

## 피코초 레이저의 공정변수에 따른 TSV 드릴링 특성연구

신동식, 서 정, 김정오

한국기계연구원 광응용생산기계연구실

### Parametric Study of Picosecond Laser Hole Drilling for TSV

Dongsig Shin, Jeong Suh and Jengo Kim

Department of High Density Energy Beam Processing and System, KIMM

#### Abstract

Today, the most common process for generating Through Silicon Vias (TSVs) for 3D ICs is Deep Reactive Ion Etching (DRIE), which allows for high aspect ratio blind holes with low surface roughness. However, the DRIE process requires a vacuum environment and the use of expensive masks. The advantage of using lasers for TSV drilling is the higher flexibility they allow during manufacturing, because neither vacuum nor lithography or masks are required and because lasers can be applied even to metal and to dielectric layers other than silicon. However, conventional nanosecond lasers have the disadvantage of causing heat affection around the target area. By contrast, the use of a picosecond laser enables the precise generation of TSVs with less heat affected zone. In this study, we conducted a comparison of thermalization effects around laser-drilled holes when using a picosecond laser set for a high pulse energy range and a low pulse energy range. Notably, the low pulse energy picosecond laser process reduced the experimentally recast layer, surface debris and melts around the hole better than the high pulse energy process.

**Keywords:** Picosecond laser, silicon, TSV, drilling, DRIE

#### NOMENCLATURE

$P_{ave}$  = average power (평균출력)  
 Rep. = repetition rate (펄스반복율)  
 $E_p$  = pulse energy (펄스에너지)  
 $E_t$  = total input energy (총주입에너지)  
 $F$  = fluence (에너지밀도)  
 $\lambda$  = wavelength (파장)  
 $\Phi$  = spot size (초점크기)  
 $\tau_p$  = pulse duration (펄스폭)

#### 1. 서 론

최근 IT 제품의 소형화 및 다기능화에 따라 집적회로 기술에서 3차원 집적회로(3D IC)를 위한 패키징 기술의 중요성이 점차 증대되고 있다. 이러한 3차원

패키징 기술은 배선의 연결방법, 칩간 접합방법에 따라 다양한 칩으로 구분되는데 작동성능(functionality) 및 집적도를 고려한다면 와이어 방식의 인터컨넥션 보다는 TSV(Through Silicon Via)방식의 칩의 적용이 더욱 기대된다.<sup>1</sup> 이와 같은 3차원 패키징 기술은 드릴링 기술, 도금기술 및 접합기술등으로 나뉘어 질수 있다. 드릴링 기술은 TSV를 형성하는 기술로서 고집적도의 3차원 적층(stack)을 위해서 중요성이 점차 증대되고 있으며 DRIE(deep reactive ion etching) 및 레이저 드릴링 공정이 대표적으로 적용되고 있다.<sup>2</sup>

레이저 드릴링 공정은 고가의 리소그래피 공정이 필요 없으며 생산유연성이 뛰어나 소유비용(CoO; cost of ownership)을 낮출 수 있는 장점이 있다.<sup>2</sup> 또한, DRIE공정에 비해서 장비단가가 낮으며 마스크 에칭공정이 필요 없어 간편하며 DRIE 공정에서 발견되던 스칼롭(scallop)과 같은 문제점이 없어 3차원 패키징 업계에서 기대를 하고 있는 공정이기도 하다.

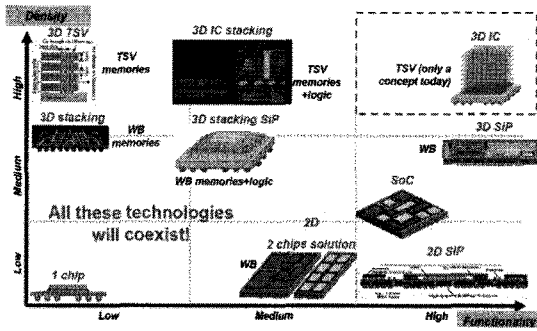


Fig. 1 Trends for advanced packaging of 3D IC.

