

펨토초 레이저 어블레이션을 이용한 Si 웨이퍼의 미세 관통 홀 가공

김주석 · 심형섭 · 이성혁 · 신영의*

중앙대학교 기계공학부

Femto-second Laser Ablation Process for Si Wafer Through-hole

Joo-Seok Kim, Hyung-Sub Sim, Seong-Hyuk Lee and Young-Eui Shin*

Dept. of Mechanical Engineering, Ching-Ang University, Seoul 156-756, Korea

초 록: 본 논문에서는 펨토초 레이저를 사용하여 정밀하고 효과적인 레이저 어블레이션 작업이 가능함을 확인하기 위한 수치 해석 및 가공 작업을 수행하였다. 이를 위하여 Si 재료 내부의 에너지 전달 메커니즘에 대한 수치해석을 실시하였으며, Si 웨이퍼에 각각 다른 조건으로 적용된 레이저 플루언스 값으로 100 μm 직경의 미세 관통 홀을 형성한 후, 광학현미경과 3차원 표면 형상 측정 장비를 사용하여 형성된 미세 관통 홀의 가공성과 열영향부의 발생 정도를 관찰하고 분석하였다. 실험 결과를 통해 레이저 플루언스 조건에 따른 열영향부의 발생 정도를 분석하였으며, 또한 최소한의 열영향부를 가지며 우수한 홀 가공성을 보이는 최적의 미세 관통 홀 가공 조건을 도출하였다.

Abstract: The main objectives of this study are to investigate the micro-scale energy transfer mechanism for silicon wafer and to find an efficient way for fabrication of silicon wafer through-hole by using the femtosecond pulse laser ablation. In addition, the electron-phonon interactions during laser irradiation are discussed and the carrier number density and temperatures are estimated. In particular, the present study observes the shapes of silicon wafer through-hole with 100 μm diameter and it also measures the heat-affected area and the ablation depths for different laser fluences by using the optic microscope and the three-dimensional profile measurement technique. First, from numerical investigation, it is found that the nonequilibrium state exists between electrons and phonons during laser irradiation. From experimental results, it should be noted that the heat-affected area increases with laser fluence, and the optimal conditions for through-hole formation with minimum heat affected zone are finally obtained.

Key words: Femto-second Laser, Laser ablation, Laser Fluence, Through-hole

1. 서 론

패키징 기술(packaging technology)이란 반도체 부품을 작고 효율적으로 기계적, 전기적으로 조립하는 기술을 말하며, 가까운 일본에서는 실장이라는 의미로 반도체, 전자부품, 반도체 패키지, 프린트 배선판, 설계 등 각각의 기술을 유기적으로 연결해 최적화하는 시스템 설계의 총합이라고 정의

하고 있다. 매우 작은 공간에서 고기능, 다기능의 임무를 수행하고, 경제성과 더불어 고 신뢰도를 유지 하는 것이 패키징 기술의 목표라 할 수 있다^{1,2)}. 경. 박. 단. 소화 되어가는 전자제품, 예를 들어 첨단 전자 멀티미디어 휴대기기 및 디스플레이 부품의 패키징 공정에서 그 응용이 가장 증가하고 있는 것이 플립칩 접합 기술이다. 이는 작은 패키징 면적을 차지하고 기존의 와이어 본딩(wire

*Corresponding author
E-mail: shinyoun@cau.ac.kr

bonding)과 비교하여 인덕턴스를 1/10로 줄일 수 있다는 장점이 있으나, 더 이상의 미세피치와 고집적화를 구현하기 힘든 한계에 도달하고 있다³⁾.

이러한 문제점을 극복하기 위한 새로운 패키징 방법으로, 기판 위에 칩을 z축 방향으로 여러 개를 적층시켜 접합시키는 3차원 적층 실장기술이 대두되고 있다. 3차원 적층 실장기술은 여러 개의 칩 간의 전기신호 교환과 접합을 위해 Si 칩에 미세 관통 홀을 형성한 후 그 안에 Cu를 채워 상부와 하부의 전극을 연결함으로써, 이를 통해 전기적 신호의 교환이 가능하게 한 후 각 칩을 범프(bump)를 이용하여 접합하는 방식을 취하게 된다^{4,5)}. 이는 최단의 배선장에 의한 신호 처리의 고속화는 물론 기판 단위 면적당 Si의 효율이 향상되며 이로 인한 소형화로 시스템의 미세화, 저 전력화를 도모할 수 있다. 최근 들어 3차원 적층 실장 공정 중에 첫 번째 단계인 Si 웨이퍼에 미세 관통 전극 홀을 형성하는 방법으로 레이저 어블레이션(laser ablation)방식을 적용한 공정이 주목받고 있다. 레이저를 이용한 미세 관통 홀 형성방법은 또 다른 가공방법 중 하나인 반응성 이온 에칭(reactive ion etching)방법과는 달리 비접촉식이며, 가공위치를 임의로 결정할 수 있고, 조건에 따라 미세관통 홀의 직경 또한 임의로 결정할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 레이저를 통해 Si 웨이퍼가 기화되는 과정에서 Si 칩의 열 손상이 발생하는 문제점을 안고 있다.

