

◆ 특집 ◆ 첨단레이저 응용 미세가공기술

레이저 미세가공 공정 요소 모니터링 기술

Laser Micro-machining Process-monitoring Technologies

손현기¹, 이재훈^{1,✉}, 한재원², 김호상³
Hyonkee Sohn¹, Jae Hoon Lee^{1,✉}, Jae Won Hahn² and Ho Sang Kim³

1 한국기계연구원 나노융합·생산시스템연구본부 (Korea Institute of Machinery & Materials)

2 연세대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Yonsei Univ.)

3 고등기술연구원 (Institute for Advanced Engineering)

✉ Corresponding author: jaholee@kimm.re.kr, Tel: 042-868-7471

Manuscript received: 2009.10.30 / Revised: 2009.11.25 / Accepted: 2009.12.21

In order to achieve and maintain dimensional accuracy in laser micro-machining, dominant parameters such as laser power and laser focus position need to be monitored and controlled real time. Also, in order to selectively machine multi-layered materials, the material being presently machined need to be recognized. This paper presents an auto-focusing (AF) module to keep laser focus on a large-area surface; a real-time laser power stabilizing module based on optical attenuation; and a laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) module. With these monitoring modules, position error in laser focus on a 4" silicon wafer was kept below 4 μ m, initially 51 μ m, and laser power stability of a UV laser source was improved from 1.6% to 0.3%. Also, the material transition from polyimide to copper in machining of FCCL (flexible copper clad laminate) was successfully observed.

Key Words: Auto-focusing (자동초점정렬), Laser Power Stabilization (레이저 출력 안정화), Laser Induced Breakdown Spectroscopy (레이저 유도 분광)

1. 서론

최근 레이저 미세가공기술은 반도체, 디스플레이, 휴대폰 등 다양한 첨단 전자부품 및 제품에 활발하게 적용되고 있으며, 그 응용 분야는 더욱 확대될 것으로 전망된다. 고정세화/고집적화/대면적화로 대변되는 첨단산업분야에서는 가공선폭(line width)이 수 마이크론 또는 서브 마이크론급으로 미세화되고 있으며, 이종의 소재가 적층된 다층기판(multi-layered substrate)이 널리 적용되고 있다. 또한 생산성 향상을 통한 원가 절감을 위해 가공기판의 면적이 넓어지고 있다.^{1,4}

단파장/고출력 레이저 발전기의 출현과 레이저 미세가공기술의 발달로 첨단산업분야의 최신 추세에 대응하고 있으나, 장시간 가공 시 발생하는 레이저 발전기(source)의 출력(power) 변화 및 대면적 가공 시 발생하는 레이저 초점(focus) 위치 오차에 의한 치수정밀도 저하, 특정 소재의 선별적 가공 등은 가공 품질을 유지하기 위해서 해결되어야 하는 기술적 과제들이다.

이러한 문제의 해결을 위해서 레이저 발전기, 레이저 스캐너 등 미세가공에 사용되는 하드웨어의 성능을 향상시키기 위한 지속적인 노력과 더불어 미세가공공정의 요소를 모니터링하는 기술의

개발이 필수적이다.

본 논문에서는 대면적 기관의 미세가공 시 레이저 초점의 위치를 유지하기 위한 자동초점정렬(AF; auto-focusing)기술, 실시간으로 레이저 발전기의 출력을 안정적으로 유지하고 조절하는 레이저 출력 안정화(laser power stabilization) 기술, 다층 기관을 선별적으로 가공하기 위한 분광분석(LIBS; laser-induced breakdown spectroscopy) 기술을 개발하고 모듈화하여 레이저 미세가공 플랫폼(platform)에 장착하고 그 성능을 시험하였다.

2. 자동초점정렬

레이저 미세가공에서 치수정밀도를 유지하기 위해서는 가공 중에 레이저 빔의 초점과 기관의 가공표면 사이의 위치 오차를 최소화 해야 한다. 즉, 레이저 빔의 초점이 항상 가공표면에 위치하도록 해야 한다. 실제 가공 시에는 레이저 빔의 이송 정밀도 오차, 기관의 초기 고정 오차, 기관의 표면 평탄도(flatness) 오차 등에 의해 가공 중에 레이저 빔의 초점과 기관의 가공표면 사이의 위치 오차는 계속적으로 변화하게 된다. 이 위치 오차는 대면적 기관을 가공하는 경우 더욱 증가하게 된다.

