

## ◆ 특집 ◆ 3D TSV 패키징 기술

# 레이저를 이용한 TSV 드릴링 공정

## Fabrication of Through Silicon Via using Laser Drilling Process

신동식<sup>1,✉</sup>, 서정<sup>1</sup>, 이제훈<sup>1</sup>, 김경한<sup>1</sup>  
Dongsig Shin<sup>1,✉</sup>, Jeong Suh<sup>1</sup>, Jaehoon Lee<sup>1</sup> and Kyunghan Kim<sup>1</sup>

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

✉ Corresponding author: dsshin@kimm.re.kr, Tel: 042-868-7484

Key Words: TSV (실리콘 관통전극), Laser (레이저), Drilling (드릴링공정), DRIE (심도반응성이온식각공정), Hybrid Process (하이브리드 공정)

### 1. 서론

세계 반도체 생산은 총 5 개국이 총 생산량의 95%이상을 차지하는 가운데 한국이 세계 3 위의 생산 규모를 자랑하고 있는 산업이다. 메모리분야는 핵심 수출 부품으로 우리나라가 부동의 세계 1 위를 차지하고 있으나, 비메모리는 세계적 기술과는 큰 기술적 차이를 보이고 있다. 반도체 관련 장비·재료 산업 역시 반도체시장의 20% 이상을 차지하는 핵심 후방산업이나, 국내 기업의 경쟁력은 미흡하여 반도체 관련 장비 산업은 일본·미국의 대형 장비·재료 업체들이 대부분의 시장을 차지하고 있다. 이와 같은 기술적 장벽을 헤쳐나갈 수 있는 신개념의 반도체 공정이 바로 MCP (Multi-Chip Packaging) 기술이다. 이는 기존 Moore의 법칙 (Intel의 공동 창업자인 Gordon Moore가 주장하였던 마이크로 칩의 밀도가 18 개월 마다 2 배로 늘어난다는 법칙)을 획기적으로 뛰어넘어 휴대용 통신기기 및 멀티미디어 기기의 경박단소 요구에 대응 가능한 새로운 반도체 패키지 기술로서<sup>1,2</sup> MCP는 SiP, SOP, POP 등을 포괄하는 개념으로 설명할 수 있다. 즉 여러 개의 칩을 2 차원적으로 배열하여 하나의 패키지에 담는 MCM (Multi-Chip module)과는 달리 여러 개의 칩을 얇게 박층화하고 이들을 3 차원적으로 쌓은 후 wire bonding이나 Bump

의 의한 flip chip Bonding을 통해 칩을 서로 연결하는 것이 말한다. MCP는 초기의 POP(package on package) 방식으로 개발되어 양산되었으나, Wire Bonding 방식을 거쳐 최근에는 chip에 via를 형성하여 칩간의 수직적 연결을 시도하는 TSV(through-silicon vias) 방식의 기술도 활발히 연구되고 있다. 이와 같이 TSV 공정을 요구하는 이유로서 전자의 이동경로가 짧아 작동성(functionality)이 뛰어나고 밀도 또한 우수하여 3 차원 칩으로서 최적의 조건을 갖추고 있기 때문이다(Fig. 1 참조).

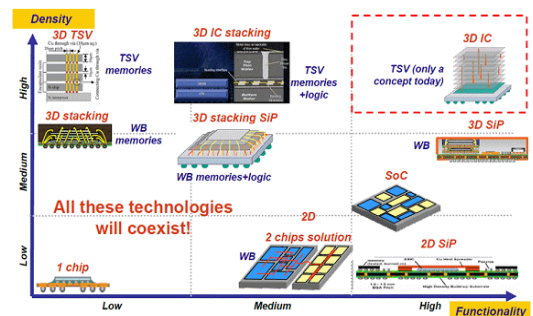


Fig. 1 Trends for advanced packaging of 3D IC<sup>2</sup>

TSV의 가공을 위한 핵심 기술은 실리콘 웨이퍼에 관통전극 즉 via를 형성하기 위한 공정으로서 일반적으로 레이저 드릴링 방법과 DRIE(Deep

Reactive Ion Etching)를 이용하는 방법으로 고려되고 있다. 그렇지만 각각의 방법은 상충되고 있는 장단점으로 인하여 아직 표준화가 이루어 지지 않아 산업화가 지연되고 있다. 이에 따라 본 논문은 레이저 가공공정과 DRIE 공정의 장단점에 대한 고찰을 진행하였으며 각각의 공정에 해당되는 장점을 활용하여 향후 나아가야 할 신개념의 TSV 가공공정에 대하여 논하고자 하였다.

