

펨토초 레이저를 이용한 실리콘 웨이퍼 드릴링의 공정 최적화 연구

김형원* · 기형선*[†]

*울산과학기술원 기계공학과

Process Optimization for Femtosecond Laser Hole Drilling of Silicon Wafer

Hyeongwon Kim*, and Hyungson Ki*[†]

*Department of Mechanical Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology,
Ulsan, 44919, Korea

[†]Corresponding author : hski@unist.ac.kr

(Received May 21, 2019 ; Revised June 10, 2019 ; Accepted June 20, 2019)

Abstract

Laser trepanning drilling of 200 μm -diameter through-holes in 300 μm thick silicon wafer was investigated using a 1028 nm femtosecond laser. Emphasis was placed on the optimization of hole shape using process parameters, such as pulse overlap ratio, pulse-to-pulse time interval, beam polarization, and focal position. This study showed that a low pulse overlap ratio (10%) with a moderate scan number decreases the difference between the top and bottom aperture diameters. Furthermore, a large pulse-to-pulse time interval was found to reduce the thermal effect. A circularly-polarized beam that was focused at the bottom wafer surface produced hole apertures that were closest to circles.

Key Words : Femtosecond laser drilling, Silicon wafer

1. 서 론

최근 반도체와 태양전지 산업의 급속한 발전으로 실리콘 기반 소재의 레이저 가공 연구가 늘어나고 있다. 레이저 가공은 Deep Reactive Ion Etching과 같은 기존의 공정 기술과는 달리 화학 물질을 사용하지 않아 친환경 가공기술로 분류된다¹⁾. 특히 펨토초 레이저는 높은 출력 밀도와 매우 짧은 작용시간으로 인하여 미세 구조물을 정교하고 열적 영향 없이 가공하는 것이 가능하기 때문에 실리콘 웨이퍼의 가공에 유리하다²⁾.

실리콘 소재의 다양한 레이저 가공 기술 중에서도 미세 드릴링은 핵심 기술이다. 레이저 드릴링 방법에는 percussion 드릴링, trepanning 드릴링, 그리고 helical 드릴링과 같은 방법들이 사용되고 있다. Percussion 드릴링은 고속으로 큰 aspect ratio를 가진 홀을 가공하는데 주로 사용되고, trepanning 드릴링은 레이저 빔 크기에 비하여 미세 홀의 직경이 큰 경우에 사용된다^{3,4)}.

Helical 드릴링의 경우에는 dove 프리즘을 이용하여 레이저 펄스를 나선으로 시편 아래 방향까지 도달하도록 한다. 이러한 이유로 레이저 에너지를 적은 손실로 시편 아래까지 전달할 수 있어 가공의 정밀도가 크게 향상된다^{5,6)}.

미세 홀의 품질을 개선하기 위한 연구도 많이 수행되어 왔는데, 일례로 순환되는 물 안에서 레이저 드릴링 공정을 실시하여 발생하는 spatter의 재증착을 방지하고 열적인 영향을 감소시키는 방법이 보고되었다⁷⁾. 또한 가공된 홀 주변에 달라 붙은 spatter의 제거를 위하여 PVA 물질을 소재 위에 도포함으로써 소재에 증착된 spatter를 쉽게 제거하는 연구도 진행되었다⁸⁾.

본 연구에서는 1028 nm 파장의 펨토초 레이저를 사용하여 300 μm 두께의 실리콘 웨이퍼에 200 μm 직경의 홀을 trepanning 방법을 사용하여 가공하였다. 최적 가공 조건을 얻기 위하여 레이저 펄스 에너지, 펄스 반복율, 가공 속도, 편광 조건, 레이저 초점 위치 등을 변경하여 실험을 진행하였다. 가공된 홀의 윗면과 아랫

면 그리고 단면은 전자주사현미경 (SEM)으로 측정하고 분석하였다.

