

4분할 photodiode를 이용한 scanning confocal microscope*

유석진 · 김수철 · 이진서 · 권남익

한국 외국어 대학교 물리학과

(1996년 12월 26일 받음)

780 nm의 반도체 레이저, compact disk의 광 pick-up용 actuator, 그리고 4분할 photodiode를 이용하여 scanning confocal microscope를 구성하여 시료면의 높이와 재질의 차이를 측정하였다. 4분할 photodiode에 검출되는 오차 신호를 이용하여 렌즈가 장착되어 있는 actuator를 움직이면서 시료면에 레이저 광속의 초점이 항상 위치하도록 하였으며, 이 때 actuator에 흐르고 있는 전류를 시료면의 높이로 나타내어 3차원 영상으로 표현하였다. 또한 재질의 차이는 4분할 photodiode에 검출되는 합산 신호를 이용하여 컬러 프린터에 나타나는 3차원 영상의 색을 다르게 나타내었다. 전체적인 크기도 30 mm × 20 mm × 20 mm로서 작고 간단하며 scan영역은 최대 1.6 mm × 1.6 mm이다. 반사광의 세기를 이용한 scanning confocal microscope의 영상과 4분할 photodiode에 검출되는 오차 신호를 적분하는 방식을 이용한 scanning confocal microscope의 영상을 구하여 그 차이를 비교하였다.

I. 서 론

현미경을 사용하여 물체를 관측하는 분야의 연구는 오랜 역사를 가지고 있다. 보다 정밀한 관측을 위하여 현미경은 발전을 거듭하였으며 최근에는 작고 간단한 장치로 일반적인 광학 현미경으로는 관측할 수 없었던 부분도 관측할 수 있는 다양한 방법이 사용되고 있다. 그 중에서도 빛을 이용한 scanning confocal microscope에 대한 관심은 오래 전부터 시작되었으나 1940년대 말에 Robert 와 Young^[1]에 의해 단순한 형태의 scanning confocal microscope가 제작되면서부터 본격적인 연구가 시작되었다. 그 후 1957년 Marvin Minsky^[2]는 초기 형태보다 좀더 발전된 scanning confocal microscope를 제작하였다. 근래에는 기술의 발달로 laser source의 개발과 저렴한 data-processing system의 개발에 힘입어 scanning confocal microscope분야의 중요성이 대두되었다. 1980년대에 접어들면서 Tony Wilson^[3]에 의해 보다 나은 영상을 얻기 위한 연구가 시작되었고 최근까지도 시료 모습을 정확하게 나타낼 수 있는 영상을 얻기 위한 다양한 방법의 연구가 진행되고 있다. 좋은 영상을 얻기 위하여 바늘구멍을 대신하여 slit^[4]이나 광섬유^[5,6]도 사용되며 별도로 바늘구멍이나 단일모드 광섬유를 사용하지 않고 반도체 레이저 cavity를 바늘구멍으로, 반사광을 검출할 때의 검출기로는 반도체 레이저에 붙어있는 검출기를 사용^[7]하여 정렬뿐만 아니라 실험장치 구성을 아주 간단하게 한 방법도 보고되었다. 최근에는 탐침의 크기가 1.2 mm × 2.5 mm × 6.5 mm인 소형 scanning confocal microscope^[8]도 개발되었다.

Scanning confocal microscope는 일반적인 광학 현미경으로는 관측할 수 없었던 시료면의 거칠기나 깊이를 관찰할 수 있

고 시료를 한 point씩 움직이거나 레이저 beam을 움직여서 3차원 영상을 얻을 수 있다는 점에서 효과적이다. 3차원 영상을 얻을 수 있는 scanning confocal microscope는 세포 생물학과 유전자 연구 같은 생물학 분야^[9]에서도 사용될 수 있으며 이러한 장치는 불과 900 millisecond만으로도 망막의 전 영상을 얻을 수 있다.^[9] 그리고 반도체 연구에서는 고밀도 반도체의 표면결함을 찾아내는데 scanning confocal microscope를 이용^[10]하고 있다. 이 밖에도 scanning confocal microscope는 해상도에 있어서 우수하고 영상처리 속도도 빨라 사용에 편리하다.

