$  five Au lines on Si substrate.

보여주고 있다. 이때 5개 선을 갖는 Au의 선폭을 0.1  $\mu\text{m}$ , 간격을 0.5  $\mu\text{m}$ 로 하였다. SEM 사진에서 볼 수 있듯이 5개의 Au 선이 Si 기판 위에 잘 입혀져 있는 것을 볼 수 있다. NSOM topography의 인가 전압은 x 축의 경우 -2 V에서 1.6 V (전압이득:100), y 축의 경우 -0.5 V에서 0.5 V (전압이득:100)이었다. NSOM 사진 역시 5개의 Au 선이 잘 보여주고 있으나, 인가 전압이 증가함에 따라 각 선의 선폭이 줄어들고 있는 현상을 보여주고 있다. 이것은 압전 소자가 인가 전압에 대하여 비선형적으로 이동하고 있음을 보여주는 것으로 앞서 인가전압에 따른 z 축의 이동거리의 비선형성과 잘 일치하고 있는 현상이다. 또한 측면 방향으로 급격히 변화하는 높은 벽에 대하여 NSOM의 topography는 수직 상승이 아닌 사선으로 상승하고 있는 것을 볼 수 있는데 이는 NSOM이 AFM (atomic force micro-

scope)과 같이 거리 조절을 수직방향의 normal force를 이용하지 않고 시료와 평행한 방향의 shear force를 이용하기 때문에 나타나는 현상으로 생각된다. 즉, 선폭보다 선들 사이의 간격이 더 넓음에도 불구하고 선폭이 더 넓게 측정되었음을 알 수 있다. 이러한 오차는 앞으로 NSOM 측정에 있어서 잘 보정해 주어야할 요인으로 작용한다. 인가된 전압에 대한 압전 소자의 x, y 축 평균 이동거리는 20 nm/V로 나타났다. 이 시료의 Au 선폭이 100 nm임을 감안할 때, 본 연구에서 자체 제작된 NSOM의 공간 분해능은 100 nm 임을 확인할 수 있었다.

### 3. NSOM 분광 측정

GaAs/AlGaAs MQWs (multiple quantum wells)은 MBE로 성장하였다. 우선 GaAs 기판위에 1  $\mu\text{m}$  두께로 GaAs buffer 층을 성장하고 그 위에 AlGaAs를 barrier 층으로 GaAs를 well 층으로 하여 well 두께를 80 Å, barrier 층을 100 Å으로 하여 10개 층을 성장하였다. 이때 성장 온도는 560°C, 성장률은 1  $\mu\text{m}/\text{hour}$ 로 하였다.

그림 5는 상온에서 GaAs/AlGaAs MQWs 시료의 일반적인 PL 스펙트럼과 NSOM을 이용하여 얻은 PL 스펙트럼을 측정된 결과를 보여준다. 이때 광 여기 레이저로는 514.5 nm Ar ion 레이저를 사용하였고 광 검출기로는 광증배관 (photon multiplier tube: HAMMA-MATSU R 928)을 이용하였다. NSOM PL 측정시 시료의 발광이 약하기 때문에 NSOM의 탐침을 500 nm 크기로 사용하였다. 또한 시료에서 나온 발광을 최대한

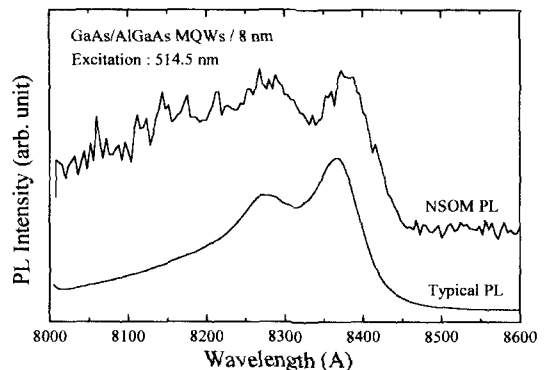


그림 5. The NSOM PL and typical PL spectra for GaAs/AlGaAs MQWs.