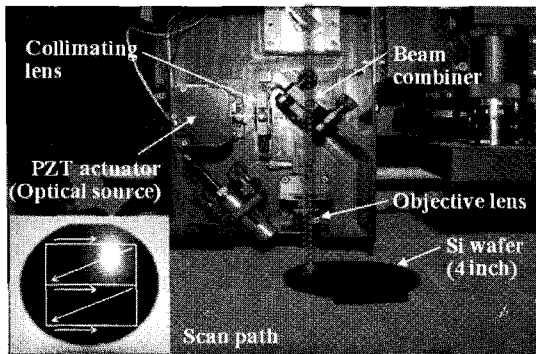


Fig. 1 Auto-focusing module installed to laser micro-machining platform

미세가공 중 가공표면에 레이저 빔의 초점이 위치하도록 조절하기 위해 공초점(confocal) 원리를 기반으로 한 자동초점조절 모듈을 개발하였다. Fig. 1 에 레이저 미세가공 플랫폼에 장착된 자동초점정렬 모듈의 내부 구조를 나타내었다. 자동초점정렬은 레이저 빔 집속기구의 위치를 조절하는 것이

므로 objective 렌즈, 레이저 스캐너 등과 함께 Z 축에 장착되며, Z 축의 최대 허용하중을 초과하지 않도록 모듈을 구성하는 광학부품 및 경통의 무게를 최소화하였다(-4.9kg). 자동초점조절 모듈을 구성하는 부품의 사양은 Table 1 에 정리하였다.

Table 1 Specifications for optical components of auto-focusing module

Laser source	635nm	Actuator	Stroke: 100mm
Photo detector	350-1100nm	Beam combiner	T > 99.5% R > 99.5%
Optical fiber	Core: 4.3mm NA: 0.12	Collimating lens	F: 14.5mm

플랫폼에 장착된 자동초점정렬 모듈은 광 파이버(optical fiber)로부터 방출되는 측정광(632nm)을 압전 액츄에이터(piezo-actuator)를 이용하여 변조하고, 가공표면으로부터 반사되는 공초점 신호를 측정하여 가공표면과 초점 사이의 상대 위치를 검출하게 된다.⁵ 기관의 표면 상태에 따라 측정광의 반사도가 변화하게 되므로, 가공표면의 한 지점에서 Z 축을 이송하면서 기관 표면으로부터 반사되는 측정광량을 측정하여, Z 축의 위치에 따른 측정광량의 관계 그래프를 구하고, 그래프의 선형구간 내에서 초점을 정렬하게 된다. 이 선형구간을 반치폭(FWHM; full width half maximum)이라고 한다. 검출된 상대 위치 분포를 ECT(error compensation table) 형태로 변환하여 스테이지 컨트롤러에 입력하면 가공 시 상대 위치를 고려하여 Z 축이 이송하게 되어 레이저 빔의 초점을 가공표면에 유지할 수 있게 된다.

레이저 미세 드릴링 공정에 시편으로 사용되는 4 인치 실리콘(Si) 웨이퍼에 대해 자동초점정렬을 수행하였다. 먼저 실리콘 웨이퍼에 대한 반치폭을 구하였다. 측정된 반치폭은 $\pm 70\mu\text{m}$ 로 $1\mu\text{m}$ 이송 시 0.089V 의 전압신호가 발생하였다. 측정 조건은 Table 2 에 정리하였다.

Table 2 Conditions for measuring FWHM (full width half maximum)

Laser power	Modulation frequency	Amplitude
2.0mW	50Hz	10 μm

Fig. 1 에서 보는 바와 같이, 30mm 간격으로 각각 길이 60mm 인 3 라인을 스캔하여 실리콘 웨이퍼의 초기 고정상태에서 위치오차 분포를 구하고, 자동초점정렬을 수행한 후, 위치오차 분포를 구하여 Fig. 2 에 나타내었다. 측정된 라인의 데이터를 보간(interpolation)하여 나타내면, Fig. 3 에서 보는 바와 같이 자동초점정렬 이전에 레이저 빔의 초점과 실리콘 웨이퍼의 가공표면 사이의 최대 위치오차는 51 μ m 이며, 자동초점정렬 후 4 μ m 로 감소된 것을 볼 수 있다.