2. 실험 방법

실험에 사용한 실리콘 웨이퍼는 p-타입의 300 μm 두께를 가지며, 저항은 1-10 $\Omega\cdot\text{cm}$, $\langle 100 \rangle$ 의 방향성을 가진다. 본 실험에서는 시편을 5 x 5 mm 크기로 절단하여 실험을 진행하였다. 본 실험에서는 최대 출력 15 W, 1028 nm 파장, 200 kHz의 펄스 반복율을 가지는 펄초 레이저 (Pharos 15-200-PP)를 사용하였다. 220 fs의 펄스폭을 사용하였으며, 갈바노미터 스캔 헤드 (hurrySCANII10)를 사용하여 가공을 수행하였다. 초점거리 160 mm를 가진 f-theta 렌즈를 사용하였으며, 빔은 초점에서 48 μm 직경의 가우시안 에너지 분포를 갖는다. 초점의 위치는 시편 윗면에 맞추고 진행하였다. 사용된 갈바노미터 스캔 헤드는 모터에 연결된 2 개의 거울에 의하여 최대 속도 3 m/s로 고속 가공이 가능하다. 진공을 이용하여 실리콘 웨이퍼 시편을 1.5 mm 높이에 띄워 고정함으로써 가공 시에 발생한 잔해물들이 시편에 재 증착되는 것을 방지하였다.

본 실험에서 사용한 레이저 드릴링 방법은 trepanning 방법이다. 레이저 가공 직경은 가공하고자 하는 미세 홀의 직경에서 레이저 빔 직경을 제외한 152 μm 로 설정하였다. 고효율 미세 홀 드릴링을 위하여 사용 가능한 최대 펄스 에너지를 찾아서 가공을 수행하였다. 가공에 사용한 펄스 에너지는 168 μJ 로 고정하였으며, 가공속도 및 펄스 반복율을 변경하며 최적 조건을 선정하였다 (Table 1). 갈바노미터 스캔 헤드의 최대 가공속도가 3 m/s이지만 미세 홀을 정확히 가공하기 위하여 150 mm/s를 가능한 최대 속도로 설정하였다.

두께 300 μm 실리콘 웨이퍼에 직경 200 μm 미세 홀 가공의 최적 조건을 구현하기 위하여 펄스 겹침 정도, 반복 횟수, 빔의 편광 방향, 펄스 반복율, 가공 속도,

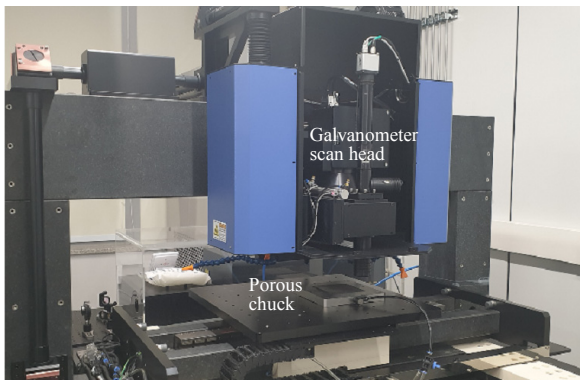


Fig. 1 Femtosecond laser microfabrication system with a galvanometer scan head and a porous chuck

Table 1 Time interval between pulses according to scanning speed and repetition rate

Scanning speed (mm/s)	Repetition rate (kHz)	Time interval between pulses (ms)
50	1.18	0.83
100	2.35	0.43
150	3.48	0.29

레이저 초점 위치를 변화시키며 가공된 홀의 형상을 분석하였다. 가공된 시편은 각각 증류수와 아세톤에 넣고 초음파분산기로 클리닝을 진행하였다. 홀의 상단과 하단의 표면은 주사전자현미경(SEM)으로 관찰하였으며, 단면 측정을 위하여 기판 절단장치(AR06DM)를 이용하여 절단하고 SEM으로 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 레이저 펄스 겹침 정도와 가공 횟수에 따른 홀 형상 변화

먼저 레이저 펄스의 겹침 정도 (pulse overlap ratio) 및 가공 횟수의 변화에 따라 가공되는 홀의 형상 변화를 분석하였다. 여기서 가공 횟수는 trepanning 드릴링에서의 레이저 빔의 회전 횟수를 의미한다. 본 연구에서 사용한 펄스 겹침 정도(OL)는 다음과 같이 정의한다⁹⁾.

