

◆ 특집 ◆ 신개념 레이저 기반 초정밀/초고속 가공시스템

피코초 레이저 드릴링 공정 및 플랫폼

Picoseconds Laser Drilling and Platform

서정^{1,✉}, 신동식¹, 손현기¹, 송준엽²
Jeong Suh^{1,✉}, Dongsig Shin¹, Hyonkee Sohn¹ and Junyeob Song²

1 한국기계연구원 광응용생산기계연구실 (Department of High Density Energy Beam Processing & System, KIMM)

2 한국기계연구원 초정밀기계시스템연구실 (Department of Ultra Precision Machines & Systems, KIMM)

✉ Corresponding author: jsuh@kimm.re.kr, Tel: 042-868-7445

Manuscript received: 2010.8.10 / Accepted: 2010.8.25

Laser drilling is an enabling technology for Through Silicon Via (TSV) interconnect applications. Recent advances in picoseconds laser drilling of blind, micron sized vias in silicon is presented here highlighting some of the attractive features of this approach such as excellent sidewall quality. In this study, we dealt with comparison of heat affection around drilled hole between a picosecond laser and a nanosecond laser process under the UV wavelength. Points which special attention should be paid are that picosecond laser process lowered experimentally recast layer, surface debris and micro-crack around hole in comparison with nanosecond laser process. These finding suggests that laser TSV process has possibility to drill under 10µm via. Finally, the laser drilling platform was constructed successfully.

Key Words: Laser (레이저), Drilling (드릴링), Picosecond (피코초, 10^{-12} 초), TSV (실리콘 관통 전극), Platform (플랫폼)

1. 서론

TSV(trough silicon via)의 핵심 기술인 실리콘 웨이퍼에 관통 전극 즉 via 를 형성하기 위한 방법에는 일반적으로 레이저를 이용한 드릴링 방법과 DRIE(Deep Reactive Ion Etching)를 이용하는 방법이 고려되고 있으며 사용하는 칩의 크기, interconnect pitch, via 직경 및 깊이, via 모양, 웨이퍼 크기에 따라 두 가지 방법을 선택적으로 사용하고 있다.

DRIE 공정은 기존의 레이저 가공공정에서 불가능하였던 10µm 급 이하의 직경을 가공하는데 유용하게 적용이 가능하여 미세 비아홀(via-hole) 가공 시장을 선점하고자 하고 있다.¹ 그렇지만 DRIE 공정은 금속층 가공의 한계, 대면적 가공의 어려움, 낮은 깊이 균일도, 리소그래피 공정으로 인한 공

정지연, 환경오염 그리고 플라즈마로 인한 회로의 손상에 자유롭지 못한 한계가 있어 이에 대한 대체공정이 필요한 실정이다.²⁻⁴

이에 반해 레이저 드릴링 금속층의 드릴링이 가능하며 고속가공과 대면적에 용이하고 웨이퍼의 가장자리와 중간의 깊이 차이가 없으며 리소그래피가 없는 장점이 있다. 뿐만 아니라 filling 을 위한 최적의 측벽 기울기(side-wall taper)인 85°를 제어하기 용이하며 부드러운 측벽표면을 가지며 이로 인하여 void 가 발생하지 않으며 active 층의 구조를 손상시키지 않는 장점이 있다.⁵ 그렇지만 일반적으로 레이저 드릴링은 상기의 장점에도 불구하고 재료반응 시 열적영향이 있다는 단점이 있다. 이로 인하여 10µm 이하의 비아홀 드릴링에 한계에 부딪히고 이를 보완하기 위한 노력으로 극초단 펄

스 레이저를 이용한 드릴링이 연구되고 있다.⁶

따라서, 신개념 레이저 기반 초정밀/초고속 가공시스템 개발의 일환으로 한국기계연구원에서는 UV 파장을 가지는 피코초 레이저 및 나노초 레이저를 사용하여 실리콘의 가공특성을 연구하고 있으며, 또한 피코초 레이저 드릴링 플랫폼 개발을 진행하고 있으며 그 결과를 본 논문에서 소개하고자 한다.