본 연구에서는 우수한 미세 관통 홀 가공성을 실현하고, 레이저로 인한 Si 웨이퍼의 열 손상 문제를 최소화하는 최적의 가공 조건을 찾기 위한 수치해석 및 실험을 실시하였다. 이를 위하여 극초단(ultra-short duration) 펨토초 레이저(femto-second laser)를 사용하여 Si 웨이퍼에 직경 100 μm 의 미세 관통 홀을 가공하였다. 특히 레이저의 펄스 에너지(pulse energy) 조건을 달리하여, 이와 어블레이션 가공도 및 열 손상에 대한 관계를 분석하고 검토하였다.

2. 이론적 배경 및 수치해석

실험에 앞서 레이저를 이용한 미세 관통 홀 가공을 위해 우선적으로 레이저 종류의 선택이 고려되었다. 레이저 펄스의 지속 시간(pulse duration

time)을 고려할 때, 펨토초(femto-second) 레이저는 기존의 나노초(nano-second) 또는 피코초(pico-second) 레이저를 사용하여 가공할 때 나타나는 높은 열전도성, 낮은 용융온도 등의 문제점에 대하여 개선된 가공 결과를 보여주며, 무엇보다 보다 정밀하고 간편한 공정으로 작업이 가능하다는 장점을 지니고 있다.

미세 관통 홀 가공에 있어서 펨토초 레이저를 사용한 경우, 피코초 레이저의 경우와 비교하여 가공 표면이 거칠어지고 변형되는 현상이 거의 발견되지 않는다. 이는 레이저 펄스의 지속시간이 가공 재료의 전자 냉각 시간 및 격자조직의 가열시간보다 짧은 특징으로 인하여 가공 재료의 용융과 정 없이 바로 기화가 이루어지기 때문이다. 다만 용융과정 없이 바로 기화가 이루어지는 과정에서 미세한 파편(debris)이 발생하는 단점이 지적되고 있다⁶⁾.

극초단 펄스레이저가 조사되는 동안의 재료내부의 에너지 전달 메커니즘을 살펴보면, 극초단 펄스레이저의 광자(photon)에 의한 복사에너지가 Si 재료에 흡수되면서 Si 내에서 전자-정공쌍(electron-hole pair)의 전달자가 발생한다^{7,8)}. 레이저의 광자에 의해서 발생된 에너지 전달자(energy carrier)는 흡수한 에너지를 전달자와 격자간의 산란 과정을 통해 격자내의 포논(phonon)으로 전달하고 격자의 온도를 상승시키게 된다. 이 때, 전달자의 산란시간 스케일(scattering time scale)은 약 10~50 fs(10^{-15}sec)인 반면 전달자와 포논 사이의 에너지 완화시간은 Si의 경우 약 0.5 ps(10^{-12}sec)이다⁹⁾. 따라서 아주 짧은 시간 내에 많은 양의 포논에너지가 흡수되는 경우 전달자와 포논간의 에너지 완화 시간 스케일의 차이로 인해 레이저가 조사되는 초반부에 전달자의 온도가 격자온도에 비해 급격하게 상승하는 비평형(nonequilibrium) 현상이 발생한다. 따라서 본 연구에서는 전달자와 격자간의 국부적인 비평형 현상이 발생하는 경우에 대한 볼츠만 수송방정식(Boltzmann Transport Equation)으로부터 유도된 2-온도 모델을 이용하여 펨토초 레이저와 피코초 레이저의 에너지 전달 현상에 대해 이론적 해석을 수행하였다. 일반적으로 2차원 2-온도 모델은 완화시간(relaxation time) 가정과 격자내의 음향 포논(acoustic phonon)과 광학 포논(optical phonon)이 열적 평형 상태에 있다는 가정

을 통해서 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{\partial U_c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_c \frac{\partial T_c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_c \frac{\partial T_c}{\partial z} \right) - \frac{3N\kappa_B}{\tau_{c-l}} (T_c - T_l) + \dot{q}_{tot} \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_l}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_l \frac{\partial T_l}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_l \frac{\partial T_l}{\partial z} \right) - \frac{3N\kappa_B}{\tau_{c-l}} (T_c - T_l) \quad (2)$$