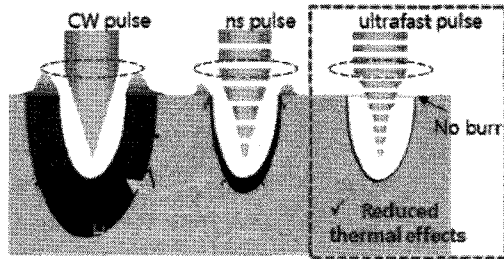


Fig. 2 Comparison of heat affection by nanosecond laser and ultrashort-pulsed laser processes.

그렇지만 일반적인 레이저 가공공정은 수 마이크로급 정밀가공에 있어 DRIE공정에 비해 열적영향이 많아 가공에 한계점을 보이고 있다. 이러한 한계점을 보완하기 위해 비열적 가공에 용이한 극초단 펄스 레이저를 이용한 가공성에 관한 연구가 진행되고 있으며 TTM(two temperature model) 및 BTM(boltzmann transport model)과 같은 수치해석 기법을 이용하여 비열적 가공공정에 대한 연구결과가 보고되고 있다.<sup>5-8</sup>

본 논문에서는 극초단펄스레이저의 하나인 피코초 레이저를 이용한 실리콘 웨이퍼의 가공에 관한 실험적 결과를 다루고 있으며 피코초 레이저의 공정변수에 따른 드릴링 깊이 및 세장비를 분석하고 있다. 또한 TEM을 이용한 재료학적 분석도 겸하고 있어 피코초 레이저 드릴링 메커니즘의 규명을 위한 이해에 도움이 될 것으로 판단된다.

## 2. 실험방법

Fig. 3은 피코초 레이저 드릴링 실험을 위한 시스템의 구성을 보여주고 있다. 적용된 레이저는 Trumpf사의 Trumicro 5250이며 파장( $\lambda$ ) 515nm, 평균출력( $P_{ave}$ ) 25W 그리고 펄스폭이 8ps인 빔을 조사가능하다. 다양한 종류의 미러를 지난 레이저 빔

은 스캐너(Laylase, Super scan)를 지나면서 웨이퍼에 도달하며 각 좌표에서 드릴링 가공이 이루어진다. 스캐너에 적용된 F- $\theta$  렌즈초점길이는 121mm로서 초점크기( $\Phi$ )가 20 $\mu$ m인 레이저 빔을 조사할 수 있다. 본 레이저는 EOM을 제어하여 빔을 방출하는 방식으로 초기의 자이언트 펄스가 발생되지 않으며 펄스반복율의 변화에 따른 침투출력의 차이가 발생하지 않는 장점이 있다. 드릴링 가공을 위한 변수는 평균출력 ( $P_{ave}$ ), 펄스반복율(Rep.), 펄스에너지( $E_p$ ) 및 펄스수로서 TSV공정에 있어 이러한 변수들은 비열적가공을 위한 최적화 공정을 거쳐야 한다. 사용된 시편은 (100)의 방향을 가지는 실리콘 웨이퍼이며 총주입에너지가 5.8mJ인 가공 조건에서 레이저 빔이 조사행되었으며 가공홀의 열적영향 유무를 판단하기 위해 광학현미경 및 TEM (Tecnai, F30S)을 사용하여 분석하였다.



Fig. 3 Experimental setup for TSV process using a picosecond laser.

