

CW 레이저 조사에 의한 실리콘 웨이퍼의 손상 평가[§]

최성호* · 김정석* · 장경영**† · 신완순***

* 한양대학교 자동차공학과, ** 한양대학교 기계공학부, *** 국방과학연구소

Thermal Damage Characterization of Silicon Wafer Subjected to CW Laser Beam

Sungho Choi^{*}, Chungseok Kim^{*}, Kyung-Young Jhang^{**†} and Wan-Soon Shin^{***}

^{*} School of Automotive Engineering, Hanyang Univ.,

^{**} School of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.,

^{***} Agency for Defense Development

(Received February 28, 2012 ; Revised July 13, 2012 ; Accepted July 18, 2012)

Key Words: CW Laser(연속파 레이저), Silicon Wafer(실리콘 웨이퍼), Crack(균열), Melting(용융)

초록: 본 연구의 목적은 CW 레이저 조사에 의한 실리콘 웨이퍼의 손상을 평가하는 것이다. 먼저, 레이저 조사에 의한 온도 및 응력 변화를 3 차원 유한요소해석 모델을 이용하여 예측하였다. 해석 결과, 93 W/cm²의 레이저 빔이 조사되었을 때, 실리콘 웨이퍼의 표면의 응력은 약 140 MPa 까지 증가하였으며 균열이 발생할 것으로 예측되었다. 레이저 강도가 더욱 증가하여 186 W/cm²일 때에는 실리콘 웨이퍼의 표면의 온도는 1432 °C 까지 증가하였으며 표면부가 용융될 것으로 예상되었다. 실험 결과, 102 W/cm²의 레이저 빔이 실리콘 웨이퍼 표면에 조사되었을 때 표면부에 균열이 발생하였고, 레이저 빔의 강도가 더욱 증가하여 140 W/cm²일때 표면부에서 용융이 발생하였다. 용융이 발생하는 레이저 빔의 강도는 유한요소해석 결과보다 낮은 값이었으며 이는 표면부에서 생성된 균열에 의해 레이저 빔의 다중반사와 다중흡수가 일어나 레이저 빔의 흡수량이 증가하였기 때문이다.

Abstract: The objective of this study is to evaluate the thermal damage characterization of a silicon wafer subjected to a CW laser beam. The variation in temperature and stress during laser beam irradiation has been predicted using a three-dimensional numerical model. The simulation results indicate that the specimen might crack when a 93-W/cm² laser beam is irradiated on the silicon wafer, and surface melting can occur when a 186-W/cm² laser beam is irradiated on the silicon wafer. In experiments, straight cracks in the [110] direction were observed for a laser irradiance exceeding 102 W/cm². Furthermore, surface melting was observed for a laser irradiance exceeding 140 W/cm². The irradiance for surface melting is less than that in the simulation results because multiple reflections and absorption of the laser beam might occur on the surface cracks, increasing the absorbance of the laser beam.

- 기호설명 -

$T(x, y, z)$: 온도 분포

$A(x, y, z)$: 단위시간당 단위체적당의 입열량

K : 열전도율

κ : 열확산계수

I_0 : 입사된 레이저 빔의 강도

R : 레이저 빔의 반사율

α : 흡수 계수

r_0 : 레이저 빔의 강도가 e^2 으로 감소하는 반경

σ_{ij} : 응력

C_{ijkl} : 탄성 계수

ϵ_{ij} : 변형률

β_{ij} : 열팽창 계수

T_0 : 기준온도

u : 변위

h : 대류 열전달 계수

[§]이 논문은 2012년도 대한기계학회 재료 및 파괴부문 춘계학술대회(2012. 2. 16.-17., 제주대) 발표논문임

† Corresponding Author, kyjhang@hanyang.ac.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