여기서 U_c 와 U_l 는 각각 전달자와 격자의 내부 에너지(internal energy)를 나타낸다. 그리고 T_c 와 T_l 는 시간에 따른 전달자 온도와 격자의 온도, k_c 와 k_l 는 전달자와 격자의 열전도도(thermal conductivity), N 은 전달자의 수밀도(carrier number density), τ_{c-l} 는 전달자와 격자간의 에너지 이완 시간(0.5 ps), \dot{q}_{tot} 는 레이저의 흡수되는 포톤 에너지를 의미한다. 또한 x 와 z 는 재료의 표면 방향과 표면에 수직인 깊이 방향을 의미한다. 펄스 레이저와 피코초 레이저가 조사되는 극 초반부의 에너지 전달 현상에 대해서 비교하기 위해서 식 (1)과 (2)를 유한 체적법(finite volume method, FVM)을 통해 차분 방정식을 유도하였다.

Fig. 1은 피코초 레이저와 펄스 레이저의 시간에 따른 Si 표면에서의 전달자와 격자 온도 변화를 보여준다. 펄스 지속시간과 에너지 이완시간간의 연관성 때문에 피코초 레이저와 펄스 레이저 사이의 전달자와 격자 온도의 비평형 현상이 다른 경향을 보인다. 펄스 레이저의 경우 피코초 레이저에 비해 전달자와 격자간의 비평형 현상이 더

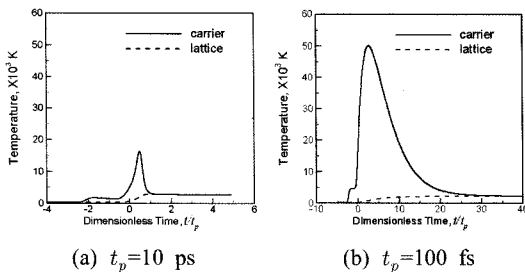


Fig. 1. The pulse duration effect on the electron and lattice temperatures for silicon film at the center.

크게 나타나고 오래 지속됨을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 펄스 지속시간이 짧을수록 가공 표면을 통해 더 많은 포톤 에너지가 순간적으로 흡수되기 때문이다. 따라서 펄스 레이저는 재료를 가공하는데 비열적인 특성에 의한 가공이 가능하다. 그리고 수치해석 결과로부터 펄스 레이저를 이용하여 가공하였을 때 펄스 당 가공 깊이는 대략 142 nm 정도인데 비해 동일한 에너지를 가진 피코초 레이저의 경우 약 76 nm로 조사되었다. 또한 펄스 레이저가 피코초 레이저에 비해서 높은 가로세로비 가공에 유용하다는 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 펄스 레이저는 Si 웨이퍼를 가공할 때 열 영향을 최소화할 수 있고 높은 가로세로비 가공이 가능하기 때문에 마이크로 홀 가공을 하는데 매우 유용하다고 판단된다.

3. 실험방법

3.1 미세관통홀 가공

가공 재료는 3차원 패키징에 적용되는 칩의 재료인 Si 웨이퍼를 15x15x0.52 mm의 크기로 절단(sawing)하여 시편으로 사용하였다. 웨이퍼의 결정 성장 방향은 (100)이며, 가공면의 표면이 연마되어 있는 폴리시드(polished) 웨이퍼를 사용하였다. C사의 펄스 레이저 가공 장비(CPA-2061)를 사용하여 Si 웨이퍼에 지름 100 μm의 미세 관통 홀을 가공하였다. 레이저의 펄스 에너지의 변화에 따른 Si 웨이퍼의 가공도와 손상정도를 비교하기 위하여, 장비의 상용 출력값 250 mW을 기준으로 10 mW에서 250 mW까지 30 mW의 간격으로 10, 40, 70, 100, 130, 160, 190, 220, 250 mW 총 9단계의 서로 다른 출력 조건을 설정하였다. 나머지 가공조건으로 레이저의 펄스 반복 주파수(repetition

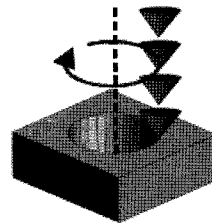


Fig. 2. Trepanning method.

rate)는 3kHz, 고정된 펄스 반복 주파수를 기준으로 최대 출력 조건인 250mW에서의 펄스 에너지는 약 0.085mJ, 펄스 지속시간(pulse duration time) 및 파장(wavelength)은 각각 150fs 와 780 nm의 값으로 설정하였다.

