

# 초고속 레이저를 이용한 박형기판 공정 기술

## Ultrafast laser processing of thin-wafer by utilizing photoinduced absorption

\*#정세재, 윤태오

\*#S. C. Jeoung(scjeoung@kriss.re.kr), T. O. Yoon  
한국표준과학연구원 전략기술연구부

Key words : fs-laser, micro-processing, Silicon thin wafer, photo-induced absorption, free carrier density

### 1. 서론

다양한 형태의 패키징 공정/제어의 정밀도 향상은 고품질의 전자소자와 MEMS/NEMS 구조물 및 이들의 퓨전디바이스 제작 등에서 매우 중요하다. 특히, 전자/통신용 소자의 전기적, 광학적, 기계적 특성의 고품질화는 더욱 더 좋은 특성의 미세공정에 대한 기술적인 발전을 요구하고 있다. 현재 소자의 양산공정에서의 다이몬드 칼날 혹은 톱날 등에 의한 기계적인 공정이나 비교적 긴 레이저 펄스를 기반으로 하는 레이저 공정 기술들은, 첨단 소재에 적용함에 있어서 기계적 혹은 물리/화학/광학적인 변형을 최소화 하면서, 공정 분해능 수준에 대한 기술적 진보가 이루어지지 않고 있다. 예를 들어 기계적인 공정에서는 공정 대상 물질의 경도 및 깨짐 성질의 증가에 따라 기계적인 손상으로부터 더 이상 자유롭지 못한 실정이며, 자외선 영역의 레이저를 기반으로 한 공정기술은 물질의 광학 특성에 손상을 주고 공정 대상 물질의 두께가 감소함에 따라 발생하는 열적-기계적 (thermo-mechanical) 과정에 의한 미세 균열 발생을 피할 수 있는 기술적인 진보가 아직 이루어지지 않은 실정이다. 또한 lithography 및 고에너지 입자 (전자 혹은 이온빔, 플라즈마 등) 기반 공정은 그 정밀도는 극히 뛰어나나, 높은 설치 및 유지비와 양산공정에서의 생산성 및 환경적인 측면에서 그 적용에 한계가 있다.

이상의 차세대 패키징 및 어셈블리공정, 특히 박형 기판의 다이싱 및 via-hole 형성 등 미세공정에 대한 기술적인 진보가 매우 시급한 실정이다. 기존의 다이아몬드 sawing 을 대표로 하는 기계적인 공정이 더 이상 적용이 가능하지 못한 두께인 80  $\mu\text{m}$  미만의 반도체 기판에 대한 기술적인 한계 극복을 위한 전혀 새로운 공정기술 및 장비 설계 및 생산기술에 대한 원천기술 확보가 당면해 있다.

그간 초고속 레이저 공정 기술은 그 자체의 고유의 장점에 비하여 충분한 레이저 출력을 이용하여 공정속도를 증가하기 위하여 필수적이고 적절한 증폭기술의 부재뿐만 아니라, 충분한 침투 출력을 갖는 레이저 펄스가 있더라도 공정 간에 피할 수 없는 공기 중에서 고차 비선형 효과에 의한 레이저 빔 특성의 변형 등에 내재된 문제점으로 인하여 공정품질에 직접적으로 영향을 주는 공정 단면을 제어할 수 있는 방안이 없었다. 한편 이상의 한계를 극복하는 새로운 기술의 선결조건은 반드시 열적 및 기계적 손상으로부터 자유로운 초고속 레이저 공정의 특성을 변함없이 유지하여야 한다는 것이다. 현재 초고속 레이저 기반 초미세 공정 및 가공 기술은 레이저 펄스 모양에 따른 원추형 혹은 V 자 홈으로 되는 한계를 극복하지 못하여 공정용 초고속레이저 에너지가 대부분 벽면의 효과에 의하여 많은 양이 손실되는 단점을 극복하지 못하였다. 그 한계를 극복하기 위하여서는 기존의 비교적 긴 펄스 레이저 공정에서 레이저 빔의 프로파일을 평탄하게 만드는 기술인 homogenizer 에서 일반적으로 채택되는 adaptive optics 를 채용하는 기술이 있어야 한다. 그러나 이 경우 본래의 초고속 레이저 펄스 폭 및 빔 특성이 완전히 변하기 때문에 적용이 불가능하기 때문이다. 특히 adaptive optics 를 적용하는 경우, 펄스 폭 증가에 의하여 기존의 비교적 긴 펄스폭 레이저 공정에서 문제를 야기하는 열적 변형이 공정 품질을

저하할 수 있기 때문에 적용이 어려웠다.