T_{amb} : 주위 온도
 ϵ_{rad} : 복사율
 σ_{SB} : Stefan-Boltzmann 상수

1. 서 론

레이저와 반도체 물질간의 상호작용은 레이저 빔의 비접촉성과 신속성을 이용한 레이저 가공분야 뿐만 아니라 군사적인 무기체계에서 또한 활발히 연구되고 있다.^(1,2) 반도체 물질은 주로 적외선 광학 시스템 또는 광 검출기의 기지 물질로 사용되고 있으며, 특히 실리콘은 3.45의 높은 굴절률과 1.2~7 μm , 25~300 μm 영역에서 높은 투과율을 가지고 있으며, 이러한 광학적 특징은 적외선 대역의 광학 창, 필터로의 사용에 적합하여 광학분야에서 널리 사용되고 있다.^(3,4) 이러한 적외선 광학 시스템과 광 검출기는 레이저 빔 조사로 인해 일시적 측정 오류 및 균열, 용융 등 영구적 손상을 받을 수 있다.⁽⁵⁾

가간섭성의 레이저 빔이 반도체 물질에 입사하면, 반도체 물질의 특성과 입사 빔의 주파수에 의존하는 다양한 경로로 에너지의 일부가 물질에 흡수되며 나머지는 표면으로부터 반사되거나 물질을 투과하게 된다. 입사되는 레이저 빔과 물질간의 상호작용 효과는 $E=h\nu$ 로 표현되는 주파수에 의한 에너지와 단위 시간당 입사되는 에너지인 파워에 의한 열효과로 대별할 수 있다. 이러한 열효과에 의한 손상으로 용융, 기화, 이온화 및 열응력에 의한 균열 및 파손이 있다.^(6,7) 특히 열응력에 의한 균열 및 파손은 반도체 재료가 취성이 강한 재료이므로 재료 손상으로 가장 치명적인 유형 중 하나이다.^(8,9) 따라서 반도체 재료의 신뢰성을 확보하기 위한 레이저와 반도체 재료간의 상호작용에 대한 연구가 필요하다.

기존의 레이저와 실리콘 웨이퍼간의 상호작용에 대한 연구는 주요 단파장⁽¹⁰⁻¹²⁾ 또는 가시광^(13,14) 대역의 레이저 빔에 대해 수행되었으며 근적외선 대역의 레이저 빔에 실리콘의 손상에 대한 연구는 실리콘의 낮은 흡수 계수로 인해 제한되었다.^(15,16) 그러나 광학적 물성인 흡수 계수는 온도에 의존적인 물성으로, 근적외선 파장에 대한 흡수계수는 온도가 증가하게 되면 급격히 증가한다.⁽¹⁷⁾ 이로 인해 실리콘은 근적외선 파장의 레이저 빔에 의해서도 손상을 받을 수 있으므로 근적외선 파장에 대한 실리콘 웨이퍼의 손상에 대한 연구가 필요하

다.

본 연구에서는 CW 레이저 조사에 의한 실리콘 웨이퍼의 손상을 평가하기 위해 먼저 레이저 조사에 의한 온도 및 응력 변화를 3차원 유한요소해석 모델을 이용하여 예측하고 해석된 온도 및 응력 결과로부터 실리콘 웨이퍼의 균열 및 용융의 발생여부를 평가하였다. 또한 실험적으로 실리콘 웨이퍼의 손상을 평가하기 위해 1070 nm 파장의 CW fiber 레이저를 실리콘 웨이퍼에 20초간 조사하였으며, 레이저 조사 후 광학 현미경을 이용하여 실리콘 웨이퍼의 표면상태를 관찰하였다.

2. 유한 요소 해석

2.1 열전달 해석

레이저 빔 조사에 의한 온도분포는 고전적인 열전달 방정식의 해로부터 얻어진다. 반 무한체에서의 열유동 미분방정식은 다음과 같다.^(8,10)

$$\nabla^2 T(x, y, z, t) - \frac{1}{\kappa} \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = -\frac{1}{k} A(x, y, z, t) \quad (1)$$

여기서 x 와 y 는 x 방향과 y 방향의 위치, z 는 깊이 방향으로의 위치, $T(x, y, z)$ 는 온도 분포, $A(x, y, z)$ 는 단위시간당 단위 체적당의 입열량, k 와 κ 는 각각 열전도율과 열확산계수이다.