Fig. 2에는 미세 관통 홀을 가공하기위한 레이저 조사 방법(irradiation method)으로 선택한 trepanning 방법을 나타내었다. trepanning 방법은 재료에 조사되는 레이저의 직경을 가공하고자 하는 관통 홀의 직경보다 상대적으로 작게 설정하여, 동심원 궤적을 그리며 가공이 이루어진다. 다른 레이저 조사 방법으로는 홀의 직경과 레이저의 직경을 동일하게 설정하고 고정된 한 지점에서 레이저를 반복해 조사하여 가공하는 percussion 방법이 있다. 두 방법의 가장 큰 차이점은, 동일한 에너지가 주어지는 가공 조건에서 레이저의 직경이 상대적으로 작은 trepanning 방법이 percussion 방법보다 상대적으로 높은 단위 면적당 에너지로 가공이 이루어진다는 점이다. 따라서 높은 어블레이션 효율을 보이며, 정밀하고 깨끗하게 가공이 이루어지는 trepanning 방법을 레이저 조사 방법으로 적용하였다. 실제 실험 공정에서는 레이저 빔을 회전하는 대신 3축 스테이지(stage)를 가진 레이저 워크스테이션을 회전하는 방식이 적용되었다. 시료 표면에 입사되는 레이저 빔의 직경은 28 μm 로 설정하고, 초점의 위치는 시료 표면 높이에서 고정되었다. 가공 궤적의 직경은 86, 78, 70, 62, 54, 46, 38, 30, 22, 14 μm 의 크기로, 순차적으로 홀 중심부 기준으로 해칭(hatching) 간격 4 μm 씩 이동하며 0.3 mm/s의 속도로 가공하였다. 이런 가공 작업을 총 5회 반복하여 최종적으로 지름 100 μm 의 미세 관통 홀을 형성하였다.

미세 관통 홀 가공시 각각 다른 조건으로 적용되는 레이저의 펄스 에너지 값을, 앞서 언급한 모든 가공 조건들을 고려하여 단위 면적당 에너지를 의미하는 플루언스(fluence) 값으로 환산하면 각각 0.40, 1.65, 2.90, 4.15, 5.40, 6.65, 7.90, 9.15, 10.4 J/cm²로 나타낼 수 있다. 총 4개의 시편을 상온(22°C)의 일반 공기 분위기에서 제작하였으며, 하나의 시편 당 서로 다른 플루언스 조건에서 가공한 직경 100 μm 의 미세 관통 홀 9개를 1 mm 피치로 가공하였다.

3.2 가공면 및 열영향부 관찰

펄스 레이저를 사용하여 가공된 미세 관통 홀의 가공면을 비교, 분석하기 위하여 가공 표면 및 단면 형상을 관찰하였다. 관통 홀의 표면 형상은 K사의 광학현미경(VHX-Z450)을 사용하여 관찰하였다. 관통 홀 가공 직후 어블레이션 과정 중에 생성되어 Si 웨이퍼 표면에 부착된 미세 파편들의 발생량과 분포도를 확인하고, IPA(iso-propyl alcohol)용액으로 초음파 세척 공정을 통해 파편 등의 이물질을 제거한 후에 다시 한 번 가공 표면을 관찰하였다. 또한, 플루언스 조건에 따른 미세 관통 홀의 입구 및 측벽 형상의 차이를 비교하기 위해 FESEM(field emission scanning electron microscope, S-4700)을 사용하였다. 그리고 플루언스 조건별 Si 웨이퍼의 어블레이션 깊이 및 단면 형상을 관찰하기 위해, 시편을 에폭시 수지로 몰딩하고 #2000 SiC 연마지에서 연마하여 광학현미경으로 단면 관찰을 실시하였다. 이를 통해 조건을 달리한 플루언스 값에 대한 Si 웨이퍼의 어블레이션 깊이를 분석하여 플루언스 조건 대비 어블레이션 가공도의 추세를 살펴보았다.

미세 관통 홀 주변에 형성된 열영향부를 관찰하고 분석하기 위하여, 0.01 μm 의 분해능을 구현하는 K사의 초심도 3차원 형상측정 분석기(VK-9500)를 사용하였다. 해당 장비의 3차원 표면 프로파일 계측 기능을 이용하여 가공 홀 입구 주변의 변형된 열영향부를 관찰하였다. 각 조건별로 가공된 시편의 미세 관통 홀 주변의 열영향부의 넓이를 계산하고, 관통 홀 입구 주변의 36지점을 선택하여 Si 웨이퍼의 열변형에 의한 높이 변화를 측정하고 3차원으로 분석하였다. 이를 통해 플루언스 조건의 변화에 따른 열영향부의 넓이변화 및 높이변화의 연관성을 비교, 분석해 보았다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 표면 관찰 및 분석