## 3. 실험결과 고찰

### 3.1 피코초 레이저와 나노초레이저의 가공성비교

고밀도의 극초단펄스레이저 빔은 반도체 재료의 온도를 급격하게 상승시키며 이를 통하여 실리콘은 가전자대(valance band)에서 전자대(conduction band)로 여기가 되어진다.<sup>9</sup>

Fig. 4는 각각 피코초 레이저( $\tau_p$ : 8ps,  $\lambda$ : 515nm,  $E_p$ : 6.5 $\mu$ J and  $E_t$ : 5.8mJ)와 나노초 레이저( $\tau_p$ : 120ns,  $\lambda$ : 355nm,  $E_p$ : 60 $\mu$ J, Rep.: 50kHz and  $E_t$ : 1.2mJ)를 이용한 실리콘의 가공 후 단면의 TEM측정 결과이다. 실험결과 Fig. 4에서 볼 수 있는 바와 같이 나노초 레이저를 이용한 실리콘 드릴링의 결과는 피코초 레이저에 비하여 적은 주입에너지( $E_t$ )가 조사되었음에도 불구하고 약 2 $\mu$ m 두께의 재용융층을

보여주고 있는 반면 피코초 레이저를 이용한 가공은 상대적으로 단결정형태를 보여주고 있으며 (100)방향의 실리콘을 TEM 측정하였을 경우에 나타나는 전형적인 회절형상이 나타났다.<sup>10</sup> 나노초 레이저를 이용한 가공에 있어 재용융층은 다결정(polycrystalline)형태의 구조를 보여주고 있으며 분산된 회절패턴이 이를 입증하고 있다. 이는 나노초 레이저가공에 있어 열적영향의 가능성을 설명하고 있으며 대안으로 비열적 가공특성을 보유하는 피코초 레이저가 적합할 수 있다는 것을 보여주고 있다.

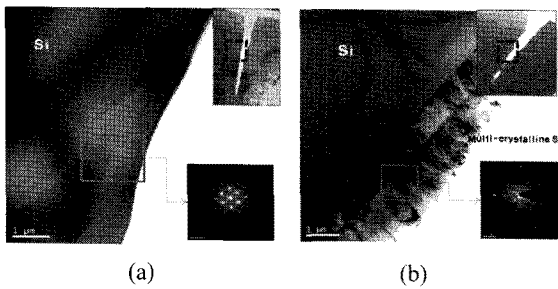


Fig. 4 TEM images of drilled hole using (a) picosecond ( $\tau_p$ : 8ps,  $\lambda$ : 515nm,  $E_p$ : 6.5 $\mu$ J, Rep.: 200kHz and  $E_t$ : 5.8mJ) and (b) nanosecond pulse laser processes ( $\tau_p$ : 120ns,  $\lambda$ : 355nm,  $E_p$ : 60 $\mu$ J, Rep.: 50kHz and  $E_t$ : 1.2mJ).

3.2 피코초 레이저가공변수에 따른 비아형상

피코초 레이저는 나노초 레이저에 비하여 상대적으로 열적영향이 적어 정밀가공에 유리하다. 그

렇지만 이의 정량적 분석을 위해서는 피코초 레이저의 각종 변수에 따른 드릴링공정의 특성을 분석할 필요가 있다.

Fig. 5는 피코초 레이저의 평균출력( $P_{ave}$ ), 펄스반복율(Rep.), 펄스폭( $\tau_p$ ) 및 펄스에너지( $E_p$ )에 따른 가공부의 단면으로서 동일한 총주입에너지( $E_t$ : 5.8mJ)하에서 가공특성을 비교 분석한 사진이다. 여기서 높은 영역의 평균출력( $P_{ave}$ ) 및 펄스에너지( $E_p$ )는 일반적으로 생산성을 높이기 위해 사용되고 있지만 정밀가공을 위해서라면 펄스에너지를 낮추어 가공을 해야 된다는 것을 알 수 있다. 즉 Fig. 5에서 볼 수 있는 바와 같이 높은 평균출력 및 펄스에너지를 이용한 가공은 상대적으로 직경이 큰 홀을 유발하여 낮은 영역의 변수들과는 비교가 되고 있다. 펄스 에너지 및 펄스반복율에 따른 가공경향을 분석하기 위하여 Fig. 5에 나타난 가공홀의 형상을 분석하였으며 Fig. 6 및 Fig. 7에서 정량적으로 다루고 있다.