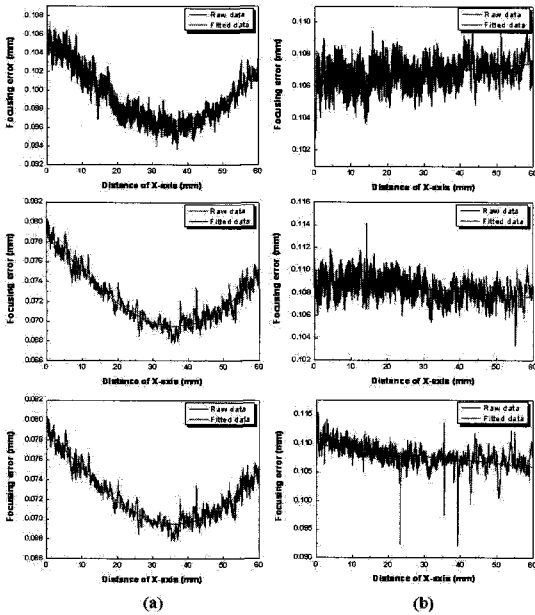


Fig. 2 Distribution of focusing error of laser beam on Si wafer surface: (a) before auto-focusing, (b) after auto-focusing

자동초점정렬 모듈의 성능을 향상시키기 위한 가장 직접적인 방법은 Z 축의 정밀도를 향상시키는 것이다. 또한, Z 축에 부착되는 광학 기구의 중량을 최소화하여 자중에 의한 처짐을 최소화할 필요가 있으며, Z 축 부하 중량의 평형의 유지하는 것도 중요하다. 자동초점정렬 모듈을 적용하는 경우 개발하고자 하는 시스템의 구조 및 사양에 최적화하여 모듈의 구조 및 구성 광학 부품을 선정하여야 한다.

3. 레이저 출력 안정화

레이저 발진기의 출력변화는 가공된 시편의 치

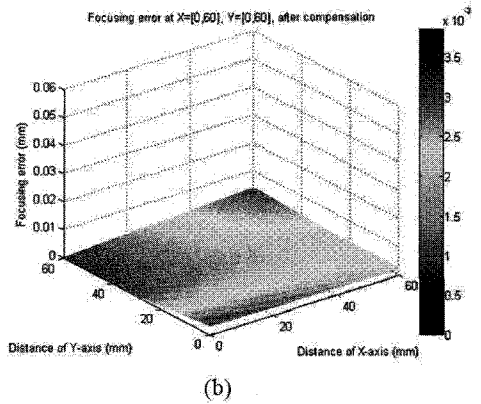
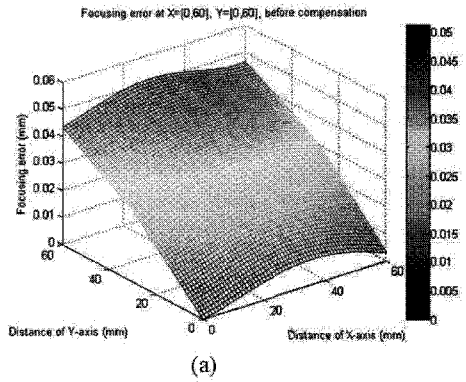


Fig. 3 Maximum focusing error: (a) before auto-focusing, 51 μ m, (b) after auto-focusing, 4 μ m

수정밀도에 직접적인 영향을 미치게 된다. 최근 출시되는 단파장/고출력 레이저 발진기의 출력 안정도는 대개의 경우 2%이하이지만, 레이저 미세가공의 경우 2%이하의 출력 변화량도 무시할 수 없다. 또한 장시간 가공 시 레이저 발진기의 출력 저하가 발생할 수 있으므로, 출력을 안정적으로 유지하는 것이 매우 중요하다.

최근 미세가공 분야에서는 폴리머, 금속 등 소재에 흡수율(absorptivity)이 높고, 레이저 빔의 집속율이 높은 자외선 파장의 레이저 빔을 발진(radiation)하는 고출력 UV(355nm) 레이저 발진기가 주로 사용되고 있다. 이러한 발진기에서는 발진되는 레이저 빔은 편광(polarization)이 되어 있으므로, 광학 감쇄기(optical attenuator)를 이용하여 출력을 조절할 수 있다. 광학 감쇄기는 반파장판($\lambda/2$ plate)과 선형 편광자(linear polarizer)로 구성되어 있으며, 반파장판을 이용하여 레이저 빔의 편광 각도를 변화시킨 후 선형 편광자를 통과시키면 레이저 빔의 출력을 조절할 수 있다.

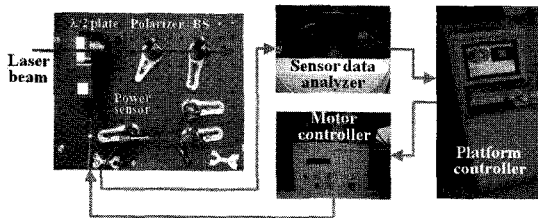


Fig. 4 Laser power stabilizing module

광학 감쇄기를 기반으로 제작된 레이저 출력 안정화 모듈을 Fig. 4 에 나타내었다. 선형 편광자 다음에 분광기(beam splitter)를 설치하여 레이저 출력의 약 1%를 분기하여 그 값은 변화를 감지하고, PID 제어를 통해 반파장판의 각도를 조절하여 레이저 출력을 조절한다.⁶ 사용된 분광기의 출력 분기율은 99:1 이며, 반파장판의 각도를 조절하는 회전모터의 분해능 0.02°이다.