이처럼 다양한 분야에서 사용되는 scanning confocal microscope에서는 시료의 표면에서 반사되는 반사광의 세기 변화로 영상을 얻는다. 초점이 표면에 있을 때 광원에서 집속렌즈를 지나 시료면에서 반사되는 반사광은 beam splitter에서 분리된 후 바늘구멍을 통과해 검출기에서 검출되며, 최대 세기를 갖는다. 표면이 초점에서 벗어나게 되는 경우에는 초점과 시료면 사이의 거리의 제곱에 비례하여 세기가 감소^[3]한다. 좀더 효과적인 영상을 얻기 위해서 검출기 앞의 바늘구멍 크기를 조절할 수 있으며 이러한 배열은 검출기에 검출되는 반사광의 세기를 다르게 하여 깨끗하고 미세한 영상^[11]을 얻게 해준다.

위와 같은 원리로 구성되는 scanning confocal microscope로 시료면의 정확한 영상을 얻기 위해서는 초점이 시료면의 최고점 보다 약간 위 또는 최저점 보다 약간 아래에 위치하여야 한다. 그렇지 않을 경우 시료면의 높이가 초점을 중심으로 같은 거리만큼 올라오거나 내려가 있는 곳에서 검출되는 반사광의 세기가 같기 때문에 영상은 실제 모습과 다르게 된다. 또한, 다층박막 구조를 갖는 동일 시료에서 부분적인 재질의 차이로 반사율이 다른 경우 검출되는 세기가 다르게 되므로 영상에서는 같은 높이의 시료면이 다른 높이로 나타날 수 있다. 그래서 이러한 문제를 보완하기

*본 연구는 교육부의 기초과학 학술 연구 조성비(BSRI-96-2429)의 지원을 받아 수행된 과제임.

위하여 시료 표면에 렌즈의 초점을 위치시키며 이 때 렌즈의 위치를 검출하여 시료 표면의 형상을 관찰하는 방법을 이용하였다. 이처럼 시료 표면에 초점을 위치시키는 방법에는 소프트웨어에 의한 방법과 전류 변조에 의한 방법이 있으나, 본문에서는 앞의 방법들에 비하여 처리 속도가 빠른 오차 신호 적분 방식의 scanning confocal microscope를 구성하였다. 오차 신호 적분 방식 scanning confocal microscope는 4분할 photodiode에서 만든 오차 신호를 이용한다. 이 오차 신호를 이용하여 렌즈를 종축으로 움직여서 초점이 시료면에 위치하도록 하며, 초점이 시료면에 위치할 때 렌즈가 움직이도록 actuator에 공급된 전류를 측정하여 영상을 구성하였다.

II. 오차 신호의 검출

오차 신호를 만들기 위하여 4분할 photodiode와 그 앞에 놓이는 원통형 렌즈를 사용하였다.^[12] 이 렌즈는 단일 방향(X 방향)으로만 렌즈로서 작용하고 또 하나의 방향(Y 방향)으로는 렌즈의 역할을 하지 않으므로 4분할 photodiode에서 광속이 원형의 형태로 모이는 점을 중심으로 이 점 앞에는 Y축과 평행한 하나의 선으로 그리고 뒤에는 X축과 평행한 선으로 광속이 모이게 된다. 따라서 원통형 렌즈에 의하여 만들어지는 초점의 형태는 중심에서 앞으로 다가감에 따라 세로의 긴 타원이 되며 뒤로 멀어짐에 따라 가로로 긴 타원이 된다. 한편, 시료면에 광속의 초점이 있을 때 4분할 photodiode에 원형의 형태로 광속이 모이는 점이 위치하도록 렌즈의 위치를 조정하면 4개의 출력의 연산 (a+c)-(b+d)는 '0'이 된다. 렌즈가 시료면에 가까이 다가가면 반사광의 초점면은 멀어지게 되므로 4분할 photodiode에서의 상은 세로가 긴 타원이 되고 오차 신호는 (-)가 된다. 반대로 렌즈가 시료면으로부터 멀어지게 되면 가로가 긴 타원이 되므로 오차 신호는 (+)가 되고 이렇게 하여 양극성의 오차 신호를 얻는다. 이 방법은 상용의 compact disk player와 laser disk player에서 초점을 compact disk나 laser disk면에 위치시키기 위하여 사용되고 있다.