검출기에 집속하기 위하여 parabolic mirror를 이용하여 발광을 집속하였다. 일반 PL에서는 양자우물에서 볼 수 있는 heavy hole (8360 Å)과 light hole (8270 Å)준위와 관련된 두 peak이 나타나고 있고 light hole 발광보다는 heavy hole 발광이 좀더 세게 나타나고 있다. 하지만 NSOM PL에서는 light hole과 heavy hole의 발광 세기가 거의 같게 나타나고 있고, 좀더 단파장 영역에서의 발광이 일반 PL에서 보다 상대적으로 강하게 보여지고 있다. 아직 명확한 분석은 할 수 없지만 NSOM PL에서의 단위면적 당 레이저 강도가 일반 PL에서 보다 더 강하여 시료의 높은 에너지 준위에서의 발광이 상대적으로 강하게 나타난 것으로 추정된다. NSOM을 이용한 분광특성에서 공간 분해능을 높이기 위해서는 아주 양자효율 (quantum efficiency)이 높은 detector가 요구되고 있다.

앞서 서론에서 언급한 바와 같이 시료를 검출기로 이용하는 photocurrent 방법을 이용하면 광학 기기에 의한 광의 손실 없이 시료의 정보를 용이하게 얻을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 GaAs/AlGaAs MQWs 반도체 시료에 photolithography 기술을 이용하여 전극을 형성하였다. 그림 6은 시료 위에 형성된 전극을 광학 현미경으로 관찰한 사진을 보여주고 있다. 이때 두 전극사이의 거리는 40 µm이고, 전극의 폭은 100 µm이다. 광여기를 위한 광원으로는 파장을 변화시킬 수 있는 cw Ti:Sapphire 레이저를 이용하여 파장에 따른 시료의 photocurrent 변화를 관측하였다. 즉, 두 전극 사이에 NSOM의 첨예한 광섬유 탐침을 위치하고 광여기된 운반자에 의하여 흐르는 photocurrent를 lock-in Am-

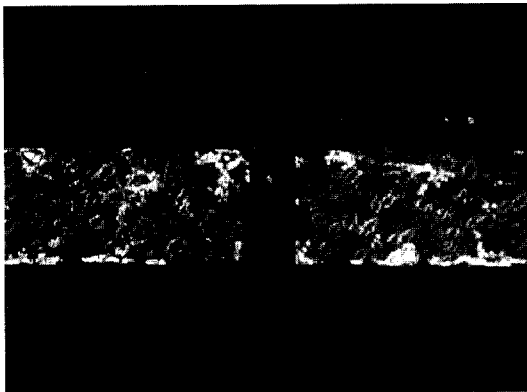


그림 6. Photograph of electrodes on GaAs/AlGaAs MQWs sample. The upper is magnified by 50 times and The lower by 200 times using optical microscope.

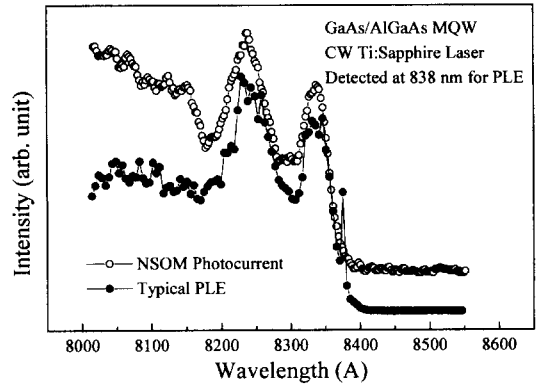


그림 7. The NSOM photocurrent and typical PLE spectra for GaAs/AlGaAs MQWs

plifier로 측정하였다. 이때 photocurrent는 광 여기에 의하여 흡수된 운반자의 양에 비례하여 전류 신호가 측정되기 때문에 시료의 파장에 따른 흡수 스펙트럼과 일치하게 된다.

