

실리콘 박막의 레이저 가공 시 발생하는 광기계적 손상 해석

Analysis of Photomechanical Damages in Laser Drilling of Thin Silicon Wafer

*오부극¹, #김동식², 김계현³, 전은숙³, 김남성³

*B. K. Oh¹, #D. S. Kim(dskim87@postech.ac.kr)², T. H. Kim³, E. S. Cheon³, N. S. Kim³
¹포스텍 기계공학과 대학원, ²포스텍 기계공학과, ³이오테크닉스

Key words : Drilling, silicon, thin wafer, photomechanical damages

1. 서론

실리콘 기반의 레이저 응용 가공기술은 통신, 전자산업 분야에서 핵심적인 내용으로 성장해 오고 있다. 특히 집적도의 증가로 얇은 박막의 패터닝 및 패키징이 요구되면서 레이저를 이용한 실리콘 박막의 가공 필요성이 증대되고 있다[1,2]. 그러나 실리콘은 재료 특성상 기계적 인장력에 취약한 재질이므로 레이저를 이용한 가공 시 재료의 광기계적 거동과 손상기작을 이해하는 것이 매우 중요하다. 레이저를 이용하여 실리콘을 가공 시 발생하는 광기계적 손상에 대한 기존의 연구결과를 정리하면 실리콘 재료의 기계적 손상기작은 다음과 같다: (1) 열응력에 의한 손상[3], (2) 재료의 상변화 과정에서 발생하는 손상[4,5]. 실리콘의 기계적 손상에 대한 기존 연구가 대부분 벌크(bulk) 웨이퍼에 국한된 반면 본 연구에서는 100 μm 미만의 실리콘 박막의 광기계적 손상에 대한 실험적, 수치적 해석을 수행하고자 한다. 특히 나노초 레이저를 이용한 미세 드릴링 시 발생하는 열탄성 거동을 분석하고 열충격에 의한 손상기작을 규명하고자 한다.

2. 수치모델링 및 실험

이차원 축대칭 영역(r, z)에 대하여 열전달과 2 차원 열탄성 방정식을 결합하여 계산을 수행한다. 레이저 조사면의 기화로 인한 에너지 평형식은 식(1)과 같이 표현되며 이때 증발열(J_{ev})은 Hertz-Knudsen 식을 이용하여 구한다(T : 온도, r_w : 빔 반경, k : 열전도도, θ : 레이저 빔 입사각, τ_w : 펄스폭, n : 표면 수직 좌표계, R_{eff} : 표면반사율, E : 레이저 에너지, $I(t)$: 레이저에너지의 시간 분포함수, L_{ev} : 증발잠열). 표면 반사율(R_{eff})은 s-편광과 p-편광 빔의 평균값을 이용하였다. 식(1)의 우변 첫 항은 본 계산에 사용된 에너지 생성 항을 의미한다.

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\text{front surface}} = \frac{2(1-R_{eff})\cos\theta \times E}{\tau_w \pi r_w^2} \exp\left[-\left(\frac{r}{r_w}\right)^2\right] I(t) - j_{ev} L_{ev} \quad (1)$$

열탄성 방정식의 경계조건은 플룸에 의한 반발압력을 고려하면 식(2)와 같다(T_s : 표면온도, T_v : 비등점, $R=296$ J/(kgK): 기체상수, $p_0=1$ atm: 대기압).

$$\sigma_{zz} \Big|_{\text{front surface}} = -P_{recoil} = -0.549 p_0 \exp\left(\frac{L_{ev}(T_s - T_v)}{RT_s T_v}\right) \quad (2)$$

본 연구에서는 플라즈마층을 표면의 증발깊이(δ)로 가정하고 평균적인 플라즈마 흡수계수(α_{pl})를 실험에서 구한 어블레이션 깊이와 맞추어 플라즈마 차단(plasma shielding) 현상을 모델링 하였다[6]. 즉, 표면에 도달하는 레이저 빔의 강도는 $I(t)=I_0(t) \times \exp[-\alpha_{pl}\delta]$ 이고 플라즈마의 팽창효과는 무시하였다.