$$OL = \left(1 - \frac{v}{D \cdot f}\right) \cdot 100 \quad (1)$$

여기서 v 는 가공 속도, D 는 초점에서의 빔의 직경이고 f 는 펄스 반복율이다. 본 실험에서는 가공 속도를 150 mm/s를 고정하고 진행하였다. 초점에서의 빔 직경이 48 μm 이기 때문에, 펄스 반복율을 조절함으로써 펄스 겹침 정도를 변경하는 것이 가능하다. 펄스 겹침 정도를 10 ~ 90%까지 20% 간격으로 변화시켰고, 가공 횟수는 100, 1000, 10000, 30000, 100000 회로 바뀌가며 드릴링 실험을 진행하였다. 빔은 선형으로 편광된 빔을 사용하였다.

가공된 홀의 형상이 원이 아닌 약간 타원 형태를 보였는데, 이는 선형 편광된 빔의 사용으로 기인한 것으로 판단된다. 가공된 홀의 윗면과 아랫면 직경은 각각 타원의 장축과 단축의 평균값을 계산하여 사용하였으며, 홀의 윗면 직경 대비 아랫면 직경의 비율을 계산하여 Fig. 2에 제시하였다. 두께 방향으로 홀의 직경이 균일해야 하므로, 직경의 비율이 1에 가까워야 가공된 홀의 품질이 우수한 것으로 판단할 수 있다.

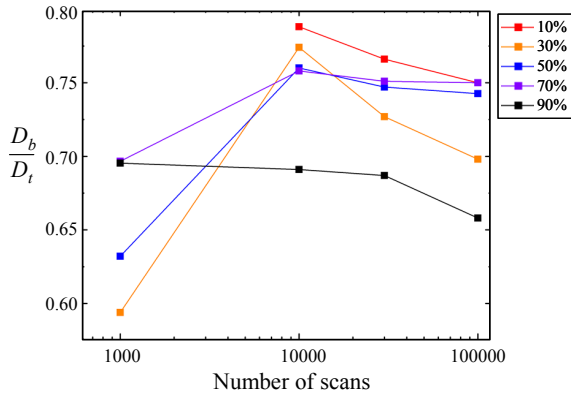


Fig. 2 Ratio of top and bottom hole diameter with different pulse overlap ratios and scan numbers

Fig. 2에서 볼 수 있듯이 가공 횟수가 100 회인 경우에는 모든 겹침 정도에서 관통 구멍 (Through hole) 이 발생하지 않았고, 1000 회인 경우, 10%의 펄스 겹침 정도에서 관통 구멍이 발생하지 않았다. 10000회 이상 가공 시에는 모든 펄스 겹침 정도에서 관통 구멍이 발생하였다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이, 10000 회보다 반복횟수가 큰 경우에는 오히려 이 비율이 더 감소한다. 즉, 가공 횟수를 계속 증가하여도 홀의 정밀도가 증가하지 않음을 알 수 있다.

Fig. 2를 보면 가공 횟수가 10,000회가 넘어서면서부터는 30% 겹침 정도를 사용한 결과가 50%, 70% 겹침 정도를 사용한 결과보다 오히려 홀의 직경 균일도가 더 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 이유를 확인하기 위해서 Fig. 3에 윗면과 아랫면에서의 홀의 직경이 가공 횟수의 변화에 따라서 어떻게 변화하는지를 그래프로 나타내었다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 아랫면에서의 홀의 직경은 모든 겹침 정도에 대하여 가공 횟수의 변화에 따라 큰 변화 없이 유지되는 반면, 윗면 직경은 30%와 50%의 겹침 정도인 경우에만 가공 횟수의 증가에 따라 크게 증가함을 확인할 수 있었다. 아랫

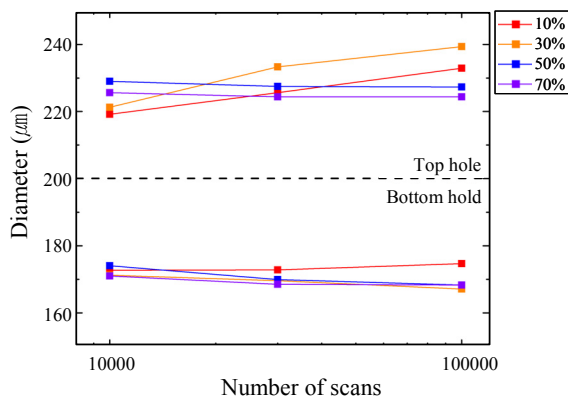


Fig. 3 Top and bottom aperture diameters versus the number of scans for different pulse overlap ratios