그림 7은 GaAs/AlGaAs MQWs에서 일반적인 흡수 스펙트럼을 보여주는 PLE (PL excitation) 측정 결과와 NSOM을 이용한 photocurrent 실험을 보여주고 있다. PLE 실험을 위한 광원으로 같은 cw Ti:Sapphire 레이저를 이용하였고 측정파장은 838 nm 이었다. 그림에서 볼 수 있듯이 PLE 실험에서 나타나는 heavy hole과 light hole 준위에 관련한 흡수밴드가 NSOM을 이용한 photocurrent 실험에서도 동일하게 나타나고 있음을 알 수 있다. NSOM을 이용한 photocurrent 실험과 NSOM을 이용한 PL 실험은 사용된 탐침의 크기가 500 nm와 50 nm로 각각 다르다. 따라서 NSOM을 이용한 photocurrent 실험은 NSOM을 이용한 PL 실험 보다 신호대 잡음비 (signal to noise ratio)를 100 배 이상 높일 수 있는 장점이 있음을 알 수 있다. 이 photocurrent 스펙트럼의 신호대 잡음비를 볼 때 탐침의 크기를 10 nm로 하였을 때에도 photocurrent 스펙트럼 측정이 가능하다. 따라서 NSOM의 공간 분해능을 10 nm 이하로 할 수 있는 가능성을 보여 주고 있다. 또한 반도체 공정기술의 발달로 시료에 따라서 photocurrent를 측정할 수 있는 다양한 전극을 형성하여 다양한 반도체의 광물성 특성을 평가할 수 있을 것으로 기대된다.

### 5. 결 론

본 연구에서 100 nm 공간 분해능을 갖는 NSOM 장

치를 자체 제작하고 computer를 이용하여 측정을 자동화하였다. 압전 소자의 인가된 전압에 대한 이동거리를  $x$ ,  $y$ ,  $z$ 축에 따라 측정 및 보정하고 NSOM topography 사진을 얻는데 성공하였다. 이때 이동거리는  $x$ ,  $y$  축은 약 20 nm/V이고,  $z$  축은 2.5 nm/V이었다. 하지만 압전 소자의 인가된 전압에 따른 이동거리의 비선형성에 대한 보정 및 feedback 제어의 안정화 등은 앞으로 해결해야할 문제로 남아 있다. 자체 제작된 NSOM을 이용하여 GaAs/AlGaAs MQWs 시료에 대한 PL, photocurrent 등 분광 실험을 성공적으로 수행하였다. PL 실험의 경우 첨예한 광섬유에 보내진 레이저 광의 세기가 매우 미약하기 (수십 nW) 때문에 탐침 크기가 약 500 nm일 때 측정되었다. 하지만 photocurrent 실험에서는 시료를 검출기로 사용하기 때문에 신호대 잡음비가 PL에 비하여 100배 이상 좋아지는 것을 발견하였다. 따라서 NSOM을 이용한 photocurrent 방법은 앞으로

NSOM의 공간 분해능을 높이는데 하나의 돌파구를 마련해 줄 것으로 기대된다.

### 참고문헌

- [1] E. H. Syngé, Phil. Mag. **6**, 356 (1928).
- [2] D. Pohl, European patent application no. 0112401, Dec. 27 1982.
- [3] A. Lewis, M. Isaacson, A. Murray, and A. Harootunian, J. Biophys. **41**, 405a (1983).
- [4] E. Betzig, J. K. Trautman, T. D. Weiner, and R. L. Kostelak, Science, **251**, 1468 (1991).
- [5] E. Betzig, P. L. Finn, and J. S. Weiner, Appl. Phys. Lett. **60**, 2484 (1992).
- [6] M. A. Paesler and P. J. Moyer "Near-field optics", John Wiley & Sons, Inc. p9-13 (1996).
- [7] A. Richter, J. W. Tomm, Ch. Lienau, and J. Luft, Appl. Phys. Lett. **69**, 3981 (1996).
- [8] 이상기, 제원호, 새물리, **35**, 694 (1995).