Fig. 6은 Fig. 5에서 촬영된 가공홀의 단면을 정량적으로 분석한 그래프로서 펄스에너지 및 펄스반복율에 따른 가공깊이 및 세장비를 보여주고 있다. 여기서 볼 수 있는 뚜렷한 경향은 에너지밀도(flucence)가 6.4J/cm<sup>2</sup>이상인 영역에 있어서는 동일한 에너지가 주입된 경우 가공깊이가 오히려 줄어들고 있다는 것을 보여주고 있다. 반면 낮은 에너지 밀도의 영역에 있어서는 펄스에너지에 따라 가공깊이가 깊어지는 경향을 보여주고 있다. 한편 동

Average power	200kHz	100kHz	50kHz	25kHz
13W	 F: 20.7J/cm <sup>2</sup> Ep: 65 $\mu$ J, N: 90pulses			
6.5W	 F: 10.3J/cm <sup>2</sup> Ep: 32.5 $\mu$ J, N: 180pulses	 F: 20.7J/cm <sup>2</sup> Ep: 65 $\mu$ J, N: 90pulses		
3.25W	 F: 5.1J/cm <sup>2</sup> Ep: 16.2 $\mu$ J, N: 360pulses	 F: 10.3J/cm <sup>2</sup> Ep: 32.5 $\mu$ J, N: 180pulses	 F: 20.7J/cm <sup>2</sup> Ep: 65 $\mu$ J, N: 90pulses	
0.65W	 F: 1J/cm <sup>2</sup> Ep: 3.2 $\mu$ J, N: 1800pulses	 F: 2J/cm <sup>2</sup> Ep: 6.5 $\mu$ J, N: 900pulses	 F: 4J/cm <sup>2</sup> Ep: 13 $\mu$ J, N: 450pulses	 F: 8.2J/cm <sup>2</sup> Ep: 26 $\mu$ J, N: 225pulses

Fig. 5 The cross-sectional view of drilled holes as a function of the average power ( $P_{ave}$ ), the repetition rate (Rep.) and the pulse energy ( $E_p$ ) under the same total input energy ( $E_t$ : 5.8mJ).

일한 펄스에너지 하에서 펄스반복율에 따른 분포를 보면 펄스 반복율이 높을수록 오히려 가공깊이가 낮다는 것을 알 수 있다. 이는 레이저 드릴링후 수백  $\mu\text{s}$  동안 남아있는 plume에 의해 레이저 빔이 차단되거나 산란되어 발생된 현상으로 판단된다.<sup>11</sup> Fig. 7은 펄스에너지에 따른 가공체적(ablation volume)에 대한 정량적 분석으로서 앞서 Fig. 6에서 보여준 깊이 및 세장비에 대한 경향에 비해서 다른 변화가 있다는 것을 보여주고 있다. 즉, 전반적으로 가공홀의 체적은 펄스에너지가 증가함에 따라 동반하여 증가한다는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 6에서 깊이가 얕아진다고 설명한 내용과는 상반된 내용으로서 가공깊이가 낮아지면서 가공체적이 늘어난다는 의미는 레이저 드릴링에 의한 급격한 폭발 및 열적 반응에 의해 홀의 벽면으로의 가공이 활발히 이루어졌다는 것을 의미하고 있으며 펄스반복율, 플라즈마 발생 및 배출에 의한 영향에 대한 고찰이 추가적으로 필요하다

