

파이버 공초점법을 이용한 레이저 빔 자동 초점 제어 장치에 관한 연구

문성욱* · 김종배 · 김선흠 · 배한성 · 남기중
고등기술연구원

Study on Auto Focusing System of Laser Beam by Using Fiber Confocal Method

Seong-wook Moon, Sun-hum King, Jong-bae Kim, Han-seong Bae, Gi-jung Nam
Institute for Advanced Engineering, Laser micro processing team

Abstract

Auto focusing system to find optimized focal position of laser beam used for material process has been investigated by using fiber confocal method. Wavelength of laser diode (LD) and diameter of single-mode fiber are 780nm and 5.3 μ m, respectively. Intensity distributions of beam reflected from the surface of mirror and silicon bare wafer have been observed in a gaussian form. Experimental results show that focal position obtained by LD is shifted from one observed from surface scribed by laser about 80 μ m. It is due to the difference of wavelength and each divergence of between LD and laser used for material process. It is confirmed that auto focusing control system through position calibration has operated steadily.

Key words : Fiber confocal method, auto-focusing, LD(laser diode), UV 355nm DPSS laser, Si bare wafer

1. 서 론

최근에 레이저를 이용하여 반도체, 디스플레이 분야에서 정밀 가공 기술이 급격히 확대되고 있다. 레이저는 광을 이용하기 때문에 시료에 비접촉 방법으로 가공이 가능하고 마이크로 크기의 구멍 가공이나 절단 등에 활용 될 수 있어 산업적으로 그 활용도가 점점 커지고 있다. 레이저 가공에 있어서 레이저 광을 렌즈를 이용하여 가공하고자 하는 시료의 표면에 정확히 초점을 맺히게 하는 것은 매우 어려운 작업이지만 가공 성능에 큰 영향을 주는 요소이기 때문에 반드시 수행되어야 하는 작업이다. 최근 초점위치를 자동으로 찾기 위한 방법으로 공초점 현미경에 사용되는 공초점 광학계를 사용하고 있다. 공초점 원리는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 광원에서 나온 빛이 집광렌즈에서 집광되어 시료 표면에 초점이 맺히게 되면 시료에서 반사된 빛은 동일 광 경로를 따라 광원으로 향하게 되며 광원에서 초점이 맺히게 된다. 이 경로에 광 분할기를 설치하여 반사 빛의 광 경로를 바꾸어도 반사된 빛은 광원과 광 분할기의 거리만큼 떨어진 곳에서 초점을 맺히게 된다. 이것을

공초점 원리라 부른다. Fig. 1에서처럼 반사된 빛의 초점 위치에 핀 홀을 두고 핀 홀 뒤에 광 검출기를 설치하면 시료 표면에 초점이 맺혔을 때 반사된 빛은 핀 홀을 모두 통과하여 광 검출기에서는 광량의 강도가 최대로 검출되고, 시료 표면에 초점이 맺히지 않았을 때에는 핀 홀의 크기보다 더 큰 빛이 핀 홀에 입사되기 때문에 빛의 일부가 핀 홀을 통과하지 못하게 되어 광 검출기에서는 광량의 강도가 낮게 검출된다. 즉, 시료 표면에 초점이 맺히면 검출기에서는 최대의 광량이 검출되고 초점 전후의 위치에서는 빛의 강도가 대칭적으로 감소하여 가우시안 형태의 강도 분포를 나타낸다. 이러한 특징 때문에 공초점 광학계는 공초점 현미경에 사용되어 영상을 얻는데 응용되고 있으며, 레이저 가공 시 초점위치를 제어하는데 응용되고 있다.^[1,2] 하지만 레이저를 이용한 가공 장비에 공초점 광학계를 추가적으로 설치하는데 있어서 가공 장비의 공간적인 제약으로 인하여 광학계를 정렬하는데 어려움이 있다.