면 홀 직경이 유지되면서 윗면 직경이 증가하게 되면 아랫면 직경이 상대적으로 더 작아지게 되므로 직경 균일도는 더 나빠지게 된다. 이는 높은 겹침 정도에서 상대적으로 열의 누적 효과가 커서 생기는 현상으로 판단이 된다.

따라서 레이저에 의한 에너지 투입이 최소가 되는 10% 펄스 겹침 정도에서 윗면과 아랫면에서의 홀의 직경 차이가 최소가 됨을 알 수 있다. 결론적으로 trepanning 방식의 미세 홀 드릴링에는 적은 에너지를 투입하고, 최대가 아닌 최적의 반복 횟수로 가공할 때 홀의 형상 정밀도를 최대로 할 수 있음을 알 수 있다.

3.2 펄스 간 시간 간격이 가공 품질에 미치는 영향

펄드초 레이저 미세가공에서도 적절하지 못한 공정 조건을 선택하면 열적인 영향이 크게 나타나 가공 품질이 저하될 수 있다. 본 연구에서는 조사되는 펄스 사이의 시간 간격(time interval)을 변경해 가며, 펄스 사이의 시간 간격이 공정 결과에 어떤 영향을 미치는지 파악하였다. 시간 간격이 커지면 펄스 에너지가 재료 내에서 충분히 확산될 수 있어서, 열의 누적에 의한 가공품질의 저하를 줄일 수 있다.

Table 1에서 볼 수 있듯이 가공 속도와 펄스 반복율을 변화시키므로써 펄스 사이의 시간 간격을 조절할 수 있기 때문에, 이전 실험에서 선택한 최적 펄스 겹침 정도와 가공 횟수 조건을 유지하면서 가공 속도와 펄스 반복율을 조절하였다. 동일 펄스 겹침 정도에서 가공 속도를 감소시키면 펄스 반복율이 감소하고, 펄스 반복율이 감소하면 펄스 사이의 시간 간격이 증가한다.

이전 실험에서 얻은 최적 조건인 10%의 펄스 겹침 정도를 유지하면서 펄스 사이의 시간 간격을 증가시키기 위하여, 가공 속도와 펄스 반복율을 조절하며 진행하였다.

Fig. 4(a), (b), (c)는 선형 편광된 빔을 사용하여 가공하는 경우, 가공속도를 50, 100, 150 mm/s로 증가시키며 가공했을 때 얻은 홀의 윗면 사진을 비교한 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 가공 속도가 증가할수록,

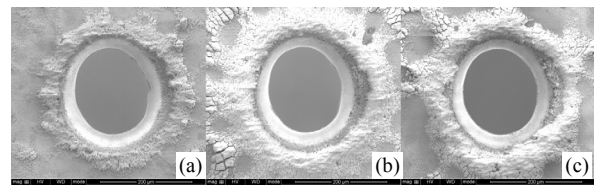


Fig. 4 SEM images of the top surface holes fabricated with a pulse overlap ratio of 10% and a scanning speed of (a) 50, (b) 100, (c) 150 mm/s using a linearly polarized beam

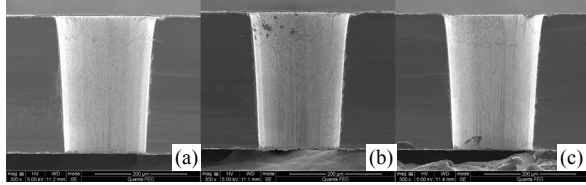


Fig. 5 Hole cross-section images corresponding to Fig. 4(a), (b), and (c). (from left to right)

즉 펄스 사이의 시간 간격이 감소할수록, 홀 주변에 열의 영향으로 생성된 부산물이 많아짐을 확인할 수 있다. 즉, 펄스 간의 시간 간격이 시편에 주입된 열이 빠져나가는데 걸리는 시간보다 길어지면 열에 의한 영향이 제거되어 미세 홀 표면의 품질이 향상된다. Fig. 5는 Fig. 4의 (a), (b), (c)에 해당하는 홀의 단면 사진을 보여준다. 속도가 감소할수록 열적 영향이 감소하여 미세한 크랙의 발생이 줄어들어 깨끗한 홀 벽면을 가짐을 확인할 수 있다.