실험에서는 Nd:YAG 레이저(6 ns, 355 nm)가 사용되었다. 2 mm 조리개를 통과 한 가공빔은 10 mm 까지 확대된 후 $f=100$ mm 렌즈로 집속된다. 초점 면에서의 빔의 크기는 대

략 40 μm($2r_w$) 로 추정된다. 실험에 사용된 단결정 실리콘은 p-type 이며 레이저 빔은 (100) 방향을 따라 조사된다. 60, 70, 80, 90 μm 두께의 시편의 드릴링 실험을 수행했고 주사 전자현미경을 이용하여 가공 전면 및 후면을 분석 하였다.

3. 결과 및 논의

그림 1 에는 웨이퍼를 완전히 관통하는데 필요한 펄스 수로부터 구한 어블레이션 깊이를 계산결과와 비교하였다. 수치계산 모델이 유효한 범위인 낮은 레이저 강도 영역에서 대체적으로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 계산된 한계강도는 약 0.2 GW/cm² (6 ns, 355 nm)로 나타나며 이 값은 기존의 연구 결과 0.5, 0.2 GW/cm²[7,8] 들과 유사하다. 본 연구에서 사용된 플라즈마 흡수계수는 $\alpha_{pl} = 1.34 \times 10^6$ 1/m 이다.

그림 1 의 우측 그래프는 본 연구에 이용된 해석코드를 이용하여 계산한 니켈의 열탄성 거동을 기존연구결과[9]와 비교한 것이다. 이를 통해 본 연구에서 개발된 수치해석코드가 열탄성 거동을 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 그림 2 좌측 그래프는 레이저 강도와 시편 표면에서 생성되는 열응력의 크기가 비례함을 보여준다. 그림 1 좌단으로부터 60 μm 두께의 웨이퍼를 드릴링 하기 위해서는 적어도 3~4 펄스가 필요하게 됨을 알 수 있다. 즉, 드릴링 공정은 단펄스공정 보다는 여러 개의 펄스로 이루어진다. 따라서 펄스마다 가공면의 깊이와 홀의 크기가 변화하기 때문에 열전달 및 열탄성거동은 달라지기 마련이다. 이때 시편의 후면과 구멍의 바닥간의 거리를 잔류두께로 정의한다. 그림 2 우단은 잔류두께가 줄어들어 따라서 홀의 옆면과 바닥 면에서 발생하는 최대 주 응력의 크기 변화를 보여준다. 잔류두께가 작을 경우 상대적으로 큰 주 응력이 발생하는 것

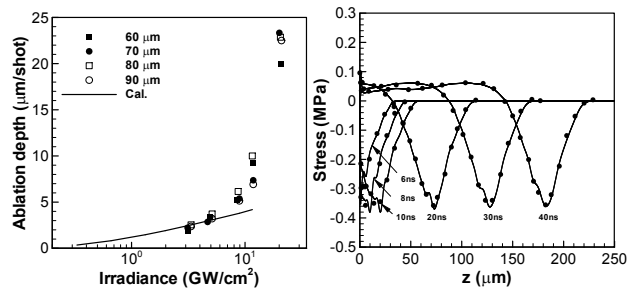


Fig. 1. Comparison of computation results with experimental data(left) and with those in Ref.[9](right).

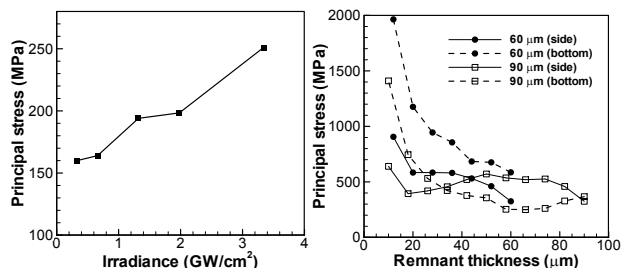


Fig. 2. Dependence of maximum principal stress near the top-surface on the laser irradiation(left) and the remaining thickness(right).