본 연구에서는 이러한 공간적인 제약을 해소하기 위하여 파이버와 공초점 광학모듈을 이용한 파이버 자동 초점 제어 장치를

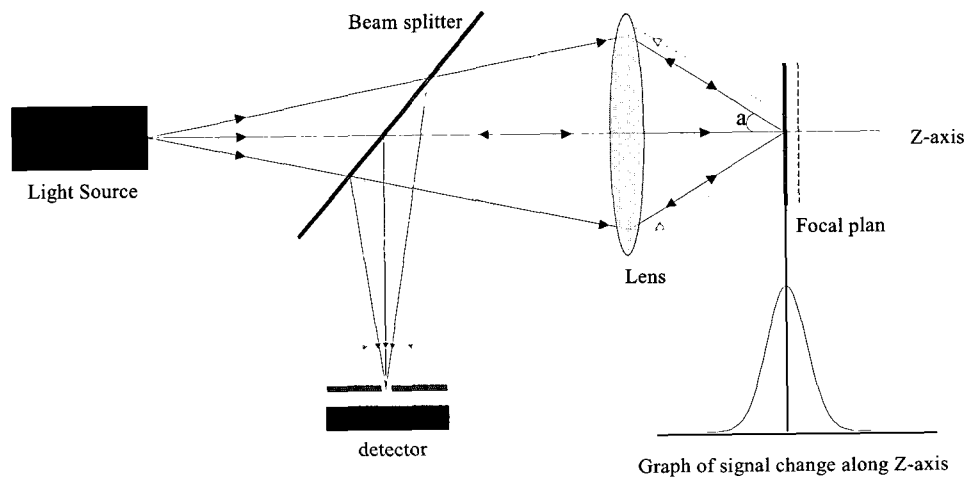


Fig. 1 Schematic of Confocal optic system

설계하여 성능 및 특성에 관하여 연구하였다.

2. 본 론

Fig. 2는 실험에 사용된 파이버를 이용한 자동 초점 제어 장치의 구성도를 보여주고 있고 이 장치의 운용개념은 다음과 같다. LD(Laser Diode, 780nm)에서 나오는 수평 편광 된 레이저 빔은 PBS(Polarization Beam Splitter)를 통과하여 광섬유로 입사된다. 광섬유를 통과한 레이저 빔은 $\lambda/4$ 판을 지나 원편광으로 바뀌고, 스테이지에 연결된 대물렌즈에서 집광되어 시료 표면에 도달하게 된다. 시료 표면에서 반사된 레이저 빔은 다시 한 번 대물렌즈와 $\lambda/4$ 판을 통과 하면서 수직편광으로 바뀌고, 광섬유를 통과한 후 PBS에서 반사되어 APD (Avalanche Photo Detector)로 입사된다. APD에 입사된 아날로그 전압신호는 ADC (Analog Digital Converter)에서 디지털 전압신호로 바뀌어 컴퓨터 내부에 파일로 저장된다.

파이버를 이용한 자동 초점 제어 장치에서는 시료 표면에 초점이 맺히면 반사된 빔은 파이버 코어에 초점이 맺히게 되고, 시료에 초점이 맺히지 않으면 반사된 빔 역시 파이버 코어에 초점이 맺히지 않고 코어 크기보다 더 크게 되며 빔의 일부가 코어로 입사되지 못하게 되어 결국 APD에 입사되

는 빔의 강도가 낮아지게 된다. 즉, 파이버는 공초점 광학계의 편 환 역할을 하여 입사 빔을 자르게 되고 이로 인하여 초점을 기준으로 대칭적인 강도 분포를 만들게 된다.

실험에 사용된 광원은 출력이 4mW인 780nm의 LD(Laser Diode)이고 광 분할기로 PBS를 사용하였고 빔의 편광 방향을 바꾸기 위해서 $\lambda/4$ 판(waveplate)을 사용하였다. 광파이버는 0.45NA에 코어(Core)의 크기가 $5.3 \pm 0.5\mu\text{m}$ 인 FC(Fiber Channel) 형태의 편광유지 단일 모드 광섬유(Single Mode Polarization Maintaining Fiber)를 사용하였다. 시료 표면에 광을 집광하기 위해 초점 거리가 40mm, 반경이 5mm인 355nm 파장용 대물렌즈를 사용하였다. 반사 시료로는 반사율이 좋은 금 코팅된 거울과 실제 가공에 사용되는 패턴이 없는 실리콘 웨이퍼를 사용하였다. LD로 찾은 초점 위치와 실제 가공시 초점 위치를 비교하기 위하여 가공용 레이저로 파장이 355nm인 DPSS 레이저를 사용하여 출력을 2.5W(41.7 μJ @60KHz)로 설정하여 100mm/s의 가공 속도로 패턴이 없는 웨이퍼를 가공하였다. 광 검출기로는 신호 증폭률이 좋은 APD를 사용하였다. 광 검출기에 들어온 레이저 빔의 강도를 정량적으로 분석하기 위하여 8051 보드를 사용하여 신호의 분석회로를 제작하였다. Z축 스테이지는 대물렌즈를 상하로 움직이며 최대 스캔 범위는 150mm이고 스테이지의 분해능은 1 μm 이다. Z축 스테이지 제어와 데이터 획득 및 분석 프로그램은 C와 C++ 프로그램 언어를 이용하여 직접 프로그래밍 하였다.