2. 피코초 레이저를 이용한 TSV 드릴링

2.1 피코초 및 나노초 레이저 드릴링 비교

Fig. 1 은 피코초 및 나노초 레이저로 비아 홀을 가공하였을 경우의 상면 비교를 위한 전자현미경 사진으로서 가공조건은 피코초 레이저의 경우 pulse duration: 15ps, pulse energy: 10 μ J, pulse cycle: 20times 및 input energy: 200 μ J 그리고 나노초 레이저의 경우 pulse duration: 110ns, pulse energy: 40 μ J, pulse cycle: 5 times 및 input energy: 200 μ J 이다.

총 주입된 에너지는 200 μ J 로서 동일하게 주입 되었으나 가공현상은 상이하게 다르다는 것을 보여주고 있다. 즉 나노초 레이저를 이용한 가공의 경우 상부에 용융물 형태의 잔유물들이 다량 발견된 반면 피코초 레이저의 경우 파티클 형태의 잔유물들이 산포되어 있었다. 용융물 형태의 잔유물은 레이저 빔이 재료에 조사되었을 경우 열이 축적되어 생기는 현상이며 파티클 형태의 잔유물은 공유결합 구조의 실리콘이 광화학적인 반응(photochemical reaction)⁶ 에 의해 분해되어 주변에 분포된 것으로 판단된다. 이는 피코초 레이저를 이용한 가공은 광화학 반응이 주가 되며 나노초 레이저를 이용한 가공에 있어서는 광열 반응이 주가 되는 가공 메커니즘이라는 것을 의미하고 있어 TSV 와 같은 고정밀 가공은 비열적 반응인 피코초 레이저를 사용해야 된다는 것을 증명하고 있다.

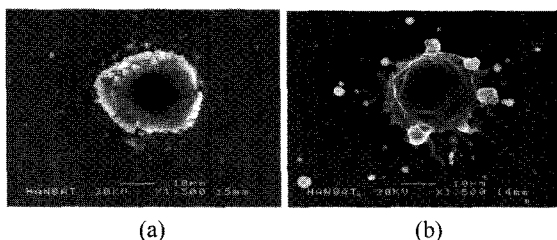


Fig. 1 SEM images of drilled hole using (a) picosecond and (b) nanosecond pulse laser process

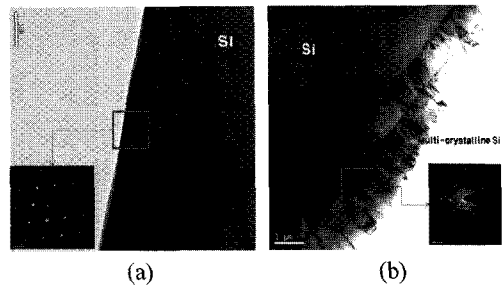


Fig. 2 TEM images of drilled hole using (a) picosecond and (b) nanosecond pulse laser process

Fig. 2 는 피코초 및 나노초 레이저로 비아홀을 가공하였을 경우 단면상에서 열영향부분석을 위한 TEM 측정 결과이다. 가공조건은 피코초 레이저의 경우 pulse duration: 12ps, pulse energy: 10 μ J, pulse cycle: 200times 및 input energy: 2000 μ J 그리고 나노초 레이저의 경우 pulse duration: 110ns, pulse energy: 60 μ J, pulse cycle: 20times 및 input energy: 1200 μ J 이다. 본 실험을 통해서 나노초 레이저 가공의 경우 1-2 μ m 의 용융부가 가공홀 내에 형성된다는 것을 알 수 있었으며 피코초 레이저의 경우 용융층이 상대적으로 발생하지 않았다는 것을 알 수 있었다. 용융부는 레이저 빔에 의해 용융된 실리콘 모재가 충분히 홀외부로 빠져나가지 못한채 벽면에서 재응고된 상태로서 Fig. 2(b)의 회절패턴으로서 판단한다면 다결정 실리콘 상태로 남아있다는 것을 알 수 있다. 즉 피코초 레이저 가공의 경우 나노초 레이저에 비하여 더 많은 에너지를 주입하였음에도 불구하고 계면에서의 결정상태는 모재와 동일한 단일 실리콘 상태를 유지하고 있다는 것을 보여주고 있으며 이는 Fig. 2(a)에서의 회절패턴이 모재와 동일하게 규칙적으로 배치되어 있다는 것을 보면 알 수 있다. 이로서 피코초 레이저는 나노초 레이저에 비하여 열영향이 낮아 열응력을 최소화 할 수 있어 기존의 레이저가공의 단점을 해소할 수 있을 것으로 기대된다.