3.3 레이저 빔의 편광 방향에 따른 홀 형상 변화

앞에서 언급했던 것처럼 선형 편광된 빔을 trepanning 방법을 사용하여 가공하였을 때 타원형의 홀이 얻어졌다. 본 연구에서는 원형 편광기(circular polarizer)를 사용하여 실험을 반복하여, 선형 편광으로 인한 가공된 홀의 비대칭형이 제거되는지 확인하였다. Fig. 6은 Fig. 4에 해당하는 조건을 사용하여 가공되, 원형 편광기를 사용하여 실험을 수행하고 얻은 결과이다. 육안으로 보기에 비대칭성이 많이 감소한 것을 확인할 수 있다. 수치적인 비교를 위해 홀의 장축, 단축의 길이 및 두 값의 평균 값을 계산하여 Fig. 7에 제시하였다. 여기서 데이터의 범위가 좁은 것은 장축과 단축의 길이 차이가 작은 것을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 원형 편광된 빔의 사용으로 상단 홀의 장축과 단축의 길이 차이가 감소함을 확인할 수 있다.

3.4 레이저 빔 초점 위치에 따른 홀의 형상 변화

레이저 드릴링 방법 중 trepanning 드릴링과 heli-

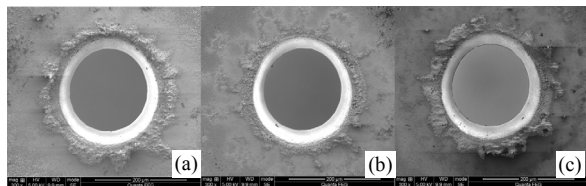


Fig. 6 SEM images of the top surface holes fabricated with a pulse overlap ratio of 10% and a scanning speed of (a) 50, (b) 100, (c) 150 mm/s using a circularly-polarized beam

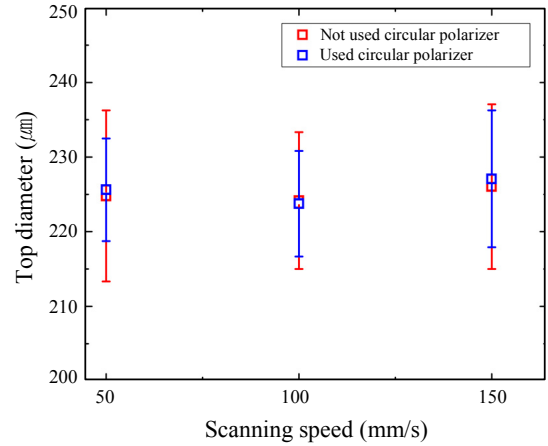


Fig. 7 Difference between major and minor axes of top hole apertures obtained with and without a circular polarizer

cal 드릴링 방법의 차이는 레이저 초점의 이동 여부이다. Trepanning 드릴링의 경우, 레이저 초점이 고정되어 있고 helical 드릴링의 경우, 레이저 초점이 빔 경로에 따라서 시편 표면에서 바닥으로 이동한다. 즉, helical drilling을 사용하면 시편 표면부터 바닥까지 효율적으로 가공이 가능하다⁵⁾. 하지만 helical drilling을 진행하기 위해서는 dove 프리즘과 갈바노미터 스캔 헤드의 연동이 필요하다⁶⁾.

본 연구에서는 trepanning 드릴링에서 초점의 위치가 홀의 형상에 미치는 영향을 파악하기 위하여, 초점의 위치를 시편의 윗면과 아랫면에 각각 맞추고 실험을 진행하였다.