Table 1은 Z축 스캔 범위에 따른 샘플링 분해능의 관계를 나타낸다. 데이터를 획득하고 분석하는 제어보드에 사용된 RAM의

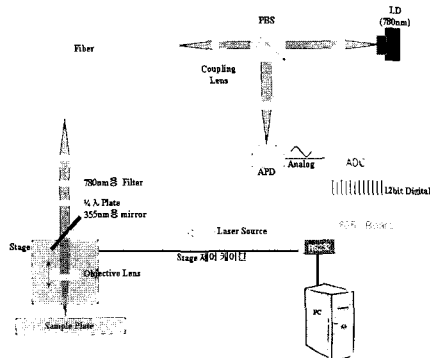


Fig. 2 Block diagram of Auto-Focusing Control System

Table 1 Auto-Focusing Sampling Resolution

Stage Range	2mm	10mm	20mm	40mm
Sampling Resolution	1 μm	5 μm	10 μm	20 μm

용량을 고려하여 설정된 Z축 범위를 1회 스캔하여 얻을 수 있는 데이터의 수를 2000개로 설정하였기 때문에 Z축 스캔 범위를 2mm로 설정하여 측정하면 스테이지가 1 μ m이동할 때마다 한 개의 데이터를 얻게 되고 20mm의 범위를 설정하여 측정하면 10 μ m마다 한 개의 데이터를 얻게 된다. 따라서 Z축 스캔 범위에 따라 자동 초점 조절 장치의 분해능이 조절되므로 스캔 범위를 알맞게 조절하여야 한다.^[2]

3. 실험 방법

본 연구에서는 LD를 이용하여 실험에 사용된 공초점 광학계의 타당성 검증 시험을 수행하였고, 이 광학계를 공간적인 제약 없이 레이저 가공 장비에 장착하기 위하여 파이버를 이용해 공초점 광학계를 구성하였다. 이렇게 구성된 파이버 자동 초점 제어 장치의 타당성 및 성능을 검증하기 위하여 LD와 UV 레이저를 사용하였다.

Fig. 2와 같이 파이버를 이용한 자동 초점 장치를 구성하여 반사율이 좋은 금 코팅된 반사거울에 780nm의 레이저 빔을 조사하여 z축 거리 변화에 따라 대칭적인 분포를 갖는 반사 빔의 강도를 확인하였고, 이러한 실험을 반복 수행하여 z축 거리 변화에 따른 반사 빔의 강도 분포 및 초점위치의 재현성을 확인하였다. 시료를 실제 가공에 사용되는 패턴이 없는 실리콘 웨이퍼로 교체하여 LD를 이용해 동일 실험을 수행하였고 실험 결과 동일 위치에서 레이저 빔의 강도가 가장 강한 것을 확인 하였다. 이후 파장이 355nm 인 UV 레이저 빔을 동일 광학계에 설치하여 LD에서 구한 초점 위치를 기준으로 $\pm 400\mu$ m의 범위를 20 μ m 씩 변화시켜가면서 UV 레이저로 패턴이 없는 실리콘 웨이퍼를 100mm/s의 속도로 가공 하였다. 가공된 웨이퍼의 가공 깊이를 측정하여 가장 깊게 가공된 위치와 LD를 이용해 구한

초점 위치를 비교하여 거리 차이를 계산하였고 이 거리만큼 LD를 이용해 찾은 z축 초점 위치를 보정해 주었다. LD와 UV의 초점 위치의 거리차이 값이 매번 일정한 것을 확인하기 위하여 위 과정을 반복 수행하였고, 보정된 z축 위치에서 웨이퍼를 가공하여 가공 깊이가 일정한 값을 유지하는 것을 확인하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 3은 공초점 광학계와 LD를 사용하여 금 코팅 거울에서 반사되는 레이저 빔을 PD(Photo Diode)를 이용해 오실로스코프