상기와 같은 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 초고속 레이저 기반 초미세 공정 및 가공 기술이 갖고있는 가공 단면에 대한 취약성을 나타내는 문제점을 개선할 수 있는 새로운 방법을 제안 하고자 하였다. 이러한 예로 본 연구에서는 물질내에 광유발 과도흡수를 [1] 유발함으로써 공정단면을 제어할 수 있는 새로운 공정법 및 공정 장치를 개발하였다.

### 2. 실험장치

본 연구에서 제안하는 레이저유발 과도흡수 유발을 통한 레이저 가공장치는 초고속 레이저 발전기와, 과도흡수에 의한 공정 제어 효과를 극대화 하기 위하여 레이저의 파장을 공정 대상 물질의 적절하게 제어하는 장치, 하나 이상의 레이저 빔을 시간에 따라 동기화하는 전자장치 혹은 광필레이 장치와, 상기 초고속 레이저 발전기에서 발생된 초고속 레이저빔 혹은 하나 이상의 다른 레이저 빔을 시간에 따른 동기화하여 초점을 공간적으로 동기화시켜 집속하는 집속광학계를 포함하여 이루어져 있다 (Fig. 1). 본 논문에서는 레이저 빔 하나를 이용하여 자체적으로 발생하는 과도흡수현상을 이용하여 실험 및 관찰 된 결과를 보여 주었다.

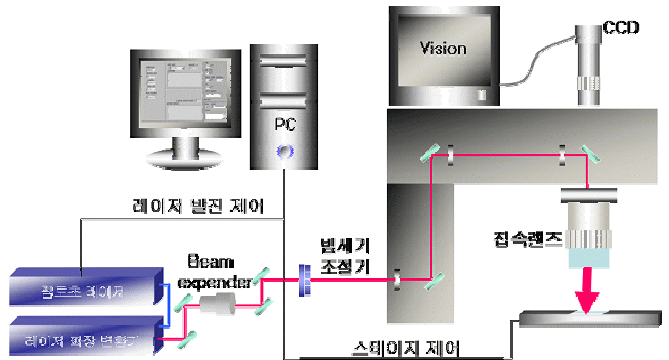


Fig. 1 Schematic Diagram to control the processed cross-section by utilizing photo-induced absorption

### 3. 결과 및 고찰

초점의 지름이 6  $\mu\text{m}$  보다 작은 고정밀 집속광학계를 사용하는 경우에도 대상 물체의 표면에 레이저 빔이 접촉하는 지점을 변경하여 표면에서의 레이저 빔 지름을 효과적으로 제어함으로써 공정 단면의 인위적인 조작이 가능하도록 레이저 플루언스에 대한 빔 프로파일을 갖도록 할 수도 있다. 예를 들어 그림 2 에서 보는 바와 같이 공정 폭이 커지는 현상은 레이저의 초점이 깊이에 따라 공정대상의 표면에서 레이저 effective spot 이 커지는 현상이다.

한편 표면상 레이저 spot 의 크기를 고정하고 레이저 파워를 조절한 경우에 대한 결과는 다음과 같다. 낮은 레이저 플루언스에서는 레이저 빔프로파일을 매우 흡사하게 묘사한 Gaussian 형태의 공정 단면을 보여주고 있다. 레이저