레이저 빔은 전자기파로 고체재료에 입사하면 재료 자체의 특성과 입사 빔의 주파수에 의존하는 다양한 경로로 에너지의 일부가 재료에 흡수된다. 또한 레이저 빔은 표면으로부터 반사되거나 재료를 투과하게 된다. 레이저 빔이 재료내부를 통과할 때 흡수 매커니즘은 Beer-Lambert 법칙을 따르며 이 경우의 깊이에 따라 흡수되는 레이저 빔 강도는 다음과 같다.

$$I(z) = I_0(1 - R)\alpha \exp(-\alpha z) \quad (2)$$

여기서 I_0 는 입사된 레이저빔의 강도, R 과 α 는 각각 레이저 빔의 반사율과 흡수 계수로 이는 레이저 빔의 파장과 대상 재료에 의존한다.

식 (1)의 해는 위치와 시간의 함수로서 온도분포를 나타내며, 어떤 위치에서 시간 t 경과 후의 온도 T 는 열원 분포함수인 $A(x, y, z)$ 와 이 문제에 관련된 경계조건들에 의하여 결정된다. 본 연구에서는 열원 분포함수를 공간적으로 가우시안 형태로 가정하였고, 이 경우 입열량은 식 (3)과 같다.

$$A(x, y, z, t) = I_0(1 - R)\alpha \exp(-\alpha z) \exp\left(-2 \frac{x^2 + y^2}{r_0^2}\right) \quad (3)$$

여기서 r_0 는 레이저 빔의 강도가 e^{-2} 으로 감소하는 반경이다.

2.2 열응력 해석

레이저 빔 조사로 인해 재료의 온도가 상승하게 되면 열 응력이 작용하게 된다. 이러한 열 응력은 Duhamel-Neumann 법칙으로부터 구해지고 다음과 같다.^(8,10)

$$\sigma = C(\varepsilon - \beta(T - T_0))$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2}[(\nabla \mathbf{u})^T + \nabla \mathbf{u}] \quad (4)$$

여기서 σ 는 응력, C 는 탄성 계수, ε 는 변형률, β 는 열팽창 계수, T 는 온도, T_0 는 기준온도, \mathbf{u} 는 변위이다.

2.3 유한 요소 해석 모델

CW 레이저 조사에 의한 실리콘 웨이퍼의 온도 및 응력 변화를 유한 요소 해석 프로그램 (COMSOL)을 이용하여 3 차원 대칭 모델로 해석하였으며 해석 모델은 Fig. 1 과 같다. 실리콘 웨이퍼의 반지름은 5.08 cm 이고 기호 A 는 레이저 빔에 의한 열원이 적용되는 볼륨이다. 경계조건 1 은 대칭면이고, 경계조건 2 는 연속적 조건이다. 이외의 경계조건은 대류와 복사 효과를 고려하였으며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

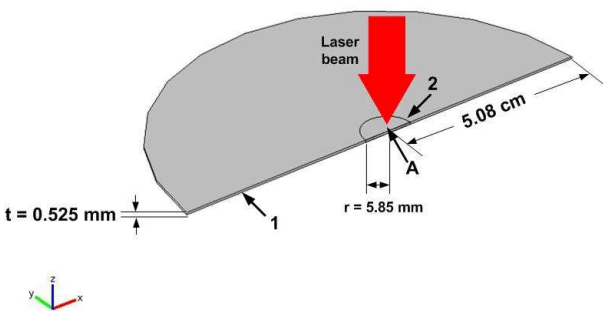


Fig. 1 Simulation model of the silicon subjected to CW laser beam. The symbol 'A' denotes the heat source volume, the numbers 1 and 2 indicate each boundary, and the specimen dimensions are given

$$n \cdot (k \nabla T) = h(T_{amb} - T) + \varepsilon_{rad} \sigma_{SB} (T_{amb}^4 - T^4) \quad (5)$$

여기서 k 는 열전도도, h 는 대류 열전달 계수, T_{amb} 는 주위 온도, ε_{rad} 는 복사율, σ_{SB} 은 Stefan-Boltzmann 상수이다.