합산 신호는 4분할 photodiode에서 4개의 출력을 다음과 같은 연산(a+c)+(b+d)으로 얻는다. 이 값은 초점이 시료면에 위치하면 최대가 되고 서로 다른 반사율의 재질에 대하여 이 값은 변하게 된다. 따라서 초점이 계속해서 시료면에 위치하는 경우에 있어서 합산 신호의 변화는 시료면의 재질 변화를 나타내게 된다.

III. 실험

그림 1은 오차 신호 적분 방식 scanning confocal microscope의 특성을 알아보기 위하여 거울을 시료로 이용하고 렌즈를 Z축 방향으로 200 μm 움직이면서 측정된 오차 신호와 합산 신호이다. 그래프에서 A는 합산 신호 B는 오차 신호이다. 오차 신호의 최대에서 최소까지의 거리는 약 18 μm로서 오차 신호가 초점의 위치에 민감함을 알 수 있다. 합산 신호

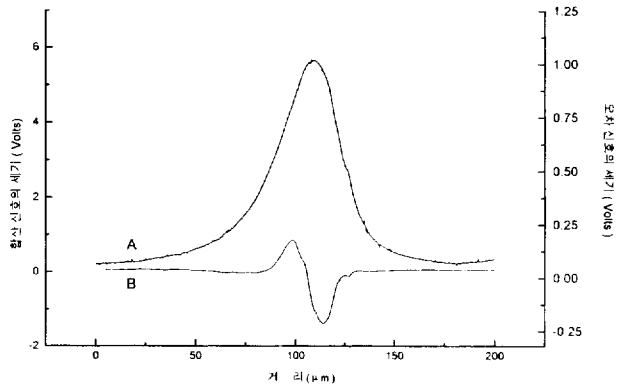


그림 1. 거울을 종축으로 200 μm 선형으로 움직이면서 측정된 오차 신호와 합산 신호. A: 합산 신호 B: 오차 신호

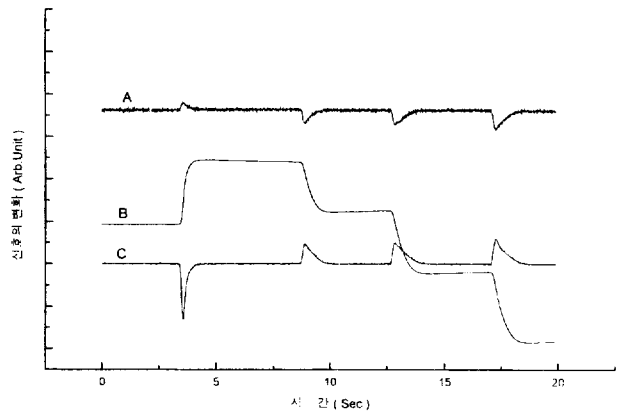


그림 2. 거울을 micrometer를 이용하여 종축으로 네번 움직이면서 측정된 오차 신호, 오차 신호의 적분값, 그리고 합산 신호. A: 합산 신호 B: 오차 신호의 적분값, 즉 렌즈의 위치 C: 오차 신호

의 반치폭은 약 38 μm이고 초점이 시료면 근처에 있을 때 거리의 제곱으로 감소하는 모습을 보여준다.