## 2. 본론

### 2.1 DRIE 및 레이저를 이용한 TSV 공정비교

TSV 제조공정은 크게 via-drilling, dielectric barrier & seed layer deposit, Cu plating, thinning, bumping, dicing 의 순으로 이루어져 있는데 via-drilling 및 Cu plating 이 핵심공정이다. 여기서 차세대 TSV 는 5  $\mu\text{m}$ 급의 직경의 드릴링이 요구되고 있는데 이를 가공하기 위한 방법으로서 DRIE 공정 및 레이저 가공공정이 이슈화되어 있다.

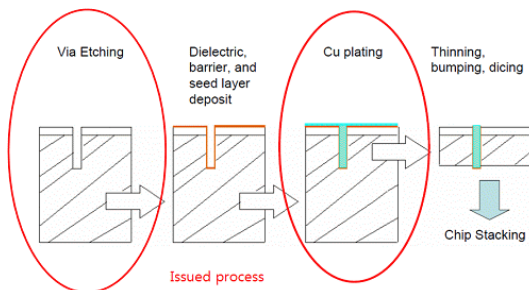


Fig. 2 Sequence of TSV process

Alcatel 사는 DRIE 를 이용한 비아홀 드릴링(via-drilling)장비를 개발하는 대표적인 업체로서 BOSCH 공법을 이용하여 작은 드릴링 직경과 높은 세장비의 via 를 가지는 드릴링 가공이 가능한 장비를 시장에 선보이고 있다. BOSCH 공정이란 기존의 RIE 에서 불가능하였던 깊은 세장비의 드릴링을 하기 위한 공정으로서 실리콘의 건식에칭시 등방성으로 가공되는 것을 막기 위해  $\text{SF}_6$  plasma 이후  $\text{C}_4\text{F}_8$  plasma 를 이용하여 폴리머 코팅을 추가하여 이방성 에칭을 유도하는 공정이다.<sup>3</sup>

DRIE 공정은 10 $\mu\text{m}$  급 이하의 미세 직경가공 및 종횡비 100 이상의 고세장비 가공이 가능한 장점을 보유하고 있지만 금속층 가공의 한계, 대면적 가공의 어려움, 낮은 깊이 균일도, 리소그래피

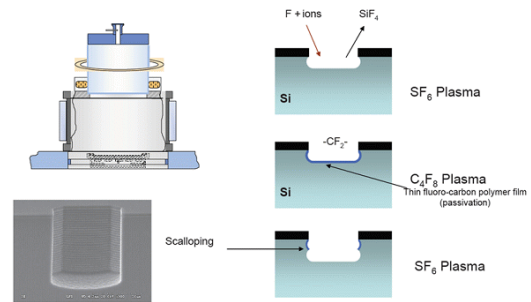


Fig. 3 BOSCH process for TSV<sup>3</sup>

공정으로 인한 공정지연, 독성가스사용으로 인한 환경오염 그리고 플라즈마로 인한 회로의 손상에 자유롭지 못한 한계가 있어 이를 보완할 수 있는 공정이 필요한 실정이다.

이에 반해 레이저 가공공정은 금속층의 가공이 가능하며 고속가공공정이며 대면적에 용이한 장점이 있으며 웨이퍼의 가장자리와 중간의 깊이 차이가 없고 리소그래피가 없어 공정이 간편하며 환경 친화적이다. 뿐만 아니라 filling 을 위한 최적의 sidewall taper 인 85° 를 제어하기 용이하여 filling 시 void 를 최소화시킬 수 있으며 DRIE 에서 문제가 되었던 독성가스를 사용하지 않고 active 층의 구조를 손상시키지 않는 장점이 있다(Fig. 4, Table 1 참조).