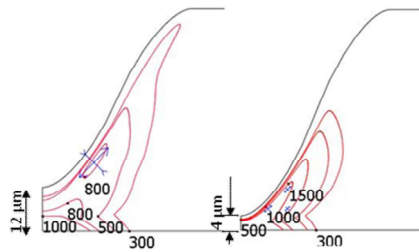


Fig. 3. Contours of principal stresses(unit: MPa).

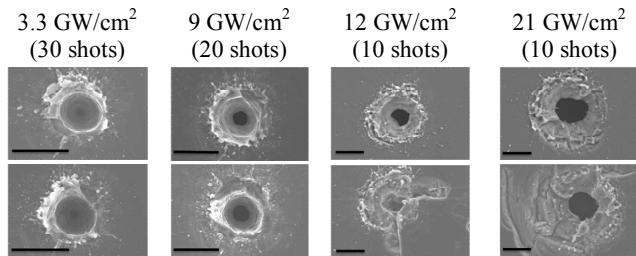


Fig. 4. Scanning electron microscopic images of the front surface of thin Si wafers (upper row: 60 μm, lower row: 90 μm in thickness). The scale bar is 50 μm.

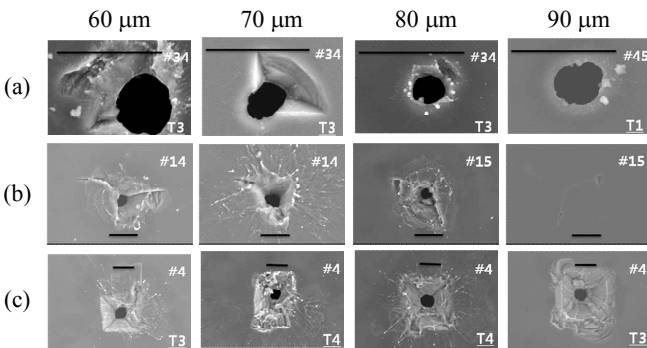


Fig. 5. Scanning electron microscopic images of the back surface of thin Si wafers (upper row: 3.3 GW/cm², middle row: 9 GW/cm², bottom row: 21 GW/cm²). The scale bar is 50 μm.

을 볼 수 있다. 이는 열탄성효과가 후면에서 반사되면서 인장응력이 중첩되어 발생하는 것임을 그림 3 을 통해서 알 수 있다.

그림 4 에서는 10~30 펄스 조사 후 표면에 생성된 debris, 재응축층 및 균열을 볼 수 있다. 레이저강도가 높아질수록 기계적 손상의 영역이 커짐을 볼 수 있다. 그러나 재응축층이 표면을 덮고 있어서 기계적 손상을 세밀하게 관찰하기는 어렵다. 그림 5 는 시편 후면의 사진들을 보여준다.

T1 은 크랙이 생성되지 않는 경우, T2 는 크랙만 발생, T3 는 홀과 크랙이 같이 생성, T4 는 홀과 크랙 위에 재응축이 일어난 경우를 의미한다. 그림 5(a)를 통해서 얇은 웨이퍼 일수록 파쇄에 취약함을 알 수 있다. 그러나 그림 5(b)~(c) 에서는 그러한 경향이 뚜렷히 보이지는 않는다. 이는 시편의 두께도 중요하지만 파쇄 및 크랙이 발생하기 바로 전까지의 잔류두께가 실리콘의 기계적 거동에 크게 영향을 미치기 때문이다. 그림 2(right)에서 보았듯이 잔류두께가 줄어들면서 후면과 홀의 옆면에서 인장응력이 증가하기 때문이다. 또한 그림 5(b)에서 피라미드 모양의 파쇄형상이 관찰되어진다. 보여지는 4 개의 경사면은 <111> 방향을 가지는 그룹들이며 일반적으로 이 방향에서 실리콘의 크랙이 잘 발생하는 것으로 알려져 있다.