Fig. 8은 원형 편광된 빔을 사용하여 드릴링 공정을 진행 하였을 때, 초점의 위치에 따른 홀의 윗면과 아랫

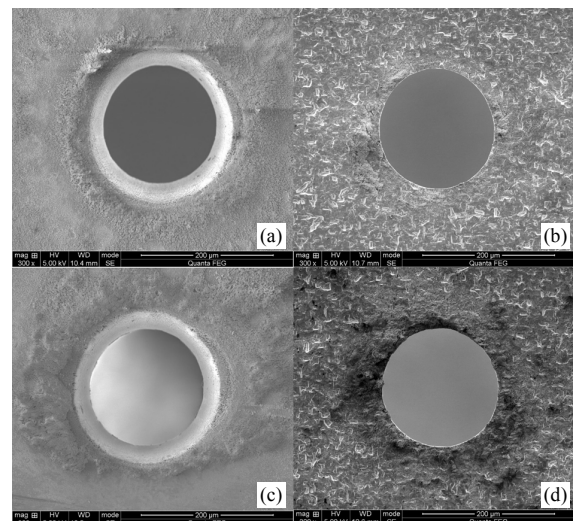


Fig. 8 Comparison of the top (a, c) and bottom (b, d) hole apertures obtained with the focal position located at the top (a,b) and bottom (c,d) surfaces.

면 형상을 비교한 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 초점을 아랫면에 맞춘 경우에 홀의 입구와 출구에서의 장축과 단축의 차이가 감소함을 확인할 수 있다.

보다 정량적인 비교를 위하여 원형 편광된 빔으로 50, 100, 150 mm/s의 세 가지 속도로 홀을 가공하였을 때, 초점의 위치에 따라 시편 윗면과 아랫면에서의 홀의 장축과 단축의 길이를 측정하여 Fig. 9에 제시하였다. 여기서 적색이 윗면에 초점을 맞추었을 때 얻은 결과이며, 청색이 아랫면에 초점을 맞추었을 때 얻은 결과이다. 중간점의 점선을 기준으로 위쪽은 윗면 홀의 측정 결과이고 아래쪽은 아랫면 측정 결과이다. Fig. 9에서 확인할 수 있듯이, 아랫면에 초점을 맞춘 경우에는 가공 속도에 관계없이 원형에 가까운 홀을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 세 가지 속도 조건에서 평균적으로 상단 홀의 장, 단축 차이는 2.5 μm 이고 하단 홀의 경우는 1.5 μm 로 거의 원에 가까운 형상을 가진다.

Fig. 10은 편광 형태와 초점의 위치 변화에 따라 가

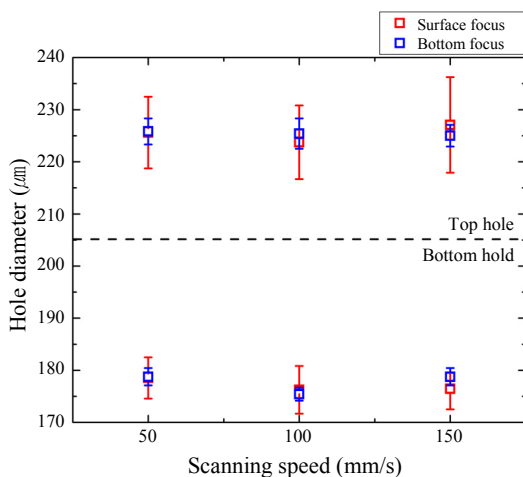


Fig. 9 Major and minor axis lengths of the drilled holes measured at the top and bottom specimen surfaces

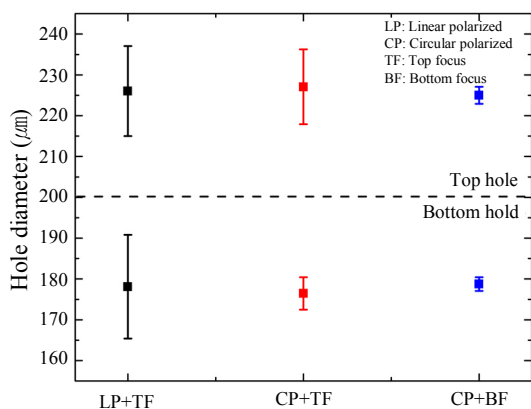


Fig. 10 Effect of beam polarization and focal position on the major and minor axis lengths of the drilled holes