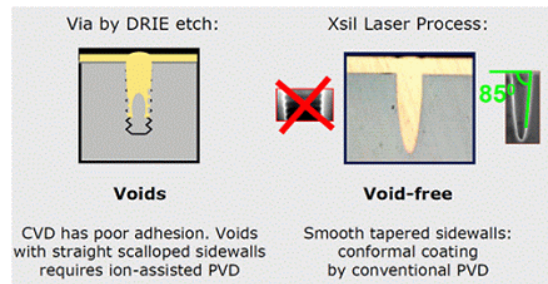


Fig. 4 Via processes by DRIE and Laser Process<sup>4</sup>

### 2.2 극초단펄스 레이저를 이용한 TSV 가공기술

레이저를 이용한 실리콘의 드릴링 공정은 DRIE 공정에 비하여 상기 설명한 장점이 있으나 단점으로서 실리콘 표면에서의 표면잔유물(surface debris) 그리고 가공부에서의 열적영향(용융물, 크랙) 및 이로 인한 10 $\mu\text{m}$  급 이하 비아 드릴링의 어려움 등이 있다.

이의 대안으로 한국기계연구원(KIMM)에서는

Table 1 Comparison of TSV process using Laser drilling and DRIE<sup>4</sup>

Laser drilling	DRIE
<b>Enables drilling through metal pads</b>	<b>Issues with metal etch</b>
High drill rates for <0.5M vias per wafer (drill rate of $>\sim 2000\text{-}2400$ vias/s)	Slow for <0.5M vias per wafer (at etch rate of $<\sim 15\mu\text{m}/\text{min}$ )
<b>300mm process is in the industry from '2005</b>	<b>300mm process in R&amp;D</b>
<b>Depth uniformity centre-to-edges</b>	<b>Centre-to-edges depth non-uniformity</b>
<b>Eliminates lithography delays &amp; costs: Via position on wafer programmable by CAD</b>	<b>Lithography process &amp; machine necessary as well as substantial photoresist striping</b>
Variable controlled Via depth in one run by control of energy and number of shots	Variable Via depth is not available during single etching step
<b>Optimal <math>\sim 85^\circ</math> sidewall taper angle without compromising drilling rate</b>	Etching speed reduced for tapered via profile: "wine glass" shape as compromise
<b>Smooth sidewalls at full drilling rate</b>	<b>Scalloped sidewalls or speed reduction</b>
<b>Void-free Cu-coating with conventional PVD</b>	<b>Voids with PVD: Ion-assist preferable</b>
<b>Room-temperature stress-free process even at fast drilling rates</b>	<b>Wafer is heated &amp; chilled for high etch rates. This could be source of stress</b>
Negligibly small assist gas usage or none	$\text{SF}_6$ & $\text{C}_4\text{F}_8$ are essential for the process
<b>Safe for structured wafers with active devices</b>	Plasma may be unsafe for active devices

최근 연구되기 시작한 가공법인 UV 극초단 펄스 레이저를 이용한 via 드릴링 공정에 대한 연구를 진행하였다.<sup>5</sup> 빛의 파장을 의미하고 있는 UV 영역은 가시광선이나 적외선(IR)영역의 파장에 높은 광자에너지를 보유하고 있어 실리콘과 같은 공유결합의 비열적 가공이 유리하며 극초단 영역의 시간을 가지는 펄스의 특징은 낮은 조사 에너지 및 높은 침투출력으로 인하여 비열적 가공공정에 유리한 장점을 보유하고 있다. 이로 인하여 극초단 펄스레이저를 이용한 재료의 가공공정은 나노초 레이저 기반의 기존의 TSV 드릴링 공정에 비하여 열영향구간이 적어 마이크로 크랙, 용융물 및 surface debris가 최소화되는 장점이 있을 것으로 예상되며 이의 검증 및 문제점 규명을 위한 실험을 진행하였다(Fig. 5 참조).