그림 2는 micrometer를 이용하여 Z축 방향으로 거울의 위치를 렌즈 쪽으로 10 μm, 그리고 반대 방향으로 8 μm, 10 μm, 그리고 11 μm씩 변화시키면서 오차 신호, 합산 신호, 그리고 시료면에 초점이 위치하도록 움직이는 렌즈의 위치를 측정된 그래프이다. 그래프에서 A는 합산 신호, B는 오차 신호의 적분값, 즉 렌즈의 위치, 그리고 C는 오차 신호이다. 합산 신호는 거울의 위치 변화에 의하여 오차 신호가 '0'이 아닌 곳을 제외하고는 일정한 값을 나타내고 있다. 합산 신호가 최대값보다 큰 값이 나오는 부분이 있는데 이것은 오차 신호가 '0'일 때 합산 신호가 최대값이 아니기 때문이다. 이러한 차이를 줄이기 위하여 bias를 (a+c)에 더하여 영상을 얻을 때에는 오차 신호가 '0'일 때 합산 신호가 최대값이 되도록 하였다. 오차 신호는 거울의 위치가 달라짐에 따라 (+), (-)의 신호를 나타내며 변하고 있다. Micrometer를 움직이면 오차 신호가 생기고 이 오차 신호를 적분한 값이 actuator에 공급되어 시료면에 초점이 위치하도록 렌즈를 움직이게 된다. 여기서 렌즈의 위치는 렌즈를 움직여서 오차 신호가 '0'이 되는 순간 ac-

tuator에 공급되고 있는 적분값이다. 이 때 적분기의 시상수는 micrometer로 거울을 움직이면서 oscilloscope로 적분값의 변화를 관찰하기 위하여 94 millisecond로 하였다. 영상을 얻는 실험에서는 적분기의 적분 속도가 빠를 경우 actuator에 필요 이상의 전압이 공급되어 렌즈에 의하여 모아지는 초점은 시료면을 지나치게 된다. 이때 오차 신호는 반대의 부호가 되면서 렌즈를 반대 방향으로 움직이게 하고 이러한 과정이 반복되어 떨기가 일어난다. 이렇게 되면 정확한 영상을 얻기가 어려워지므로 미분기와 적분기의 시상수를 조절하여 떨기가 일어나지 않도록 하여야 한다. 본 실험에서는 적분기의 시상수를 9.4 millisecond로 하였다.

그림 3은 오차 신호 적분 방식을 이용하여 3차원 영상을 얻기 위한 실험 구성도이다. X, Y축 scan은 시료를 붙일 수 있는 actuator 1과 렌즈가 붙어 있는 actuator 2를 이용하는데 Y축 방향의 scan을 위해서는 actuator 1을 이용하고 X축 방향의 scan으로는 Z축으로도 움직이는 actuator 2를 이용한다. 렌즈를 통해 시료면에 모아진 레이저 광속은 시료면에서 반사된다. 그리고 빔살가르계에서 분리된 이 반사광은 4분할 photodiode로 검출되고 검출된 반사광은 오차 신호와 합산 신호로 만들어진다. 오차 신호는 적분기를 통해 actuator 2의 Z축에 공급된다. 1600 μm 을 움직일 수 있는 actuator 1, 2를 X, Y축 방향으로 ± 10 V의 톱니파로 최대 400 μm 을 움직일 수 있도록 하였다. 이 톱니파는 Visual Basic으로 program한 software에 의하여 제어되는 data acquisition board(DT-31EZ)의 digital-analog converter 단자 DAC0과 DAC1을 통하여 출력된다. Scan영역은 software에서 최대 400 μm 영역 안에서 임의로 선택, 조정 할 수 있도록 하였다. Data acquisition board의 analog-digital converter 단자 ADC0로 오차 신호가 입력된다. 입력되는 오차 신호가 |오차 신호| ≤ 0.4 mV의 범위 안에 들어오면 ADC1으로 적분값 그리고 ADC2로 합산 신호를 받아들인다. 적분값을 화면에 높이로 나타낼 때의 색은 ADC2의 합산 신호의 크기에 따라 다른 색으로 표시한다. 이처럼 영상은 actuator 2가 오차 신호의 적분값에 의해 움직여서 |오차 신호| ≤ 0.4 mV조건이 만족될 경우에만 위의

과정을 반복하여 수행하게 되어 시료의 높이와 반사율의 차이를 화면에 나타내게 된다. 시료가 거울인 경우 오차 신호가 0.4 mV이면 영상의 높이가 오차가 0.04 μm 이므로 반사율이 낮아지면 오차는 커지게 된다.