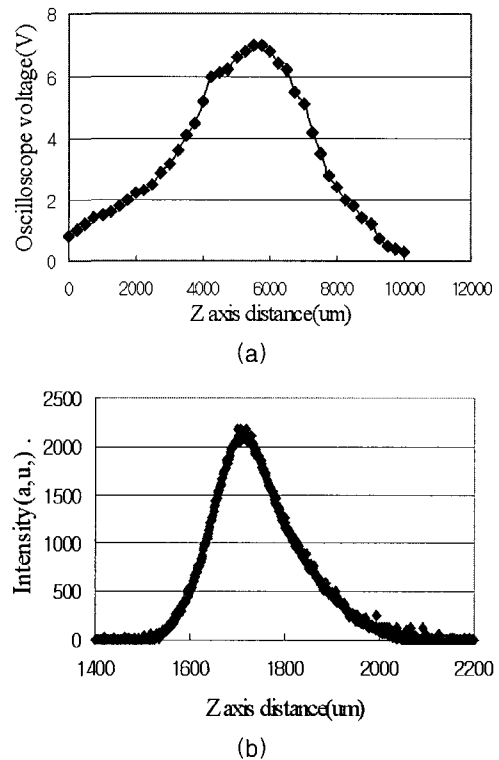


Fig. 3 Voltage variation of PD & Oscilloscope (a) and intensity variation of APD & analysis board(b) of LD beam reflected from surface of gold coating mirror along z axis distance, respectively

에서 측정된 그래프(a)와 APD(Avalanche Photo Detector)를 이용해 직접 제작한 데이터 분석 보드에서 측정된 그래프(b)를 나타낸다. Fig. 3의 (a)는 Z축 스캔 범위를 10mm로 설정하여 stepping 모터로 Z위치를 250 μm 씩 변화하면서 위치에 따른 빔의 강도를 측정된 그래프이다. 그래프의 모양은 전체적으로 중앙을 기준으로 대칭적인 형태를 보이고 있고 초점 부근인 중앙에서는 대칭성이 더욱 뛰어난 것을 알 수 있다. PD에 입사되는 레이저 빔의 강도가 낮기 때문에 빔의 강도를 증폭하기 위해서 APD와 데이터 분석 보드를 사용하였다. Fig. 3의 (b)는 초점 부근에서 z축 스캔 범위를 2mm로 설정하여 stepping 모터로 Z위치를 1 μm 씩 변화하면서 위치에 따른 빔의 강도를 측정된 그래프이다. PD와 오실로 스코프에서 측정된 데이터에 비해 빔의 강도와 분해능이 매우 우수해진 것을 알 수 있다. 초점 부근에서는 강도 분포가 대칭성을 이루지만, 초점을 기준으로 오른쪽 강도 분포의 폭이 더 넓게 보이는데 이것은 실험에 사용된 광학계의 정렬(align)이 완벽하게 이루어지지 않았기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다.

Fig. 4는 파이버를 이용한 공초점 광학계와 LD를 사용하여 금 코팅 거울과 패턴이 없는 실리콘 웨이퍼 표면에서 반사되는 레이저 빔의 강도를 초점 위치를 기준으로 $\pm 20\mu\text{m}$ 씩 변화하면서 측정된 데이터를 보여주고 있다. 초점 위치는 실리콘 웨이퍼와 금 코팅 거울 모두 일치하는 것을 알 수 있고, 금 코팅 거울의 반사율이 실리콘 웨이퍼의 반사율보다 더 높기 때문에 같은 위치에서 빔의 강도가 차이를 보이고 있다. 또한 금 코팅 거울은 검출기로 들어오는 레이저 빔의 강도가 초점을 기준으로 대칭적인 가우시안 분포를 보이는 반면에 실리콘 웨이퍼의 경우에는 대칭적인 가우시안 분포를 보이지 않는데 이것은 레이저 빔이 반사되

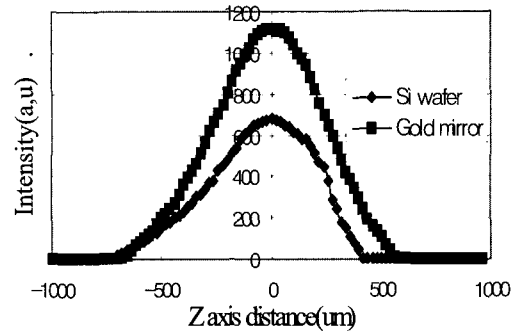


Fig. 4 Intensity variation of LD beam reflected from surface of Si bare wafer and gold coating mirror according to z axis distance, respectively.