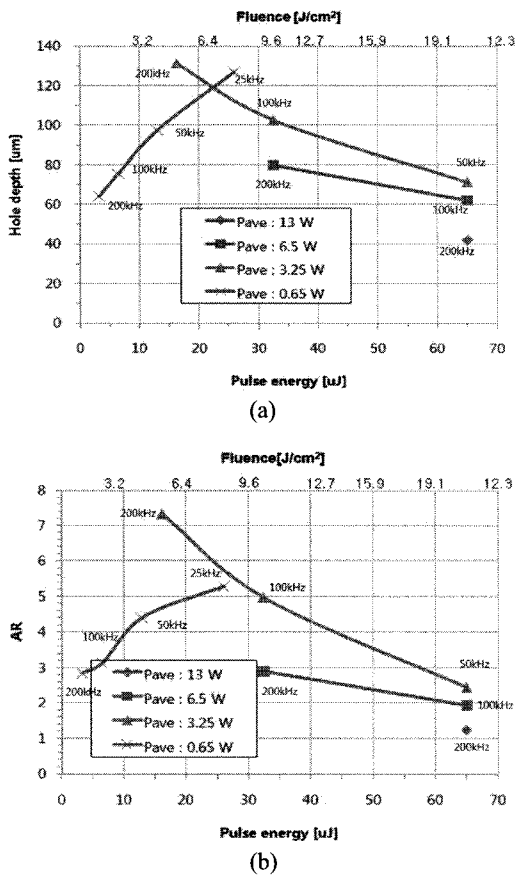


Fig. 6 The graphs of (a) hole depth and (b) aspect ratio as a function of the pulse energy ( $E_p$ ) and the fluence (F) under the same total input energy ( $E_t$ : 5.8mJ).

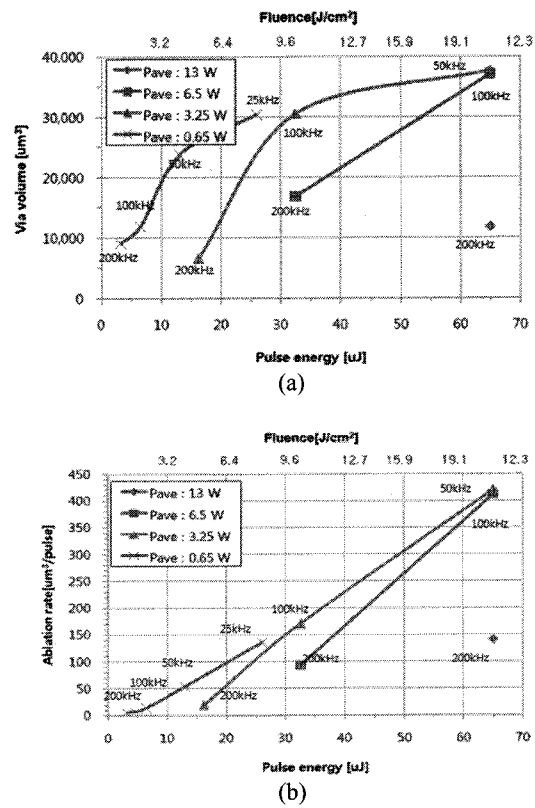


Fig. 7 The graphs of (a) via volume and (b) ablation rate as a function of the pulse energy ( $E_p$ ) and the fluence (F) under the same total input energy ( $E_t$ : 5.8mJ).

### 3.3 전자현미경 분석을 통한 비아특성

Fig. 8은 앞서 설명한 피코초 레이저의 높은 에너지의 가공영역과 낮은 에너지의 가공영역에 대한 대표적 조건에서 실리콘을 드릴링한 후 표면의 전자현미경 사진이다. 비록 동일한 총주입에너지가 입사되었지만 32.5 $\mu\text{J}$ 의 펄스에너지로 180회 조사한 경우가 6.5 $\mu\text{J}$ 의 펄스에너지로 900회 조사한 경우에 비하여 상대적으로 많은 표면잔유물(surface debris) 및 용융물(melt)이 발견되었다. 이는 높은 에너지의 극초단 펄스는 열적영향을 수반할 수 있다는 의미이기도하다.