Fig. 3은 미세 관통 홀 가공 직후, 광학현미경으로 관찰한 시편의 세척 전, 후의 표면 형상을 나타내었다. Fig. 3의 결과를 통해, 미세 관통 홀 가공 시 어블레이션 과정 중에 발생되어진 파편들이 관통 홀을 중심으로 Si 웨이퍼 표면에 광범위하게 흩어져서 부착되어진 것을 확인하였다. 또한 관통

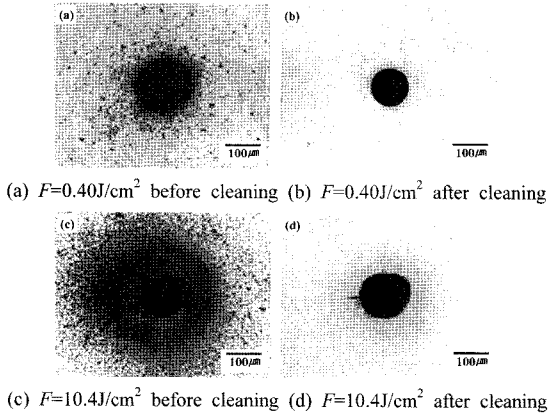


Fig. 3. Images of the surface of through-hole ($t_p=150\text{fs}$, $\lambda=780\text{ nm}$).

홀의 입구 주변부에서 눈에 띄게 검게 그을린 자국이 관찰되었다. 플루언스 조건이 증가함에 따라 발생하는 파편들의 양은 조금씩 증가하였으며, 검게 그을린 자국 또한 그 직경이 점차 커지는 형상을 보였다. Fig. 3(a)와 Fig. 3(c)에서 관찰한 시편에 대한 세척작업 이후의 관찰 결과를 Fig. 3(b) 및 Fig. 3(d)에 각각 나타내었다. 세척 이전의 시편에서 관찰되었던 가공 홀 중심부의 그을음과 Si 웨이퍼 표면에 흩어져 부착되었던 파편들은 세척 이후 대부분 말끔히 제거되었다. 그러나 그을린 흔적이 있었던 관통 홀의 가장자리 부분은 웨이퍼 표면이 다른 부위와는 달리 매끄러운 상태로 남아

있지 않고, 거칠어지고 희미하게 변색되어 있었다. 이는 레이저 어블레이션 과정에서 비롯된 열영향 부로 판단되며, 플루언스 값이 증가함에 따라 그 영역이 조금씩 증가하는 경향을 나타내었다.

Fig. 4에는 세척된 시편을 FESEM을 사용하여 관통 홀의 표면 및 측벽과 홀 주변부를 관찰한 결과를 나타내었다. 관통 홀의 왼쪽 부분에서 공통적으로 관찰되는 직선 모양의 흔적은 홀의 연속된 가공 공정 중 레이저 조사 시간과 스테이지 이동 시간 설정의 오차로 인하여 생긴 것이며, 해당 부위에 대한 관찰 및 분석은 실시하지 않았다. 서로 다른 조건으로 적용된 플루언스 값과 상관없이, 모든 조건에서 미세 관통 홀의 직경은 $100\pm 1\ \mu\text{m}$ 의 값을 나타내며 높은 가공 정밀도를 나타냈다. 그러나 관통 홀의 내부 측벽 및 입구 부분의 형상은 플루언스 조건에 따라 다소 차이를 보였다. 플루언스 조건이 높을수록 관통 홀의 측벽이 상대적으로 매끄럽게 가공되어진 것을 확인할 수 있었으나 그 차이는 크지 않았다. 반면에 관통 홀 입구 주변부의 관찰 결과, 높은 플루언스 조건으로 가공되어진 시편일수록 돌기 형상의 변형된 부위들의 크기와 개수가 눈에 띄게 증가하는 것이 관찰되었다. 앞서 관찰한 내용과 분석을 통해, 약 $4\ \text{J}/\text{cm}^2$ 내외의 플루언스 조건이 가장 양호한 측벽 가공도를 보이며, 홀 주변의 열영향부도 최소화할 수 미세 관통 홀을 가공 조건인 것으로 판단된다.