는 웨이퍼의 표면이 금 코팅 거울 보다 매끄럽지 않아 초점 위치를 기준으로 z축을 \pm 방향으로 변화시킴에 따라 웨이퍼 표면에서 반사되어 집광렌즈로 되돌아가는 레이저 빔의 양이 차이가 나기 때문인 것으로 판단된다.

결과적으로, 본 실험에서 제작하여 사용한 파이버 공초점 광학계의 성능은 Fig. 4에서 보이는 결과를 통해 안정하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 파이버 공초점 광학계를 이용하여 구한 초점 위치가 실제 가공 장치의 초점 위치와 일치하는지 아니면 얼마나 떨어져 있는지를 확인하기 위하여 LD(780nm)를 사용하여 패턴이 없는 실리콘 웨이퍼에서 z축을 $\pm 20\mu\text{m}$ 씩 변화 시켜가며 측정된 반사

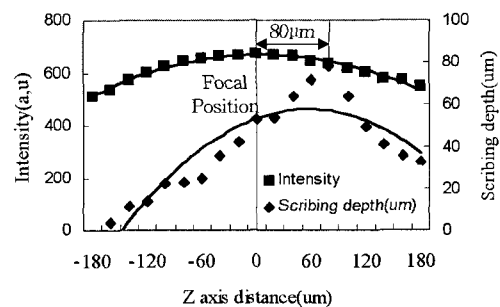


Fig. 5 Comparison between intensity distribution of reflected LD and scribing depth along z-axis

된 레이저 빔의 강도와 그 초점 위치에서 $\pm 20\mu\text{m}$ 씩 변화 시켜가며 UV 355nm의 레이저를 이용하여 2.5W(41.7 μJ , @60KHz)의 출력으로 두께가 80 μm 인 실리콘 웨이퍼를 100 mm/s의 속도로 가공하여 가공 깊이를 측정 한 그래프이다. Fig. 6은 LD로 구한 초점 위치에서 집광렌즈를 20 μm 씩 내려가며 355nm의 레이저로 가공한 결과를 보여주고 있으며, 실제 가공 깊이는 80 μm 떨어진 곳에서 제일 깊게 측정 되었다.

Fig. 5와 6에서 보는 바와 같이 355nm의 레이저를 이용하여 실제로 가공하여 구한 초점 위치와 LD를 이용하여 구한 초점 위치가 약 80 μm 의 차이를 보이고 있는데 이것은 동일 광학계를 사용하더라도 레이저 파장이 바뀌면 색수차에 의해 초점 위치가 변화하고 파이버 자동 초점 제어장치에 사용된 레이저 및 광학계와 레이저 가공에 사용된 레이저 및 광학계의 퍼짐(divergence)이 다르기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 6에서 가공 깊이가 초점 위치를 기준으로 좌우가 대칭적이지 않은 것은 광학계가 완벽하게 정렬(aligned)되지 않은 것과 가공 샘플이 완전히 평평하게 놓여 있지 않았기 때문에 깊이의 차이를 보이는 것으로 판단된다. 위 과정을 반복적으로 수행하여 LD로 구한 초점 위치와 실제 가공으로 구한 초점 위치가 80 μm 의 차이를 갖는 것을 확인 하였다.