Fig. 9는 Fig. 8에서 제시된 대표적 가공조건에서 가공된 시편의 단면에 대한 투과전자현미경(TEM)분석 결과로서 측벽에서의 열적영향 및 전위(dislocation)에 대한 영향을 보여주고 있다. Fig. 9(a)는 상대적으로 높은 에너지의 가공조건을 이용하여 가공된 시편의 TEM측정사진으로서 측벽에 모재와 다른 형태의 얼룩무늬의 패턴이 형성된다는 것을 보여주고 있다. 이는 Fig. 4(b)에서 보여주고 있는 전형적인 열적영향에 의한 재용착층과는 구분

되는 패턴으로서 극초단 펄스 레이저 드릴링시 충격력에 의한 전위로 판단된다.<sup>10</sup> 이는 Fig. 8(a)에서 보여준 열적영향의 부산물인 용융물 및 표면잔유물과는 구분되는 결과로서 높은 에너지 영역의 가공에서는 열적영향과 더불어 충격력에 의한 재료의 손상도 고려해야 한다는 것을 보여주고 있다.

Table 1은 실험결과에 대해서 정성적으로 정리한 요약으로서 3.25W이상의 평균출력으로 조사한 경우 가공시간을 최소화하여 생산성을 높일 수 있는 장점이 있었으나 열적영향 및 홀크기의 증가 그리고 세장비의 감소로 인하여 정밀가공에 무리가 있었다는 것을 보여주고 있다. 반면 0.65W의 가공결과로서 알 수 있는 점은 펄스에너지의 증가에 따라 가공깊이가 깊어졌다는 것을 알 수 있으며 상대적으로 깊은 가공깊이 및 세장비와 낮은 열적영향으로 대변할 수 있다.

### 3.4 전기도금을 이용한 비아형성

Fig. 10은 Fig. 9(b)와 같은 가공조건을 이용하여 가공한 TSV 샘플로서 표면에서의 용융물 및 잔유물들을 발견할 수 없이 원활하게 가공이 이루어졌다는 것을 보여주고 있다.

한편 본 시편의 도금 가능성을 검증하기 위해 전기도금(PPR plating)을 이용하여 시편을 제작하였다. PPR(periodic pulse reverse current) 도금법이란 주기적으로 전류파형을 Fig. 10과 같이 변경해 가며 도금을 시행하는 방법으로서 실리콘 웨이퍼상의 미세 비아홀의 도금에 적합한 공정이다. 본 실험에서는 HDP CVD공정을 이용하여 Ti와 Cu를 각각 0.3 $\mu$ m 및 0.5 $\mu$ m 증착한 후 도금을 진행하였

으며 전류 파형으로 via내부에 Cu충전을 실시하였고, 결과 Fig. 11에 나타난 바와 같이 비아내부의 도금을 수행할 수 있게 되었다.

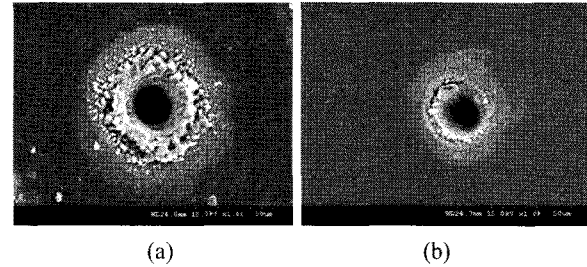


Fig. 8 SEM images of a drilled surface with the conditions of (a) Pave: 6.5W, Ep: 32.5 $\mu$ J, F: 10.3J/cm<sup>2</sup>, Rep.: 200kHz and (b) Pave: 0.65W, Ep: 6.5 $\mu$ J, F: 2J/cm<sup>2</sup>, Rep.: 100kHz at  $\tau_p$ : 8ps,  $\lambda$ : 515nm, Et: 5.8mJ.