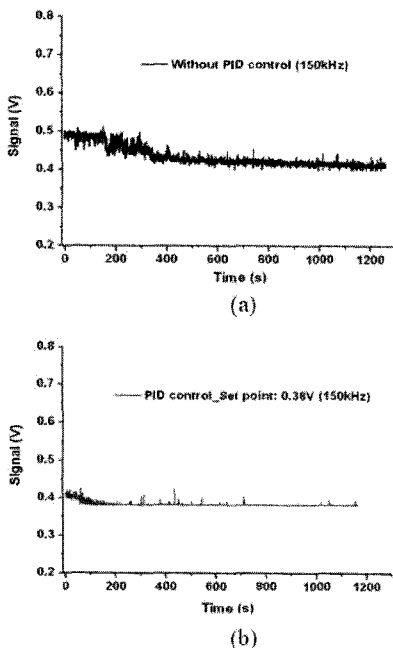


Fig. 5 Laser power stability (RMS): (a) without PID control, 1.6% (b) with PID control, 0.3%

UV 레이저 발진기(최대 평균출력 10W, 파장 355nm)에 대해서 제작된 레이저 출력 안정화 모듈의 성능을 테스트하였다. 발진기의 펄스 반복률(repetition rate)을 150kHz 에 설정하고 출력 변화를 30 분 동안 측정하였으며, 측정결과를 Fig. 5 에 나타내었다. 레이저 발진기의 출력 안정도는 1.6%로

측정되었으며, 이때 발진 초기에 나타나는 출력이 불안정한 구간은 분석 시 제외하였다. 동일한 조건에서 출력 안정화 모듈을 제어하면서 출력 안정도를 측정하였으며, 측정된 출력 안정도는 0.3%로 크게 향상되었다.

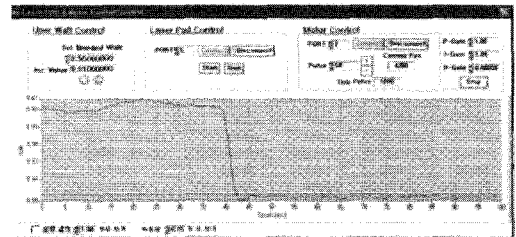


Fig. 6 Laser power change using laser power stabilization module

Fig. 6에서 보는 바와 같이 레이저 출력 안정화 모듈을 활용하여 레이저 발진기의 출력 조절도 가능하다. 최근 출시되는 UV 레이저 발진기의 경우가공 시 레이저 빔의 발진을 TTL 신호로 제어하는 경우가 대부분이다. 이 경우 레이저 출력 안정화 모듈에 입사하는 레이저 빔의 출력 변화율이 출력 조절을 위해 반파장판을 회전시키는 회전모터의 응답속도보다 빨라져서 출력 안정화에 시간 지연이 발생하게 되어 출력 안정도가 오히려 떨어질 수 있으므로, 레이저 출력 안정화 모듈 이후에 레이저 빔 셔터(shutter)를 설치하여 사용하는 것이 레이저 출력 안정화 측면에서 더욱 바람직하다.

4. 레이저 유도 분광

휴대폰 등 각종 모바일 기기를 포함하여 대부분의 전자제품에 필수적으로 사용되는 연성인쇄회로기판(FPCB; flexible printed circuit board)은 전자제품의 고성능화/소형화 추세에 따라 다층화/미세화되고 있다. FPCB 는 구리와 폴리이미드(polyimide)를 기본으로 여러 가지 재료로 구성된 다층 복합 소재이며, 회로 구성을 위한 드릴링 공정 또는 패터닝 공정에서 특정 층까지 선택적으로 가공하게 된다. 이때 LIBS 기법을 활용하여 실시간으로 현재 가공 되고 있는 소재층을 파악할 수 있다.