2.2 하이브리드공정을 이용한 TSV 가공기술

레이저에 의한 TSV 의 드릴링 공정은 기존의 DRIE 공정에 비해 단일공정으로 금속층의 가공이 가능하고, active device 에 손상(damage)을 주지 않으며, 환경친화적이고 리소그래피 공정이 필요 없는 photomask-free 공정이 가능한 장점이 있지만, 극초단 펄스 레이저를 사용했음에도 불구하고 측

벽에 용융물이 미량으로 남아있으며 상면에 표면 잔유물(surface debris)이 발생하는 단점을 여전히 보유하고 있다(Fig. 1 참조).⁷ 반면 DRIE 공정은 레이저 드릴링에 비하여 작은 via 직경(1 μ m 이하 가능)이 가능하며 via 의 수에 제한이 없는 장점이 있다. 그러나 레이저 드릴링 공정에서 장점으로 다루어지던 금속 및 폴리머의 가공특성 및 photomask-free 공정에 대해서는 DRIE 공정에서 치명적인 단점으로 논의되고 있다.

이를 보완하기 위해 한국기계연구원에서는 하이브리드 공정을 제시하였는데 이는 극초단 펄스 레이저를 이용하여 최소한의 열영향을 유지한 채 금속층 및 실리콘층을 가공한 후 RIE 공정을 통하여 가공홀 내부의 용융층을 식각하여 측벽 균일도(roughness)가 우수하며 filling 시 void 를 방지할 수 있는 최적의 각도제어가 가능한 가공법이다.⁸

즉 본 가공법은 레이저 드릴링 및 DRIE 공정의 상호간의 단점을 보완하며 장점을 보강할 수 있는 기법으로서 레이저 가공의 측면에서는 PR 코팅 및 현상공정으로 상면에 형성되던 표면 잔유물(surface debris)을 제거할 수 있으며, 가공홀에 형성되던 열적영향(용융물, 열응력)을 제거할 수 있는 장점이 있으며, DRIE 의 측면에서는 PR 경화를 위한 마스크가 필요 없으며 금속 회로층, 폴리머층과 같은 이종재료가 형성된 후에도 가공이 가능하여 TSV 공정에 있어 공정유연성을 더욱 증가시킬 것으로 기대하고 있다(Fig.3 참조).

2.3 Laser drilling 플랫폼

레이저 드릴링 플랫폼은 8"급 웨이퍼 이송 스테이지, 고집속 광학계, 고출력 UV/극초단 펄스 레이저, 펄스 안정화 장치로 구성된다.

광학계는 fundamental optical setup(UV base), additional optical setup(IR, Green)으로 구분되고, 집속 광학계는 스캐너 시스템(telecentric), objective lens 로 구성된다. 여기서 스캐너의 탈부착이 용이해야 한다(UV, IR, Green 사용). 구동방식은 objective lens(OFR 사)를 이용한 가공이 추가 되는 스테이지 단독 구동, scanner(Scanlab 사) 및 스테이지 연동(대면적 가공)방식의 구동으로 구분되고, 8"급 웨이퍼의 고속 이송(X,Y: 1m/s), X,Y 축의 경우 가감속구간을 제외한 1m/s, 이송구간이 300mm 를 만족한다. z 축은 석정반 구조물로 구성된다.