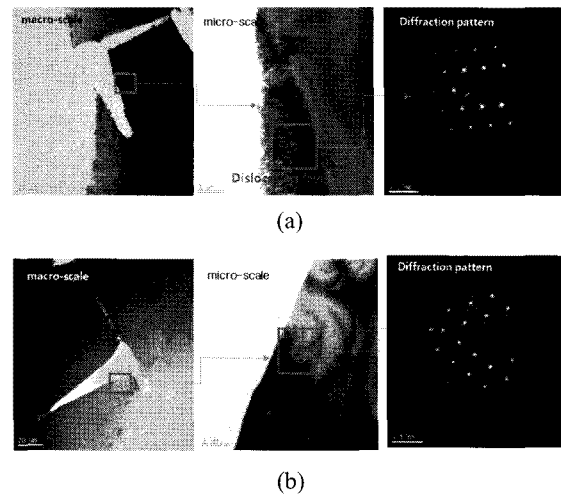


Fig. 9 TEM images and diffraction patterns of drilled hole with the conditions of (a) Pave: 6.5W, Ep: 32.5 $\mu$ J, F: 10.3J/cm<sup>2</sup>, Rep.: 200kHz and (b) Pave: 0.65W, Ep: 6.5 $\mu$ J, F: 2J/cm<sup>2</sup>, Rep.: 100kHz at  $\tau_p$ : 8ps,  $\lambda$ : 515nm, Et: 5.8mJ.

Table 1 Experimental summary

Increasing on		Hole size	Ablation depth	Aspect ratio	Melt (surface & Side wall)	Burst duration
Average power - fix. Rep. - pulse energy ↗ - No. of pulses ↘		↗	↘	↘	↗	↘
Average power - fix. pulse energy - Rep. ↗ - No. of pulses ↘		↗	↘	↘	↗	↘
Pulse energy - Pave ↗ - Rep. ↘ - pulse Interval ↗ - No. of pulses ↘	Pave: >3.25W	↗	↘	↘	↗	↘
	Pave: 0.65W	↗	↘	↘	-	↗

본 실험을 통하여 레이저 드릴링에 의해 제조된 10 $\mu$ m 크기의 비아내부에 도금을 수행할 수 있는 가능성을 확보했지만 하단부까지 완벽하게 도금이 되지 않은 한계가 발견되었는데 이에 대한 규명을 위해서 추가적인 공정연구를 진행할 예정이다.

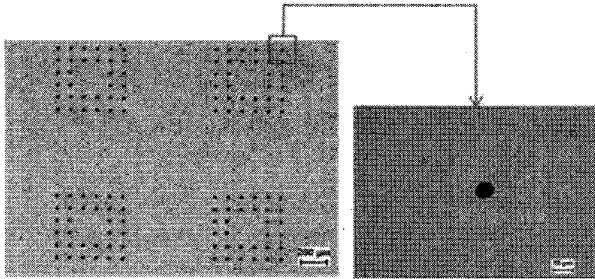


Fig. 10 Picosecond laser drilled TSV holes.

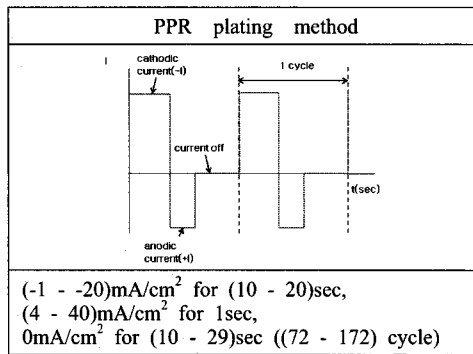


Fig. 11 periodic pulse reverse.

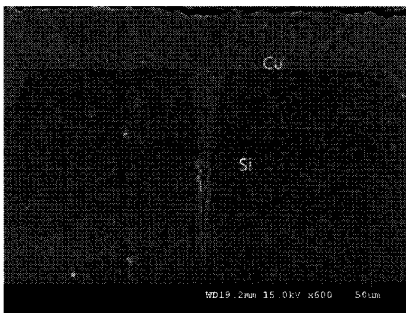


Fig. 12 pulse-reverse plating.