Fig. 7은 LD를 이용하여 파이버 자동 초점 장치로 초점을 찾은 후 렌즈의 위치를

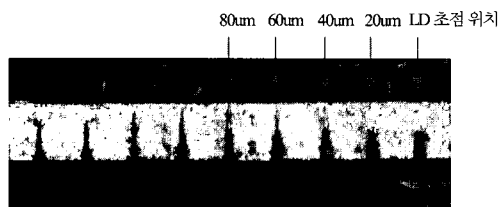


Fig. 6 Scribing depths by using 355nm laser decreasing 20 μm for each along z-axis at LD focal position

80 μm 아래로 이동하여 패턴이 없는 웨이퍼를 UV(355nm) 레이저로 1W(16.7 μJ @60KHz)에서 100mm/s의 속도로 가공하는 과정을 50번 수행하여 각각의 가공 깊이를 측정 한 결과를 보여주고 있다. 가공 깊이의 평균치는 29.5 μm 이고 표준 편차는 2.45 μm 로 8.3% 이내의 오차를 나타내고 있다. 이러한 오차의 원인으로서는 렌즈를 움직이는 Z축 스테이지의 반복 위치 정밀도와 가공 시 발생하는 진동에 의한 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 파이버 공초점법을 이용하여 레이저 빔의 자동 초점 장치에 관한 연구를 수행하였다. 레이저 다이오드를 이용하여 반사율이 좋은 금 코팅 거울에서 반사되는 레이저 빔의 강도를 측정하여 가우시안 형태임을 확인하였고, 시료를 실리콘 웨이퍼로 교체하여 동일 위치에서 초점이 맺히는 것을 확인 하여 설치한 광학계를 검증 하였다. 초점 위치에서 355nm 파장의 레이저를 이용하여 패턴이 없는 실리콘 웨이퍼를 가공하여 초점 위치가 80 μm 가 이동한 것을 확인 하였다. 이러한 것은 자동 초점 제어 장치에 사용된 LD 및 광학계와 가공 광원으로 사용된 레이저 및 광학계의 파장 및 빔의 퍼짐이 달라 발생된 것으로 여겨진다.

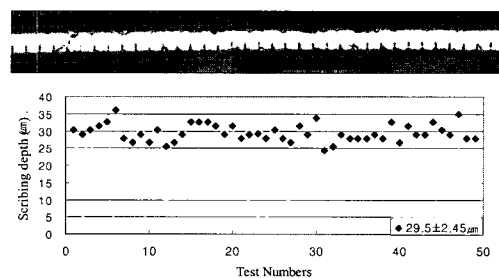


Fig. 7 Scribing depths by using 355nm laser at position shifted by 80 μm along z-axis from LD focal position.

이러한 위치 차이를 보정하여 웨이퍼를 가공한 결과 가공 깊이가 $\pm 2.5\mu\text{m}$ 의 표준 편차를 보였으며, 이를 통해 본 연구에서 제작하여 사용한 파이버 공초점법을 이용한 레이저 빔 자동 초점 장치 성능을 확인 할 수 있었다.

scanning optical microscope using single-mode fiber for signal detection," Appl. Opt., vol. 30, no. 16, pp. 2143-2150(1991)

6. 참고문헌

1. 김종배, 배한성, 김경호, 문성욱, 남기중, 권남익, "공초점 현미경과 원자 현미경을 이용한 가공된 시료 표면의 형상 측정", 한국정밀공학회 제23권 제4호, pp.52-5 (2006).
2. 김선흠, 배한성, 홍윤석, 문성욱, 김경호, 김종배, 남기중 "레이저 가공을 위한 자동 초점 제어 시스템에 관한 연구", 한국정밀공학회 추계학술대회논문집, pp.431~432 (2006).
3. 이호재, 이성윤, 공인복, 김승우, "고배율 현미경의 자동초점장치" 한국정밀공학회 추계학술대회논문집, pp.255~260(1994)
4. 김승우, 박정재, 이호재, "공초점 원리와 광섬유 광원 변조를 이용한 무한보정 현미경 자동초점", 한국광학회지 제15권 제6호, pp.583~589(2004)
5. Kim, J. B., Ryu, K. H., Park, D. S., Nho, J. E. and Kwon, Namic, "Scanning confocal microscope by oscillation of an optical fiber", Journal of the Optical Society of Korea, Vol. 14, No. 1, pp.80-84(2003)
6. Wilson, T. ed., "Confocal Microscopy," Academic Press, London(1990)
7. M R. Harris, "Scanning confocal microscope including a single fiber for transmitting light to and receiving light from an object", U.S Patent 5120953(1992)
8. S. Kimura, and T. Wilson, "Confocal