한국기계연구원에서는 UV 파장을 가지는 피코

초 레이저 및 나노초 레이저를 사용하여 실리콘의 가공특성을 비교하였으며 가공을 위한 임계에너지 값의 비교, 가공깊이 및 형상의 비교 그리고 이의 검증을 위한 열적반응 시뮬레이션을 진행하였다.

Fig. 6은 각각 피코초 및 나노초 레이저를 이용하여 실리콘 표면에 흔적이 남기 시작되는 조건인 임계 에너지값(threshold fluence)을 구하기 위한 실험에 대한 결과로서 초점크기가  $13\mu\text{m}$ 인 조건에서 주입된 임계 에너지 값은 각각  $1.57\text{J}/\text{cm}^2$  및  $54\text{J}/\text{cm}^2$ 이었다. 이는 피코초 레이저의 경우 34배 낮은 에너지로서도 가공이 가능하다는 것을 말해준다. 이와 같이 피코초 레이저의 경우 상대적으로 낮은 주입 에너지 영역에서 가공현상이 일어난 이유로서는 침투출력이 높기 때문으로 판단된다. 즉 극초단 펄스인 15ps에서 침투출력밀도는  $1\times 10^{11}\text{W}/\text{cm}^2$ 였으며 110ns의 침투출력밀도는  $5\times 10^8\text{W}/\text{cm}^2$

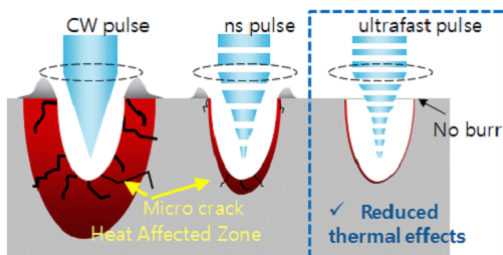


Fig. 5 Comparison for heat affection of nanosecond laser and ultrafast pulse laser process<sup>6</sup>

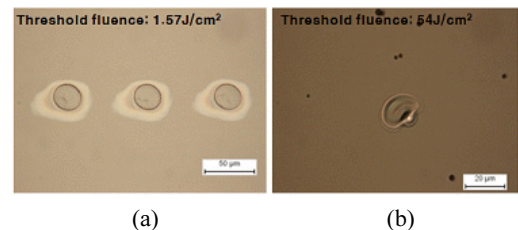


Fig. 6 Comparison pictures for dent on silicon wafers by threshold fluence using (a) picosecond and (b) nanosecond pulse laser process

로서 약 200 배 가량의 차이를 보이고 있다. 이로 인하여 피코초 레이저에 의한 실리콘의 가공은 적은 에너지의 주입만으로 이루어져 열적 영향을 최소화할 수 있을 것으로 예상하였다.

Fig. 7 은 피코초 및 나노초 레이저로 비아홀을 가공하였을 경우의 단면 비교를 위한 전자현미경 사진이다. 가공조건은 피코초 레이저의 경우 pulse duration: 15ps, pulse energy: 2  $\mu$ J, pulse cycle : 5times 및 input energy : 10  $\mu$ J 의 조건 그리고 나노초 레이저의 경우 pulse duration: 110ns, pulse energy: 20  $\mu$ J, pulse cycle : 10times 및 input energy : 200  $\mu$ J 이다. 나노초 레이저의 경우 200  $\mu$ J 의 높은 에너지가 주입된 반면 피코초 레이저에서는 5%에 해당하는 낮은 에너지의 주입만으로 가공이 가능하였다. Fig. 8 은 이의 검증을 위한 열적 시뮬레이션 결과로서 식(1) 및 식(2)를 이용한 FEM 해석결과이다. 본 시뮬레이션 결과로서는 실험결과 값과 마찬가지로 나노초 레이저의 가공인 경우 에너지의 전도가 측면방향으로 원활히 일어났으며 이로 인하여 상대적으로 큰 직경의 홀이 가공되었다. 반면 피코초 레이저의 의한 via 가공의 경우 에너지의 국부적 집중에 의한 재료의 분해로 인하여 깊이 방향으로 홀의 가공이 급격히 진행되었으며 상대적으로 작은 직경의 홀이 가공되었다. 이는 Fig. 7 에서 보여 주었던 실험결과와 일치하는 경향을 증명하고 있으며 이는 향후 예상되는 10 $\mu$ m 급 이하 via 드릴링에 있어서 매우 효과적으로 적용이 가능하다는 것을 보여주고 있다.