4.2 단면 관찰 및 분석

Fig. 5는 광학현미경으로 관찰한 플루언스 조건 $F = 2.90, 4.15$ 및 $5.40, 6.65\ \text{J}/\text{cm}^2$ 에서 가공된 미세 관통 홀의 단면 형상을 보여준다. 관통 홀의 단면은 홀의 입구부터 거의 수직에 가까운 형상이 관찰되었으며, 앞서 Fig. 4에서 확인했듯이 홀 입구의 확장 없이 $100\ \mu\text{m}$ 의 일정한 직경을 유지하는 관통 홀을 형성하였다. 이는 trepanning 방법을 적용하여 홀의 직경보다 훨씬 작은 직경의 레이저 펄스를 사용하여 반복적인 가공이 이루어졌기 때문에, Fig. 5(b)의 결과와 같이 가로세로비 1 : 4 정도에서도 수직에 가까운 우수한 홀 가공도를 나타내는 것으로 판단된다. 그러나 관통 홀 입구의 반대편 끝부분 형상은 입구 부분에 비해 홀의 직경이 점점 좁아지고 어블레이션 깊이가 깊어지는 형상을 나타내었다. 이는 본 연구에 적용된 trepan-

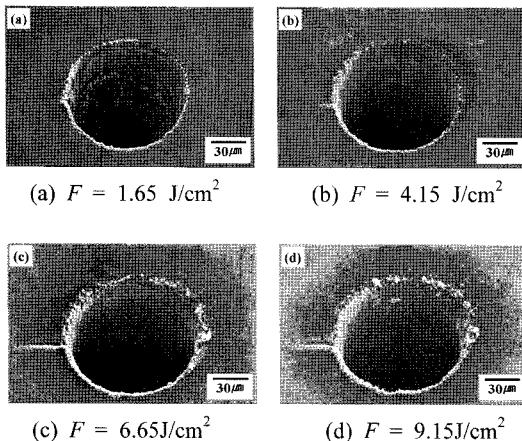


Fig. 4. SEM micrographs showing the hole's crater shape ($t_p=150\text{fs}$, $\lambda=780\text{ nm}$).

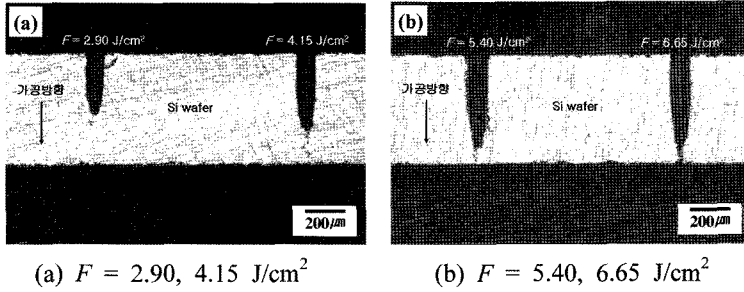


Fig. 5. Cross-section of through-holes at different fluences ($t_p=150fs$, $\lambda=780nm$).

닝방법의 가공 조건을 고려할 때, 가공체적의 해칭간격에 비해 이를 지나는 레이저의 직경이 상대적으로 컸기 때문인 것으로 판단된다. 관통 홀 외곽부에서 중심부로 이동하는 가공체적을 따라 레이저가 중심부로 갈수록 중복되어 조사되었기 때문에, 그만큼 펄스에너지가 더 전달되어 그러한 어블레이션 형상을 나타낸 것으로 판단된다. 그리고 레이저 빔의 초점이 웨이퍼 표면에 고정된 상태에서 가공되기 때문에, 가우시안 곡선(gaussian curve)의 형상을 갖는 레이저 펄스의 특성 역시 반영되었을 것으로 판단된다. 따라서 입구와 출구가 동일한 직경을 갖는 완전한 미세 관통 홀을 얻기 위해서는, 레이저 빔의 직경을 고려하여 레이저가 특정 부분에 중복되어 조사되지 않도록 적절하고 이상적인 가공체적을 설정해야 할 것으로 판단된다. 또한, 어블레이션 깊이가 깊을 경우에는 이와 연동하여 레이저의 가공 초점 깊이를 변화시키며 가공하는 방법도 고려할 수 있다.

Fig. 6에는 플루언스 조건별로 측정된 어블레이션 깊이의 평균값을 나타내었다. 측정된 어블레이션 깊이는 홀의 입구부와 끝부분의 양 끝점을 기준으로 측정되었다. 본 연구에서 적용된 조건으로 직경 100 µm의 미세 관통 홀 가공 시, 약 6~7 J/cm²의 플루언스 조건에서 520 µm 두께의 Si 웨이퍼를 관통하기 시작하는 것으로 확인되었다. 그리고 각 조건별로 측정된 어블레이션 깊이의 평균값 추세를 분석한 결과, 저 플루언스 영역과 고 플루언스 영역 간에 큰 차이를 보이지 않는 것을 확인하였다.