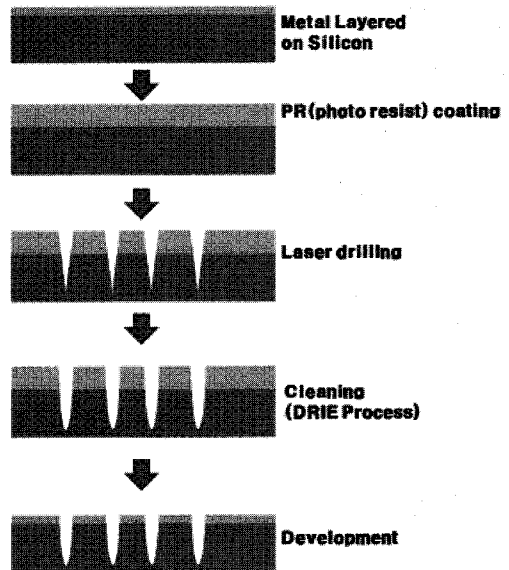


Fig. 3 Fabrication of Through Silicon Via using Hybrid process

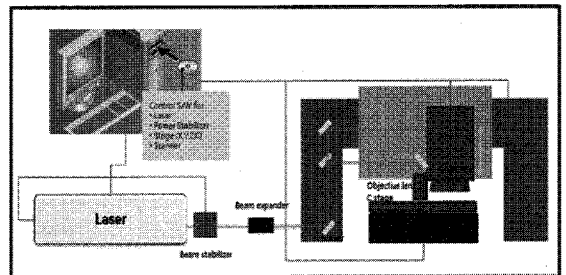


Fig. 4 Schematic diagram of laser drilling platform

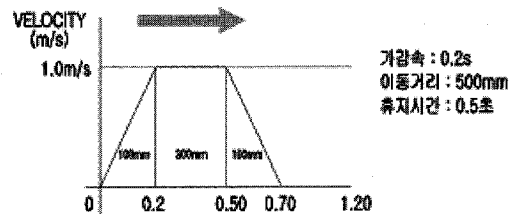
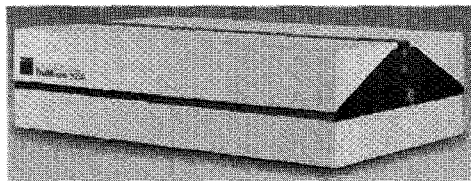


Fig. 5 Limit of stroke for high speed moving

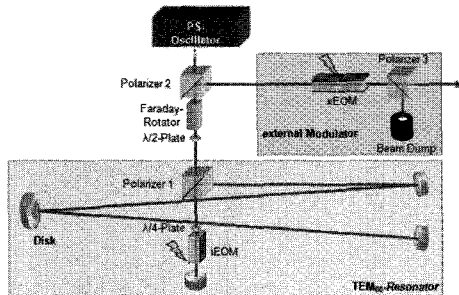
비전 시스템(vision system)에서는 인식마크에 의한 웨이퍼 자동 얼라인 기능(θ 축)을 가지며, 비전에 의한 얼라인 후 스테이지 및 스캐너 연동을 통한 드릴링 가공(8" wafer)이 진행된다. PC base 컨트롤을 위해 UMAC 을 사용하며, Gerber, DXF, BMP,

PLT 등 파일 변환이 가능하다. 사용한 UV/피코초 레이저는 Trumpf사(독일) 제품이다.

Fig. 6 은 피코초 레이저의 외관 및 증폭방식을 나타내고 있다. 특징으로서는 증폭방식으로서 디스크 타입을 사용하고 있는 점과 external modulator 로서 xEOM(external electrical optical modulator)을 사용하고 점을 들 수 있다. 디스크 타입의 증폭기의 특징으로서 고출력 영역에서 thermal lensing 효과가 없으며 온도제어가 용이하며 빔모드가 우수하며 back reflection 에 의한 손상의 우려가 적은 장점이 있다. external modulator 를 사용하는 방식의 가장 큰 장점으로서는 초기펄스가 안정적이라는 점을 들 수 있는데 일반적인 증폭에서 발생하던 불안정 펄스를 피할 수 있어 가공품질의 제어가 용이하다는 장점이 있다.