유한요소해석에 사용된 레이저는 CW 레이저로 레이저 빔의 유효 빔 반지름은 5.85 mm로 공간적으로 가우시안 분포를 가지도록 적용하였다. 대상 재료는 p-형 실리콘 웨이퍼를 이용하였으며, 일반적으로 실리콘 웨이퍼의 물성치는 온도에 의존한다. 해석에 이용한 밀도, 열전도도, 열용량, 열팽창 계수, 탄성 계수, 푸아송 비 등 온도에 따른 물성치는 Table 1 과 같다.^(18,19) 또한 실리콘 웨이퍼에서 온도에 따른 1070 nm 파장의 레이저 빔에 대한 흡수 계수 및 반사율은 Fig. 2 와 같다.^(17,20) 상변화 현상을 해석함에 있어 열용량교정 방법을 이용하였다.^(13,21) 매쉬는 xy 평면에선 삼각매쉬를 이용하였으며 매쉬사이즈는 0.5 mm 이고 z 축 대해 swept 매쉬를 이용하여 요소가 6 개가 되도록 하였다. 0.01 s 간격으로 20 s 까지 해석을 수행하였으며, 초기 온도는 20 °C로 하였다.

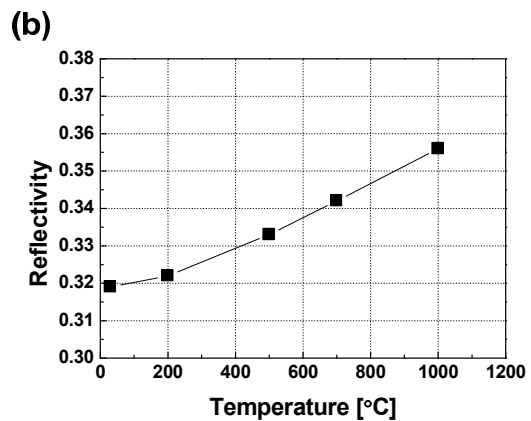
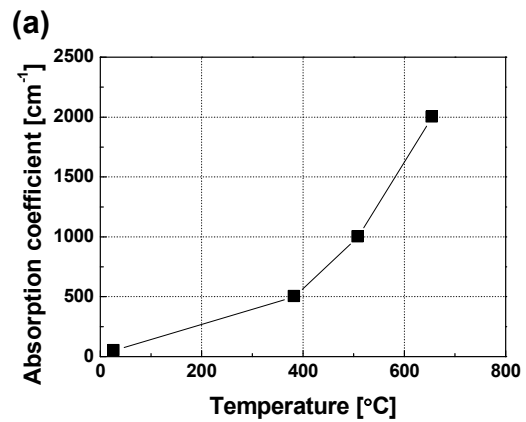


Fig. 2 Temperature dependence of the absorption coefficient (a) and the reflectivity (b) of silicon at a wavelength of 1070 nm

Table 1 Thermal and mechanical properties of silicon wafer depending on temperature

Temperature (°C)	20	220	420	620	820	1020	1220
Density (kg/m ³)	2330.00	2325.58	2320.25	2314.50	2308.33	2301.17	2291.96
Thermal conductivity (W/(m·°C))	152.57	77.12	51.67	36.28	28.02	24.50	22.74
Heat capacity (J/(kg·°C))	706.96	833.39	878.86	911.15	936.00	958.24	977.94
Coefficient of thermal expansion (10 ⁻⁶ /°C)	2.57	3.17	3.49	3.71	3.88	4.00	4.09
Young's modulus (GPa)	130.43	128.50	126.35	123.96	121.34	118.48	115.40
Poisson's ratio	0.2763	0.2762	0.2761	0.2760	0.2759	0.2758	0.2757