4.3 열영향부 관찰 및 분석

여러 플루언스 조건으로 형성된 미세 관통 홀 주변의 열영향부를 관찰하고 비교하기 위하여, 초심도 3차원 형상측정 분석 장비를 사용한 표면 계측을 실시하여 레이저에 의해 변형된 열영향부의 면적과 높이 등을 관찰하고 분석하였다.

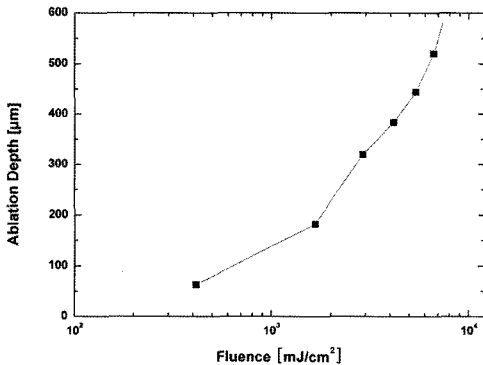


Fig. 6. Variation of ablation depth with fluences ($t_p=150fs$, $\lambda=780nm$).

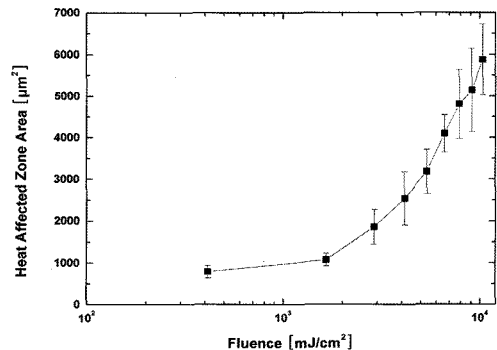


Fig. 7. Variation of heat affected zone area with fluences ($t_p=150fs$, $\lambda=780nm$).

Fig. 7에는 플루언스의 변화에 따른 열영향부 면적의 변화를 나타내었다. 플루언스 수치가 증가함에 따라 열영향부의 면적은 점점 증가하는 추세를 나타내며, 그 증가폭 또한 거의 일정한 경향을 보이는 것으로 나타났다. 이는 플루언스 값에 비례하여 동일한 면적의 Si 웨이퍼 표면에 전달되는 에너지 밀도 값이 증가하므로 열영향부도 함께 자연스럽게 증가하는 것으로 판단된다. Fig. 8은 3차원 표면 계측을 실시한 측정 방법 및 데이터 분석 결과의 예시이며, Fig. 9에 3차원 표면 계측을 통해 측정된 각 플루언스 변화에 대한 열영향부의 실제 변형된 높이 변화를 비교 분석하여 나타내었다. 열영향부의 면적 측정과 마찬가지로, 높은 플루언스 조건일수록 열영향부의 변형된 높이 역시 증가하는 경향을 보였다. 플루언스 조건에 따라 폭 5~30 μm , 높이 1~6 μm 를 갖는 돌기 형태의 열영향부가 관찰되었다. 정리하면, 열영향부는 레이저 펄스 에너지가 집중되는 미세 관통 홀의 입구 주변부를 중심으로 대칭적인 형상으로 나타나고 있으며, 저 플루언스 영역에 비해 고 플루언스 영역으로 갈수록 열영향부의 면적과 변형된 높이의 평균 값 및 편차가 다소 증가하는 경향을 보이는 것으로 판단된다.

3차원 적층 실장기술은 관통 홀을 형성하는 공정 이후에, 플립칩 제조 공정과 유사하게 관통 홀에 Cu를 도금한 후 범프를 사용하여 접합을 하게 된다. 관통 홀 입구에 형성된 열영향부의 크기는 그리 크지 않기 때문에, 이러한 Cu 도금 공정과 범프 형성 과정에서 큰 문제점으로 지적되거나 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다. 그러나 열확산 과정을 통해 생성된 열영향부는 본래의 재료와 비

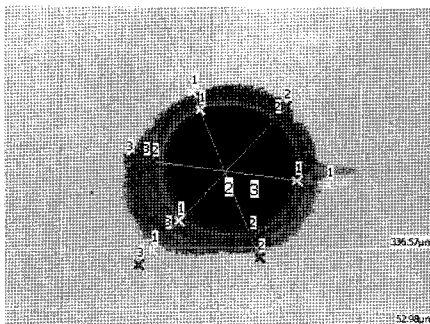


Fig. 8. 3-dimension profile measuring of the through-hole.