Fig. 9 는 피코초 및 나노초 레이저로 비아 홀(via-hole)을 가공하였을 경우의 상면 비교를 위한 전자현미경 사진으로서 가공조건은 피코초 레이저의 경우 Pulse duration: 15ps, Pulse energy: 10  $\mu$ J, Pulse cycle: 20times 및 Input energy: 200  $\mu$ J 그리고 나노초 레이저의 경우 Pulse duration: 110ns, Pulse energy: 40  $\mu$ J, Pulse cycle: 5times 및 Input energy: 200  $\mu$ J 이다.

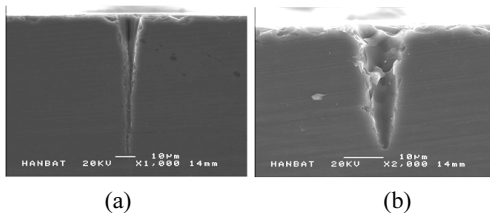


Fig. 7 SEM images of cross sectional views of drilled hole using (a) picosecond and (b) nanosecond pulse laser process

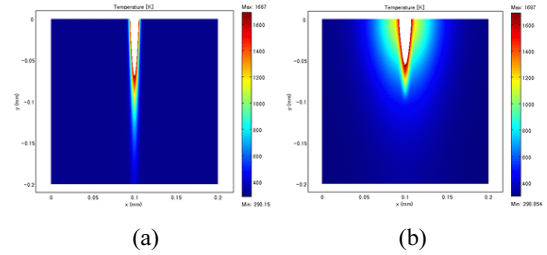


Fig. 8 Heat simulation results of cross sectional views of drilled hole using (a) picosecond and (b) nanosecond pulse laser process

$$\rho C_p \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} K \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial y} + S(x, y, t) \quad (1)$$

$$S(x, y, t) = I_0 \alpha (1 - R) \exp(-(x - x_0)^2 / r^2) \exp(-\alpha y) \{ \exp(-(t - t_0)^2 / t_p^2) + \exp(-(t - t_1)^2 / t_p^2) + \dots \} \quad (2)$$

총 주입된 에너지는 200  $\mu$ J로서 동일하게 주입되었으나 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<sup>7</sup>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 TSV와 같은 고정밀가공은 비열적 반응인 피코초 레이저를 사용해야 된다는 것을 증명하고 있다. 그렇지만 극초단 펄스 레이저를 사용했음에도 불구하고 표면에 다량 남아있는 표면잔유물(surface debris) 및 미량의 열적영향 부는 추가공정의 필요성을 제시하고 있다.

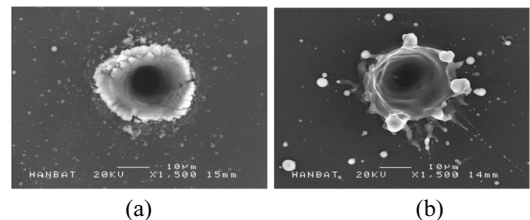


Fig. 9 SEM images of drilled hole using (a) picosecond and (b) nanosecond pulse laser process



### 2.3 하이브리드공정을 이용한 TSV 가공기술

레이저에 의한 TSV의 드릴링 공정은 기존의 DRIE 공정에 비해 금속층의 가공이 가능하며 active device에 손상을 주지 않으며 환경친화적이고 리소그래피공정이 필요없는 photomask-free 이 가능한 장점이 있지만 극초단 펄스 레이저를 사용했음에도 불구하고 측벽에 용융물이 미량으로 남아있으며 상면에 표면잔유물(surface debris) 발생하는 단점을 보유하고 있다. 반면 DRIE 공정은 레이저 드릴링에 비하여 작은 비아직경( $1\mu\text{m}$  이하 가능)이 가능하며 비아의 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 유지한채 금속층 및 실리콘층을 가공한 후 RIE 공정을 통하여 가공홀 내부의 용융층을 식각하여 측벽균일도(side wall roughness)가 우수하며 filling 시 void를 방지할 수 있는 최적의 각도제어가 가능한 가공법이다.<sup>8</sup>