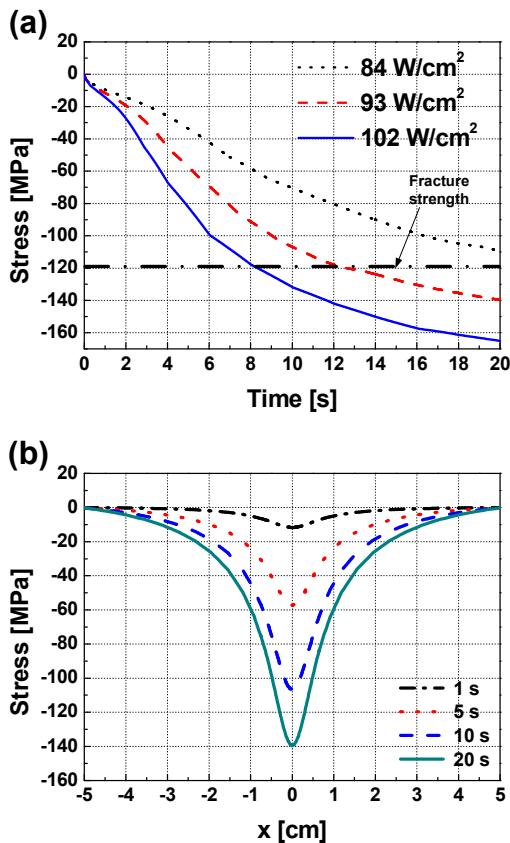


Fig. 3 Simulation results for the radial stress variation: (a) at the center of the laser beam spot for laser beam irradiances of 84 W/cm², 93 W/cm² and 102 W/cm² and (b) typical radial stress distribution in the x direction on the surface of silicon specimen subjected to 93 W/cm² laser irradiance for 1 s, 5 s, 10 s and 20 s

3. 유한 요소 해석 결과

Fig. 3(a)는 레이저 빔 강도에 따른 레이저 조사 중심점에서의 반경 방향 응력 해석 결과이다. 레

이저 빔 조사시간이 증가함에 따라서 빔이 조사된 부분에서의 응력은 증가하였고, 레이저 빔의 강도가 클수록 발생하는 응력이 더욱 크게 나타났다. 특히, 레이저 빔의 강도가 84 W/cm² 일 때, 레이저 조사 중심점의 응력은 약 110 MPa 까지 증가하였고, 93 W/cm² 일 때, 레이저 조사 중심점의 응력은 약 140 MPa 까지 증가하였다. 이 값은 실리콘 웨이퍼의 일반적인 파단강도⁽²²⁾를 넘는 값으로 93 W/cm² 이상의 레이저 빔이 조사되었을 때 실리콘 웨이퍼의 표면에 균열이 발생할 것으로 예상된다. Fig. 3(b)는 레이저 빔의 강도가 93 W/cm² 일 경우 레이저 조사시간이 각각 1, 5, 10, 20 s 일 때의 실리콘 웨이퍼 표면부에서 x 방향으로의 응력분포를 나타낸다. 레이저 빔 조사 중심점에서의 시간에 따른 응력변화를 Fig. 3(a)에서 설명한 대로 조사시간에 따라 응력이 증가하였다. 응력 분포는 레이저 빔의 가우시안 분포와 유사한 형태를 나타내었으며 이는 유한 요소 해석에서 레이저 빔의 공간적인 세기 분포를 가우시안으로 적용하였기 때문이다.

Fig. 4(a)는 레이저 빔 강도에 따른 레이저 조사 중심점에서의 온도 변화 해석 결과이다. 온도 변화 역시 조사시간이 증가함에 따라서 증가하고 빔의 강도가 클수록 더 큰 온도의 증가를 나타내었다. 특히, 레이저 빔의 강도가 84 W/cm² 일 때, 레이저 조사 중심점의 온도는 약 548 °C까지 증가하였고, 93 W/cm² 일 때, 레이저 조사 중심점의 온도는 약 670 °C까지 증가하였다. 이 값은 일반적으로 잘 알려진 실리콘 웨이퍼의 용융점 1412 °C⁽⁶⁾보다 낮은 온도로 용융이 발생하지 않을 것으로 예상된다. Fig. 4(b)는 레이저 조사시간이 각각 1, 5, 10, 20 s 일 때의 실리콘 웨이퍼 표면부에서 x 방향으로의 온도분포를 나타낸다. 온도 분포 또한 레이