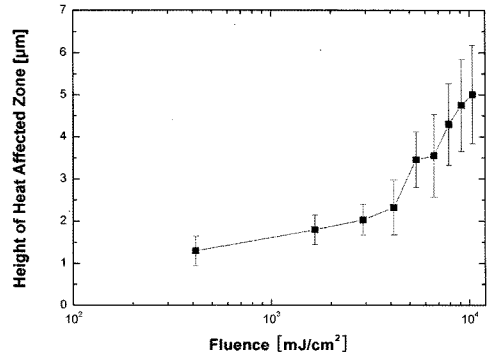


Fig. 9. Height of heat affected zone with fluences ($t_p=150\text{fs}$, $\lambda=780\text{nm}$).

교하여 물리, 화학적으로 변형된 성질(재증착층)을 갖는다. 따라서 미소균열을 일으키거나 기계적 스트레스를 유발할 수 있는 인자이므로, 이를 발생시키지 않거나 최소화하는 것이 바람직하다. 그러므로 본 연구에 사용된 펄토초 레이저가 나노초 또는 피코초 레이저와 비교하여 Si 웨이퍼 가공시 현저히 작은 열영향부가 형성되는 이점을 얻을 수 있음에도, 열영향부를 최소화하고 최상의 가공도를 갖는 공정 조건을 설정해야 한다. 따라서 본 실험의 결과를 종합하여 분석한 결과, $4\text{ J}/\text{cm}^2$ 내외의 플루언스를 적용하여 가공한 미세 관통 홀의 경우가 열영향부가 상대적으로 작으면서도 홀의 가공도 또한 양호하게 얻을 수 있는 것을 확인하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 Si 웨이퍼에 대하여 극초단파 펄토초 레이저를 이용한 최적의 가공성 및 열영향부를 최소화하기 위한 $100\ \mu\text{m}$ 직경의 미세 관통 홀 가공 조건을 찾기 위한 해석 및 실험을 실시하였으며, 이에 대한 결과 분석과 고찰을 종합하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 극초단 펄스레이저가 조사되는 동안의 Si 재료 내부의 에너지 전달 현상에 대해서 예측한 결과, 펄토초 레이저의 경우 피코초 레이저에 비해서 전자와 격자간의 비평형 에너지 전달에 의한 비열적인 가공이 가능하므로 펄토초 레이저의 미세가공성이 우수함을 확인하였다.

(2) 각기 다른 레이저 플루언스 조건별로 가공된 미세 관통 홀들은 모두 수직에 가까운 우수한 어블레이션 가공도를 보였으며, 특히 홀의 가로세로 비가 1 : 4 이상에서도 수직에 가까운 형상을 유지하는 것을 확인하였다. 반면 높은 레이저 플루언스 조건으로 가공될수록 관통 홀 입구 주변의 열영향부가 증가하는 경향을 나타내었다.

(3) 미세한 균열이나 기계적인 스트레스의 유발 인자로 고려될 수 있는 열영향부를 최소화시키고, 양호한 측벽 가공도를 갖는 미세 관통 홀을 얻기 위해서는 4 J/cm^2 내외의 레이저 플루언스가 최적 조건임을 이론과 실험을 통하여 유도하였다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초과학연구사업 (과제번호 R01-2004-000-10572-0)의 지원을 받아 수행 되었습니다. 또한 레이저 가공 실험에 협력해 주신 (주)포코에 감사드립니다.

참고문헌

1. T. Chung and G. Haskell, "Trends in microelectronics packaging and interconnection", Semiconductor Electronics ICSE'96 Proc., A1(1996).
2. Rao. R. Tummala, "Introduction to microsystems packaging", in Fundamental of Microsystems Packaging, pp.4-26, McGraw-Hill(2001).
3. Rao. R. Tummala, "SOP : What is it and why? a new microsystem integration technology paradigm-Moore's law for system integration of miniaturized convergent systems of the next decade", IEEE Transaction on Advanced Packaging, 27(2), 241(2004).
4. Leonard W. Schaper, et al, "Architectural implications and process development of 3-D VLSI z-axis interconnects using through silicon vias", IEEE Transaction on Advanced Packaging, 28(3), 356(2005).
5. Vaidyanathan Kripesh, et al, "Three-dimensional system-in-package using stacked silicon platform technology", IEEE Transaction on Advanced Packaging, 28(3), 377(2005).
6. Carsten Momma, et al, "Short-pulse laser ablation of solid targets", Optics Communication, 129, 134 (1996).
7. C. L. Tien, A. Majamdar and F. M. Germe, "Microscale energy transport in solids", in Microscale energy transport, pp.89-92, Taylor & Francis(1997).
8. S. H. Lee, "Nonequilibrium heat transfer characteristics during ultrafast pulse laser heating of a silicon microstructure", Journal of Mechanical Science and Technology, 19, 1427(2005).
9. Q. Gui and C. L. Tien, "Short-pulse laser heating on metals", International Journal of Heat and Mass Transfer, 35, 719(1992).