LIBS 기법은 원자분광 분석법과 발광 분석법을 기본으로 하며, 시료 표면에서 발생하는 플라즈마 상태의 원자나 이온에서 발산되는 빛을 분광 분석한다. 시료에 따라 분광특성피크(characteristic peak)

의 파장대가 구별이 되므로, 다층 소재의 가공 시 가공 층의 소재가 변경이 되는 시점, 즉 경계면을 판별할 수 있다.⁷ 일반적으로 금속 재료의 경우 각 금속의 고유 분광 스펙트럼이 존재하며, 폴리머 재료의 경우는 탄소를 중심으로 수소, 산소, 질소 등의 조성비에 따라 분광 스펙트럼의 크기가 달라 지므로 이를 이용하여 종류를 판별할 수 있다.



Fig. 7 FCCL (flexible copper clad laminates) and FPCB samples

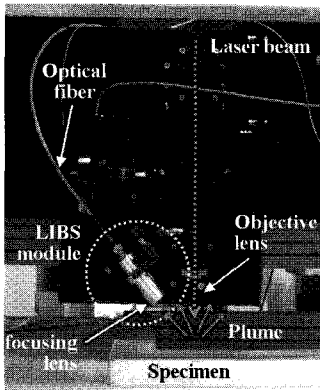
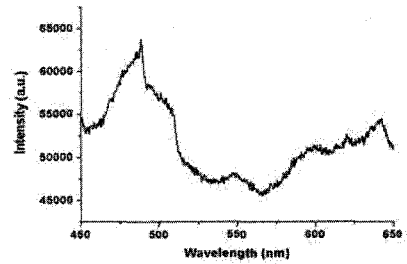


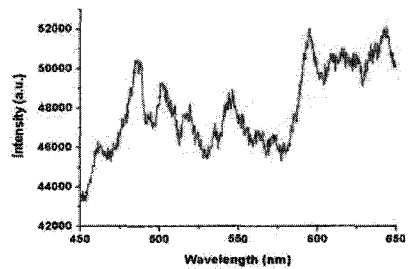
Fig. 8 LIBS module installed to laser micro-machining platform

레이저 미세가공 플랫폼에 장착된 LIBS 모듈은 초점렌즈, 수광용 광파이버, 경통 등으로 구성되어 있으며, Fig. 8 에 나타난 것과 같이, 경통의 양쪽 끝에 초점렌즈와 광파이버가 고정된다. 사용된 광파이버는 다층 모드로 지름이 200 μ m 이며, NA 는 0.22 이다. 광파이버의 반대편 끝에 연결된 분광 분석기의 측정 파장범위는 280-780nm 이다.

UV(355nm) 레이저 빔을 FPCB(구리+폴리이미드)에 조사하여 LIBS 분석을 수행하였다. Fig. 9 에서 나타난 것과 같이, 폴리이미드층 가공 시에는 폴리머의 특성 피크인 C₂ swan band 가 나타나는 것을 관찰할 수 있었다. 플랫폼에 사용된 소형 분광 분석기의 분해능이 플라즈마 발생 주기보다 길어서 적분형태로 결과를 수집하였기 때문에 구리층 가공 시 구리의 특성 피크는 600-700nm 사이에 섞여서 나타난 것을 볼 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 9 Characteristic peaks of FCCL: (a) polyimide and (b) copper

5. 결론

본 논문에서는 고정세/고밀도/대면적 부품 및 제품의 레이저 미세가공 시 치수정밀도를 유지하기 위한 자동초점정렬, 레이저 출력 안정화, 레이저 분광 분석 기술과 각각의 모듈을 개발하고, 레이저 미세가공 플랫폼에 적용하여 각 모듈의 성능을 테스트 하였다. 개발된 레이저 미세가공공정 모니터링 기술은 레이저 미세가공기의 가공 성능 향상 및 응용 분야 확대에 크게 기여할 수 있을 것이다.

후 기

본 논문은 지식경제부 “첨단레이저 응용 미세가공기술 개발” 과제(산업원천기술개발사업)의 지원으로 작성되었음.

참고문헌

1. Penwell, “Laser Focus World - Penwell survey,” 1998-2006.
2. Optech Consulting, www.optech.de
3. IPC, www.ipc.org

4. EIC, www.eic.re.kr
5. Kim, S., Lee, K., Kim, H. and Lee, K., "Feedback control of auto-focus system for micro-fabrication considering the characteristics of feed axis," Proc. of Korean Society of Laser Processing Spring Conference, pp. 102-107, 2007.
6. Ryu, H., Kwak, S., Kang, D., Kim, K. and Hahn, J., "Pulse laser power stabilization using PID control method," Proc. of Korean Society of Laser Processing Spring Conference, pp. 89-96, 2006,
7. Ryu, H., Kim, S. and Hahn, J., "Temporal process monitoring of flexible printed circuit board using laser induced breakdown spectroscopy," Proc. of Korean Society of Laser Processing Spring Conference, pp. 119-129, 2007.