IV. 결 론

시료로는 TIP-32C Power Transistor를 사용하였으며 시료의 전체 크기는 $1800 \times 1800 \mu\text{m}^2$ 이다. 그림 4는 반사광의 세기 차이를 이용한 영상으로서 가로 세로가 각각 $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ 이다. 영상은 전반적으로 완만하게 나타나며 금속 현미경으로 관측 할 수 없었던 표면의 상태, 깊이, 및 원형의 흠들이 나타나 있다. 곡선으로 나타나는 전극은 가장자리에 두줄의 굴곡진 부분을 경계로 기판과 구분되어 있으며, 기판의 표면은 울퉁불퉁하게 보인다.

그림 5는 오차 신호 적분 방식을 이용하여 그림 4의 시료의 부분을 똑같은 크기로 찍은 영상이다. 그림 4에서는 원형의 모습으로 보이는 흠들이 여기서는 불규칙한 형태의 모습으로 나타나며 이것은 Z축 방향의 오차가 크기 때문이다. 그러나 A부분의 전극과 기판 사이의 골은 잘 나타나 보이고 있다. 기판의 표면은 불규칙한 형태이며 전극과 비슷한 높이임을 알 수 있다. 그리고 그림 4에서는 보이지 않았던 전극 가운데 부분인 B에도 하나의 골이 형성되어 있는 것이 보이고 있다. 전극 가장자리의 두 줄은 전극보다 약간 높게 보인다. 본 논문의 그림이 흑백이기 때문에 나타낼 수 없는 C부분의 색은 컬러 프린터를 이용하면 연두색으로 나타나고 따라서 파란색인 전극과 반사율이 다를 수 있다. 색으로 확인되는 이 부분의 반사율은 전극의 약 50%이다. 그리고 이곳이 평평하게 보이는 것은 시료면이 -15 μm 보다 더 깊으나 렌즈의 위치를 15 μm 안에서만 움직이도록 하였

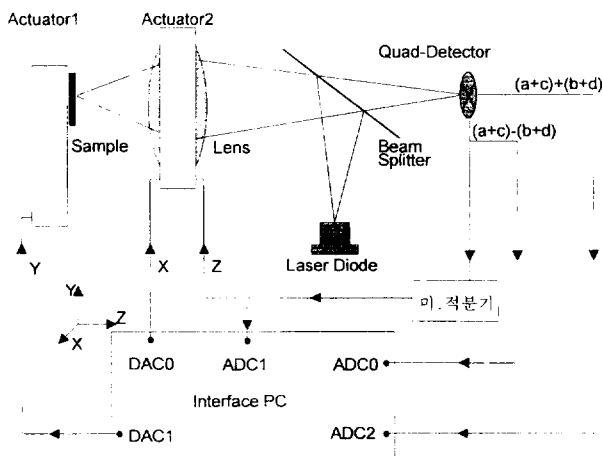


그림 3. 오차 신호 적분 방식 scanning confocal microscope의 실험 구성도.



그림 4. TIP-32C Power Transistor 시료에서 임의의 영역을 반사광의 세기 변화로 얻은 $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ 크기의 영상.