(a)



(b)

Fig. 6 UV/picoseconds laser: (a) laser head and (b) schematic of optical system in high power picoseconds laser

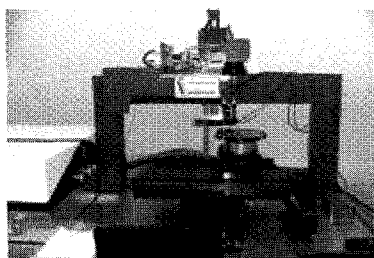


Fig. 7 Laser drilling platform

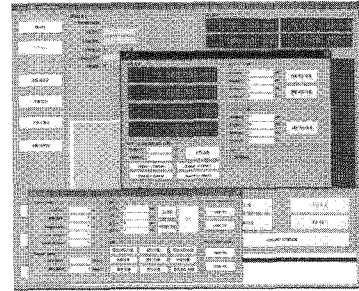


Fig. 8 Operation s/w for laser drilling platform

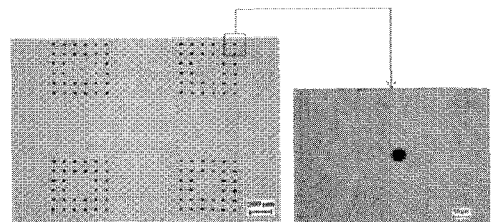


Fig. 9 Laser-drilled TSV holes in silicon wafer

Fig. 7 은 제작된 레이저 드릴링 플랫폼을 보여 주고 있다. Fig. 8 은 장비 운용을 위한 소프트웨어이며, Fig. 9 는 실제로 웨이퍼 상에 고속으로 드릴링한 결과이다.

3. 결론

본 논문에서는 한국기계연구원에서의 연구 중인 극초단 펄스 레이저 드릴링 및 하이브리드 공정, 그리고 플랫폼에 대해 소개를 하였다.

환경적, 경제적 및 기술적으로 단점을 보유하고 있는 DRIE 의 대체공정의 일환으로 피코초 레이저를 이용한 비열적 가공에 대한 실험적 고찰로서 나노초 레이저와 피코초 레이저를 이용한 웨이퍼 가공을 비교함에 있어 장단점을 분석하였다. 이를 통하여 피코초 레이저는 TSV 공정에 있어 한계에 다다르기 시작한 나노초 레이저에 비하여 적은 에너지로서 깊은 가공이 가능하며, 열적영향이 적으면서 미세한 직경의 via 가공에 적합하다는 결론을 얻을 수 있었다. 즉 피코초 레이저를 이용하면 나노초 레이저 드릴링 공정의 단점의 보완뿐만 아니라 기존의 DRIE 에서 가공이 불가능하였던 급속층, 폴리머층의 가공이 가능하며 via 측벽 기울기가 있어 구리의 전기도금이 유리한 장점이 있었다. 그렇지만 단점으로서 실리콘 내 공유결합의 분해로 인하여 발생한 잔유물들을 세척해야 하는

후공정의 필요성이 대두되고 있으며 이의 해결을 위해 제시된 하이브리드 가공기술은 TSV 를 위한 신공정 기술로서 기대된다. 한국기계연구원에서는 본 연구를 위한 기술적 접근을 시도하고 있으며 이의 성과는 향후 TSV 가공을 이용한 MCP 공정에 도 더욱 더 파급효과가 클 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 산업원천과제 “신개념 레이저 기반 초정밀/초고속 가공시스템 개발”과 협동연구개발사업 “차세대 반도체 MCP 핵심기술 개발”과제의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Alcatel Micro Machining Systems, <http://www.alcatelmicromachining.com>
2. XSiL, www.xsil.com
3. Yole development, <http://www.yole.fr>
4. Rodin, A. M., Callaghan, J. and Brennan, N., “High Throughput Low CoO Industrial Laser drilling Tool,” EuroAsia Semiconductor, Vol. 30, No. 6, pp. 11-16, 2008.
5. Nagarajan, R., Prasad, K., Ebin, L. and Narayanan, B., “Development of dual-etch via tapering process for through-silicon interconnection,” Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 139, No. 1-2, pp. 323-329, 2007.
6. Coherent Inc, www.coherent.com
7. Shin, D. S., Suh, J., Lee, J. H., Kim, J. O. and Lee, W. K., “TSV Formation using Laser-based Hybrid Process,” Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 657-658, 2010.
8. Cho, N.-I. and Chon, I., “Anisotropic etching characteristics of single crystal silicon by KOH and KOH - IPA solutions,” Journal of the Korean Vacuum Society, Vol. 11, No. 4, pp. 249-255, 2002.