공된 홀의 장축과 단축의 차이가 어떻게 변화하는가를 홀의 윗면과 아랫면에서 측정하여 비교한 결과이다. 선형 편광된 빔을 시편 윗면에 집중하는 경우에는 장축과 단축의 차이가 크게 나타나, 원형 편광된 빔을 사용하는 경우에는 차이가 많이 줄어들음을 알 수 있다. 원형 편광된 빔을 시편 아랫면에 집중하는 경우에는 위, 아랫면에서 모두 원에 근접한 홀 형상을 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

펄스 레이저에 연동된 스캐너 시스템을 이용하여 실리콘 웨이퍼에 trepanning 방식의 드릴링 공정 최적화 연구를 수행하였다. 본 연구를 통하여 원형 편광된 빔의 초점을 시편 하단에 위치시킨 후 저속으로 가공할 경우 최적의 홀 형상을 얻을 수 있음을 확인하였다. 또한 저속 가공이 열적 영향을 감소시키고, 낮은 겹침 정도와 적절한 횡수의 반복 가공이 우수한 홀 형상을 얻는데 도움이 됨을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행되었습니다. (NRF-2017R1A2B2009942)

ORCID: Hyeongwon Kim: <https://orcid.org/0000-0002-9646-1447>
 ORCID: Hyungson Ki: <https://orcid.org/0000-0003-3602-2036>

References

1. Tom Jiang and Shijian Luo, 3D Integration-Present and Future, *Proc. of the 10th Electronics Packaging, Technology Conference*, 1(3) (2008), 373-378
<https://doi.org/10.1109/EPTC.2008.4763463>
2. KATHERINE C. PHILLIPS, HEMI H. GANDHI, ERIC MAZUR, S. K. SUNDARAM, Ultrafast laser processing of materials: a review, *Advances in Optics and Photonics*, 7(4) (2015), 7(4) (2015), 684-712
<https://doi.org/10.1364/AOP.7.000684>
3. W.T.Hsiao, S.F. Tseng, C. K. Chung, K. C. Huang, M. F. Chen, Effects of macro- and micro-hole milling parameters on Al₂O₃ ceramics using and ultraviolet laser system, *International Conference on Optics in Precision Engineering and Nanotechnology (icOPEN2013)*, *Proc. SPIE 8769* (2013), 87693L
<https://doi.org/10.1117/12.2018981>
4. P. Laakso, R. Penttilä, P. Heimala, Effect of Shot Number on Femtosecond Laser Drilling of Silicon, *JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, 5(3) (2010), 273-276
<https://doi.org/10.2961/jlmn.2010.03.0017>
5. Hermann Uchtmann, Chao Hea, Arnold Gillnera, High

- precision and high aspect ratio laser drilling Challenges and Solutions, *Proceedings, High-Power Laser Materials Processing: Lasers, Beam Delivery, Diagnostics, and Applications V*, 9741 (2016), 974106
<https://doi.org/10.1117/12.2222662>
6. C. Fornaroli, J. Holtkamp, A. Gillner, Laser-beam helical drilling of high quality micro holes, *Physics Procedia*, 41 (2013), 661-669
<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2013.03.130>
7. L.M. Wee, E.Y.K. Ng, A.H. Prathama, H. Zheng, Micro-machining of silicon wafer in air and under water, *Optics & Laser Technology*, 43(2) (2009), 62-71
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2010.05.005>
8. Nam Sung Kim, Young Dae Chung, and Chun Yah Seong, Laser Micro-drilling of Sapphire/silicon Wafer using Nano-second Pulsed Laser, *Journal of the Korean Society for precision Engineering*, 27(2) (2010), 13-19
9. Frank SIEGEL, Ulrich KLUG, Rainer KLING, Extensive Micro-Structuring of Metals using Picosecond Pulses Ablation Behavior and Industrial Relevance, *JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, 4(2) (2009), 104-110
<https://doi.org/10.2961/jlmn.2009.02.0006>