그림 5 를 통해 후면의 크랙의 크기를 레이저 강도의 함수로 구할 수 있다. 이를 외삽하면 후면 파쇄가 일어나기 시작하는 한계강도를 구할 수 있다. 60~90 μm 두께의 웨이퍼에 대해서 대략 2.3~3.6 GW/cm² 으로 나타났다. 이는 기

존의 300 μm 웨이퍼에 대한 결과 7 GW/cm² 보다 작은 값이며[10], 박막의 경우 단위 면적당 레이저 조사도가 크고 열탄성효과가 진행하면서 가해지는 정도가 작기 때문이다.

4. 결론

본 연구에서는 실리콘 박막의 레이저 미세 가공 시 열 충격에 의해 발생하는 기계적 손상을 해석하였다. 계산을 통해 시편 전면에서는 1~2 GW/cm² 조사도에서 원주방향 및 반경방향 균열이 발생할 수 있음을 보였다. 후면 파쇄는 실리콘의 <111> 방향으로 발생했다. 60~90 μm 실리콘 웨이퍼의 한계강도는 2.3~3.3 GW/cm² 이었다. 박막시편은 벌크 재료에 비해 후면파쇄(spallation)에 매우 취약하며 후면파쇄 시편 두께 뿐 아니라 잔류 두께에도 크게 영향을 받음을 알았다.

후기

본 연구는 지식경제부 첨단레이저 응용 미세가공기술 개발 사업 지원으로 수행되었다.

참고문헌

1. Cheng, T., and Darling, R. B., " Laser micromachining of the materials using in microfluidics by high precision pulsed near and mid-ultraviolet Nd:YAG lasers," Journal of Materials Processing Technology, **198**, 248-253, 2008.
2. Müllenborn, M., Dirac, H., Peterson, J., and Bouwstra, S., "Fast three-dimensional laser micromachining of silicon for microsystems," Sensors and Actuators A, **52**, 121-125, 1996.
3. Luft, A., Franz, U., Emsermann, A., and Kaspar, J., "A study of thermal and mechanical effects on materials induced by pulsed laser drilling," Applied Physics A, **63**, 93-101, 1996.
4. Lim, D. J., Ki, H., and Mazumder, J., "Mass removal modes in the laser ablation of silicon by a Q-switched diode-pumped solid-state laser (DPSSL)," Journal of Physics D: Applied Physics, **39**, 2624-2635, 2006.
5. Dauer, S., Ehlert, A., and Büttgenbach, S., "Rapid prototyping of micromechanical devices using a Q-switched Nd:YAG laser with optional frequency doubling," Sensors and Actuators, **76**, 381-385, 1999.
6. Atanasov, P. A., Eugenieva, E. D., and Nedialkov, N. N., "Laser drilling of silicon nitride and alumina ceramics: A numerical and experimental study," Journal of Applied Physics, **89**, 2013-2016, 2001.
7. Dan, L., and Duan-Ming, Z., "Vaporization and Plasma Shielding during High Power Nanosecond Laser Ablation of Silicon and Nickel," Chinese Physics Letters, **25**, 1368-1371, 2008.
8. Karnakis, D. M., "High power single-shot laser ablation of silicon with nanosecond 355 nm," Applied Surface Science, **252**, 7823-7825, 2006.
9. Wang, X., and Xu, X., " Thermoelastic wave induced by pulsed laser heating," Applied Physics A, **73**, 107-114, 2001.
10. Ren, J., Orlov, S., and Hesselink, L., "Rear surface spallation on single-crystal silicon in nanosecond laser micromachining," Journal of Applied Physics, **97**, 104304, 2005.