플루언스를 더욱 증가 시킨 경우에는 공정단면의 하부가 거의 평탄한 형태를 보여주고 있다. 더욱 높은 레이저 플루언스에서 공정 단면은 초점 중심에서의 공정 깊이에 비하여 주위에서의 공정 깊이가 더욱 깊어서 나타나는 형태를 실험적으로 보여주고 있다. 한편 이상의 실험적인 조건에 비하여 레이저를 집중하는 광학계를 변경하여 초점의 지름을 적게 하는 경우에는 초점 중심에서 관찰되던 특이한 공정 단면 형태를 실험적으로 관찰하기가 대단히 힘든 측면이 있다. 이는 이러한 매우 높은 레이저 플루언스의 경우, 광학적인 현상에 의한 레이저 공정과정 이외에도 열적 혹은 기계적인 충격 등 선형적인 광흡수에 의하여 유발되는 다른 동력학적인 측면이 동시에 일어나고 있음을 고려하여야 한다. 다시 말하여 이러한 매우 강하게 집중된 레이저 빔의 경우 유발되는, 예를 들어 shock wave 와 같은 기계적인 충격이 필수적으로 동반됨으로 초점 중심에 발생한 ablation 되지 않은 부분에 충격을 가하여 파괴하는 결과를 초래할 수 있음을 의미한다. 그러나 초점의 지름을 6  $\mu\text{m}$  보다 큰 집중 광학계를 적용하는 경우에는 대체적으로 이상의 기계적인 열적인 형상을 최소화하면서도 사출한 바와 같이 공정단면의 인위적인 제어를 아주 단순한 방법인 레이저 빔 플루언스 제어만으로 가능함이 매우 인상적이다.

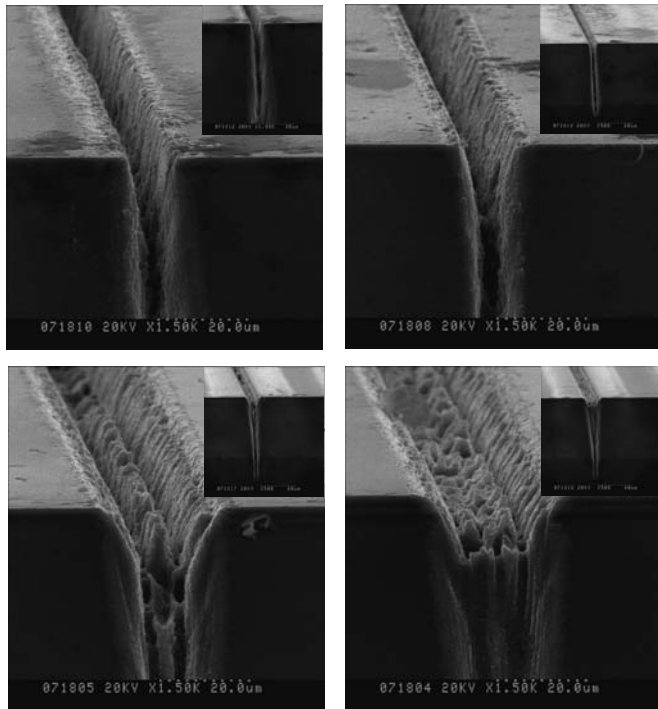


Fig.2 Control of Cross-sections of diced Silicon wafer with changing the focal depth

이상의 내용을 정리하면 간단하게 레이저 빔의 세기를 변화시킴으로써 적절한 레이저 조사조건에서 레이저 빔 자체에 의한 ablation depth profile 을 인위적으로 변화할 수 있음을 의미한다. 특히 레이저 빔의 특정한 세기 조건에서, 레이저 가공 단면이 원래의 레이저 빔프로파일인 Gaussian 형태에서 완전하게 벗어난 형태의 사각형의 모양을 갖도록 할 수도 있으며, 혹은 초점 중심에서는 ablation 이 거의 일어나지 않고 레이저 spot 의 주위에서만 ablation 이 이루어지도록 할 수도 있다. 특히 직사각형의 모양의 가공단면이 갖도록 하기 위하여 전통적으로 사용하였던 렌즈 조합 구성 등의 복잡하고 값비싼 방법인 beam homogenizer 를 전혀 사용하지 않고도 이를 구현할 수 있음은 매우 큰 기술적인 진보를 이룩하였음을 의미한다. 특히 NIR 영역인 1030 nm 에서의 레이저 공정이 갖고 있는 깊은 penetration depth 를 고려할 때 이상의 비선형 현상을 이용한 물질 내부의 3 차

원적인 공정 가능성 및 적용의 용이하다.