즉 본 가공법은 레이저 드릴링 및 DRIE 공정의 상호간의 단점을 보완하며 장점을 보강할 수 있는 기법으로서 레이저가공의 측면에서는 PR 코팅 및 현상공정으로 상면에 형성되던 표면잔유물(surface debris)을 제거할 수 있으며 가공홀에 형성되던 열적영향(용융물, 열응력)을 제거할 수 있는 장점이 있으며 DRIE의 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. 10 참조).

### 3. 결론

본 논문에서는 MCP를 위한 웨이퍼 가공중 TSV의 드릴링에 관한 동향 및 각종기법에 대한 소개가 있었으며 한국기계연구원에서의 진행중인 극초단 펄스 레이저 드릴링 및 하이브리드 공정에 대한 소개를 하였다.

또한 환경적, 경제적 및 기술적으로 단점을 보유하고 있는 DRIE의 대체의 공정의 일환으로 피코초 레이저를 이용한 비열적 가공에 대하여 진행

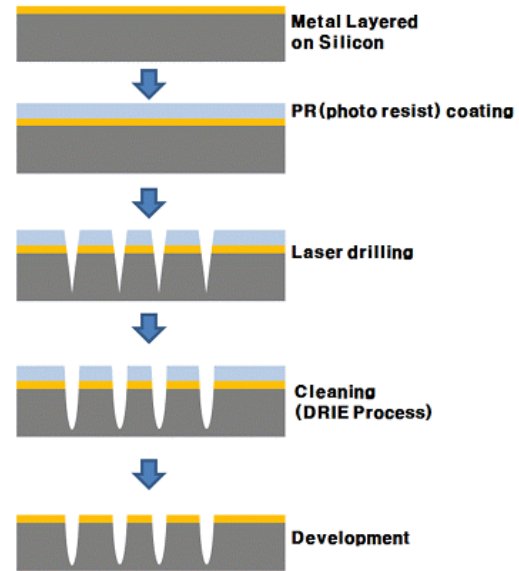


Fig. 10 Fabrication of Through Silicon Via using Hybrid process

하였고 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 선평의 가공에 적합하다는 결론을 얻을 수 있었다. 즉 피코초 레이저를 이용하면 상기 나노초 레이저를 이용한 단점의 보완뿐만 아니라 기존의 DRIE에서 가공이 불가능하였던 금속층, 폴리머층의 가공이 가능하며 테이퍼가 있어 구리의 전기도금이 유리한 장점이 있었다. 그렇지만 단점으로서 실리콘 내 공유 결합의 분해로 인하여 발생한 잔유물들을 세척해야 하는 후공정의 필요성이 대두되고 있으며 이의 해결을 위해 제시된 하이브리드 가공기술은 TSV를 위한 신공정 기술로서 기대된다. 한국기계연구원에서는 본 연구를 위한 기술적 접근을 시도하고 있으며 이의 성과는 향후 TSV 가공을 이용한 MCP 공정에 더욱 더 파급효과가 클 것으로 판단된다.

### 후 기

본 연구는 지식경제부의 협동연구개발사업의 일환인 “차세대 반도체 MCP 핵심기술 개발” 과제의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Emc3d consortium, <http://www.EMC3D.org>
2. Yole development, <http://www.yole.fr>
3. Alcatel Micro Machining Systems, <http://www.alcatelmicromachining.com>
4. Xsil, <http://www.xsil.com>
5. Lee, J., Sohn, H., Kim, J. and Shin, D., "Advanced Laser Micromachining Technology," J. of the KSPE, Vol. 23, No. 1, pp. 13-22, 2006.
6. Coherent Inc, <http://www.coherent.com>
7. Duley, "UV Lasers: effects and applications in materials science," Cambridge, pp. 148-199, 1996.
8. Shin, D., Suh, J. and Lee, J., "Fabrication of Through Silicon Via using Hybrid process," Korea Patent No. 0103681, 2009.