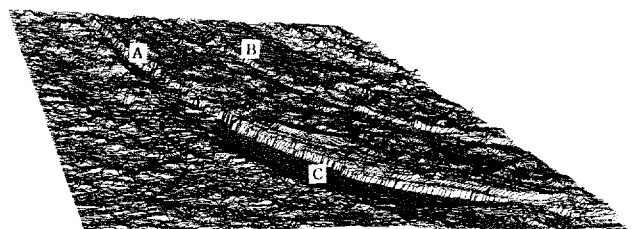


그림 5. TIP-32C Power Transistor 시료에서 그림 4의 영역을 오차 신호 적분 방식으로 얻은 $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ 크기의 영상.

으므로 렌즈가 가장 깊이 들어갈 수 있는 $-15 \mu\text{m}$ 을 나타내고 있기 때문이다.

IV. 토 의

시료로부터 반사되는 반사광의 세기에 의한 영상과 시료의 높이, 반사율차도 알 수 있는 영상을 하나의 구성으로 얻을 수 있는 scanning confocal microscope를 구성하였다. 본 scanning confocal microscope는 반사광의 세기에 의한 방식과 오차 신호 적분 방식을 하나의 실험 장치로 구성하였으므로 물체 표면의 거칠기를 조사하는 분야에서는 반사광의 세기에 의한 방법을 그리고 재질의 차이나 재질의 높이를 조사하는 분야에서는 오차 신호 적분 방식을 이용하면 매우 효과적이며 전체적인 크기도 $30 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 크기이다. 반사광을 이용한 scanning confocal microscope은 영상 처리 속도가 빠르므로 시료의 전체 영상을 먼저 이 방법으로 얻은 후, 좀더 세밀히 관찰하여야 할 부분은 오차 신호 적분 방식을 이용하여 영상을 얻는 다면 효과적이고 정확한 영상을 구할 수 있다. 그리고 4분할 photodiode를 이용하여 오차 신호를 순간적으로 얻기 때문에 전류를 변조하여 얻은 미분 신호를 오차 신호로 사용하는 것보다 훨씬 빠르다.

참 고 문 헌

- [1] J. Z. Young and F. Robert, Nature. **167**, 231 (1951).
- [2] Thomas V. Higgins, Contributing Editor, Laser Focus World. March, 94 (1995).
- [3] T. Wilson, ed., *Confocal Microscopy* (Academic, London, 1990).
- [4] Shigeharu Kimura and Chusuke Munakata, Appl. Opt. **29**, 7 (1990).
- [5] R. Ju kaitis, N. Rea and T. Wilson, Opt. Commun. **99**, 105 (1993).
- [6] Shigeharu Kimura and Chusuke Munakata, Appl. Opt. **30**, 16 (1991).
- [7] 이진서, 유석진, 조정석, 권남익, 응용물리. **9**, 4 (1996).
- [8] D. L. Dickensheets and G. S. Kino, Opt. Lett. **21**, 10 (1996).
- [9] E. Herget and K. Kaufmann, Laser Focus World. March, S11 (1996).
- [10] R. T. Milkowski and Loney, Laser Focus World. February, 115 (1996).
- [11] Michael Bass, ed., *Handbook of Optics*, Vol.II (McGraw-hill, New York, 1995), Chap. 17.
- [12] 정기혁, 도해 콤팩트 디스크 (가남사, 서울, 1988), pp. 187-188.

Scanning confocal microscope using a quad-detector

Sok-Jin Yu, Su-chul Kim, Jin-Seo Lee and Namic Kwon

Department of Physics, Hankuk University of Foreign Studies, Yongin 449-791, Korea

(Received : December 26, 1996)

We have constructed a scanning confocal microscope using a 780 nm semiconductor laser, an actuator of a compact disk player and a quad-detector. This device detects heights and characteristics of a surface. The laser focus was located at the surface of a sample by using the error signal obtained by a quad-detector, and the current supplied to the actuator for lens was displayed as a height. The materials of a surface were classified according to reflected total intensities and was displayed by different color in a monitor. The device has very small dimensions of $30 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ and scan field is $1.6 \text{ mm} \times 1.6 \text{ mm}$. We obtained two images, one using only reflected light and the other using an error signal from a quad-detector and compared these two images.