한편 이상의 비선형광학현상에 의한 공정 단면의 인위적인 제어는 일반적으로 단일광자 흡수가 상대적으로 큰 경우에는 그 제어가 그리 단순하지 않다. 이를 이해하기 위하여 선형적인 광 흡수율이 비교적 큰 800 nm 에서의 실리콘 기관의 초고속레이저 공정에 대하여 다음과 같은 설명이 가능하다. 매우 단순하게는 비선형 광학현상을 고려한 계산의 경우 실리콘 기관의 공정 단면의 레이저 플루언스 및 amplitude 의존성은 800 nm 와 1030 nm 에 대하여 큰 차이가 없다고 이해할 수 있다. 그러나 앞서 언급한 바와 같이 이상의 두 다른 파장의 초고속 레이저 공정 시 발생하는 자유 운반자밀도  $N_0$  는 두 경우가 약 4 배 이상 차이가 난다. 특히 비선형 광학현상을 고려한 두 다른 파장에서의 최대 공정 깊이가 800 nm 와 1030 nm 에 대하여 거의 동일함에도 불구하고 자유 운반자의 밀도는 800 nm 의 경우가 4 배 이상 높은 선형적인 흡수율이 높은 경우 자유 운반자 밀도가 매우 높다는 것을 매우 주목하여야 한다. 이러한 높은 레이저 조사에 따른 운반자 밀도 증가는 궁극적으로 실리콘내의 전자 전이를 통한 매우 큰 밀도의 포논이 생성됨을 의미한다. 높은 선형 흡수가 일어나는 800 nm 의 경우에 발생하는 높은 밀도의 포논 생성은 열적인 혹은 shock wave 와 같은 기계적인 손상 위험을 더욱 높리게 되고 이는 선형 및 비선형적인 광학적으로 야기된 공정 단면에 이상의 열적- 혹은 기계적인 부가적 손상이 발생하여 이론적으로 해석되는 공정단면을 더 이상 실험적으로 구현하기 어렵게 된다.

본 연구는 기존의 초고속레이저의 파장을 적절히 제어하여 공정 대상 물질의 비선형성을 차단 함으로써 공정 단면을 인위적으로 제어할 수 있도록 하는 초고속 레이저 공정 기술이다. 좀더 자세하게는 파장이 적절하게 구성된 초고속레이저를 대상 공정 물질에 조사함으로써 물질의 내부의 자유 운반자의 밀도의 분포를 과도기적으로 제어한다. 이때 야기하는 레이저의 파장 및 펄스의 폭을 최적화함으로써 물질 내부의 운반자 밀도 변화를 깊이에 따른 분포를 초고속 레이저의 펄스의 투과 깊이 및 공정 속도를 고려하여 3 차원적으로 최적화되도록 고안한다. 이상의 고안된 개념을 실현하기 위하여 본 연구에서는 서로 다른 레이저 파장 즉 800 nm 및 1030 nm 의 초고속레이저의 경우에서 실리콘에 집중한 경우의 이론적인 측면 및 실험적인 측면을 예로 들어 구현하였다. 이상의 연구 결과 및 본 실험실에서 발표한 하이브리드 공정에 적용하여 공정 대상 물질의 과도 흡수를 유발함으로써 초고속 레이저 에너지를 이용하여 종래의 초고속 레이저 미세가공기술이 가지고 있는 가공 단면을 공정 목적에 최적화하도록 제어 가능하게 할 수 있다 [2].

### 후기

본 연구는 한국표준과학연구원 기관고유사업 및 첨단레이저 응용 미세가공기술개발사업의 연구비 지원으로 이루어졌다.

### 참고문헌

1. Sabbah, A. J. and Riffe, D. M., "Femtosecond pump-probe reflectivity study of silicon carrier dynamics", *PHYSICAL REVIEW B* **66**, 165217 (2002)
2. J.S.Yahng, et al., "Nonlinear enhancement of femtosecond laser ablation efficiency by hybridization with nanosecond lase", *OPTICS EXPRESS*, **14**, 9544-9550 (2006)