#### 4. 결론

본 연구는 기존의 나노초 레이저를 이용한 TSV 가공시 발생했던 열적영향의 한계점을 극복하기 위한 실험적 시도를 다루고 있다. 이를 위해 극초단 펄스 레이저인 피코초 레이저를 사용하였으며 실험적 검증을 통하여 가공깊이, 세장비 및 열적영향의

유무를 판단하였다. 실험결과 피코초 레이저를 사용하는 경우에도 높은 펄스에너지(F:10 J/cm<sup>2</sup>)를 조사하게 된다면 홀크기가 커지며 다량의 용융물의 분출 그리고 가공시 충격력에 의한 전위와 같은 결정학적 변화를 유발하는 단점이 있다는 것을 발견하였다. 이로서 6.4J/cm<sup>2</sup>영역 이하의 에너지밀도를 가지는 펄스에너지를 조사한다면 열적영향이 배제된 정밀 가공이 가능하다는 것을 알 수 있었다. 그렇지만 TSV가공산업은 레이저 드릴링기법이 기존의 DRIE 공정을 대체하기 위해서는 더욱 더 높은 생산성을 요구하고 있다. 이와 같은 시대적 요구에 부응하기 위해서는 높은 에너지(F: 10 J/cm<sup>2</sup>)의 피코초 레이저 펄스를 이용한 비열적 가공공정에 초점을 맞추어 추가적인 연구를 이어나가야 할 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 지식경제부의 협동연구개발사업의 일환인 “차세대 반도체 MCP핵심기술 개발(과제번호 : B551179-08-05-00)” 과제의 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- 1) Yole development, <http://www.yole.fr>
- 2) Rodin, A. M., Callaghan, J. and Brennan, N., High Throughput Low CoO Industrial Laser drilling Tool, EuroAsia Semiconductor, Vol. 30, n 6, pp. 11-16, 2008.
- 3) Coherent Inc, <http://www.coherent.com>
- 4) 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, n 1-2, pp. 323-329, 2007.
- 5) Vatsya, S. R. and Virk, K. S., Solution of Two-temperature Thermal Diffusion Model of Laser-metal Interactions, Journal of Laser Applications, Vol. 15, n 4, pp. 273-278, 2003.
- 6) Chen, J. K., Tzou, D. K. and Beraun, J. E., Numerical investigation of ultrashort laser damage in semiconductors, International Journal of Heat and Mass Transfer Vol. 48, pp. 501-509, 2005.

- 7) Sim, H. S., Lee, S. H. and Kang, K. G., Femtosecond pulse laser interaction with thin silicon films and crater formation considering optical phonons and wave interference, *Microsystem Technologies*, Vol. 14, pp. 1439-1446, 2008.
- 8) Pattamatta, A. and Madnia, C. K., Modeling Carrier-Phonon Nonequilibrium due to pulsed laser interaction with nanoscale silicon films, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 132, pp. 082401\_1-9, 2010.
- 9) Van Vechten, J. A., Tsu, R., and Saris, F. W., Nonthermal pulsed laser annealing of Si: plasma annealing, *Physics Letter A*, Vol. 74, pp. 422-426, 1979.
- 10) MINOR A.M., LILLEODDEN E.T., JIN M., STACH E.A., CHRZAN D.C. and MORRIS J.W., "Room temperature dislocation plasticity in silicon," *Philosophical Magazine* Vol. 85, Nos. 2-3, pp. 323-330, 2005.
- 11) Breiting D, Ruf A, and Dausinger F, "Fundamental aspects in machining of metal with short and ultrashort laser pulses," *Proceedings of the SPIE*, Volume 5339, pp. 49-63 2004.