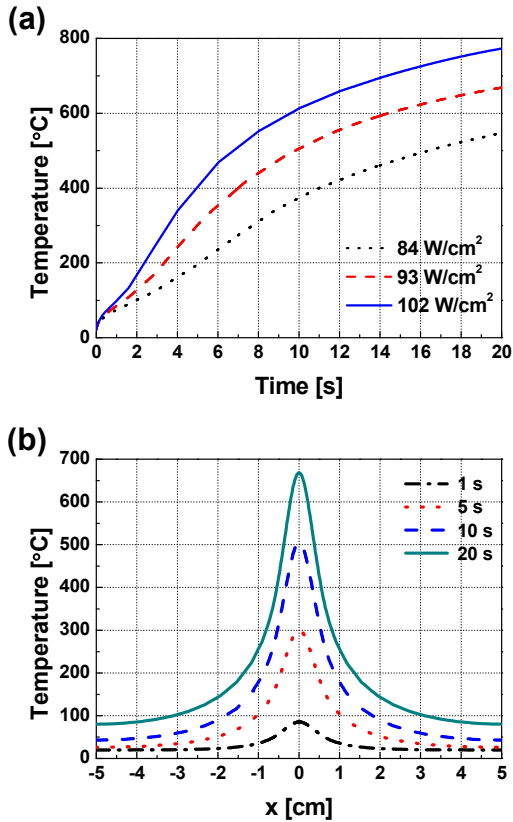


Fig. 4 Simulation results for the temperature: (a) at the center of the laser beam spot for laser beam irradiances of 84 W/cm², 93 W/cm² and 102 W/cm² and (b) typical temperature distribution in the x direction on the surface of silicon specimen subjected to 93 W/cm² laser irradiance for 1 s, 5 s, 10 s and 20 s

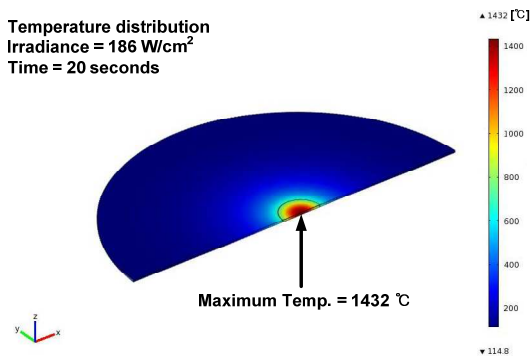


Fig. 5 Simulation result for the temperature distribution on silicon specimen subjected to laser irradiance of 186 W/cm² for 20 seconds

저 빔의 가우시안 분포와 유사한 형태를 나타내었다.

용융 현상이 발생하는 레이저 강도를 예측하기 위해 레이저 강도를 증가시켜가며 해석을 수행하였으며 Fig. 5는 186 W/cm²의 레이저 빔이 조사되

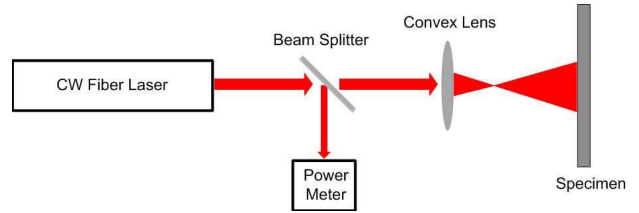


Fig. 6 Schematic diagram of the experimental system

었을 때 표면부 온도 분포이다. 레이저 조사 중심점의 최고온도는 1432 °C까지 증가하였으며 이는 단결정 실리콘 웨이퍼의 용융점 1412 °C⁽⁶⁾보다 높은 온도로 용융이 발생할 것으로 예상된다.

4. 실험 방법

실험 모식도는 Fig. 6과 같다. 실험에 사용된 레이저는 CW fiber 레이저로 출력 범위는 100 W ~ 1 kW, 파장은 1070 nm, 빔지름은 5.85 mm이다. 레이저 빔은 빔 스플리터에서 90%는 투과, 10%는 반사되며 반사된 레이저 빔은 파워 미터(FieldmaxII-TOP and PM150, Coherent Inc.)로 입사되어 레이저 빔의 출력을 측정한다. 투과된 레이저 빔은 볼록렌즈에 입사되고 볼록렌즈에 의해 레이저 빔 지름이 2배 증가하도록 디포커싱하였다. 빔지름이 11.7 mm로 2배 증가된 레이저 빔을 20초 동안 (100) 결정배향의 4인치 p-형 실리콘 웨이퍼에 조사하였다. 레이저 빔 조사 후 광학 현미경(Optical microscope, OM)을 이용하여 실리콘 웨이퍼의 표면상태를 관찰하였다.

5. 실험 결과

Fig. 7은 레이저 빔 조사 전과 102 W/cm²의 레이저 빔이 조사된 후의 실리콘 웨이퍼 표면의 광학현미경 측정 이미지이다. 102 W/cm²의 레이저 빔이 조사된 후 x 방향 [110]과 y 방향 [110]으로 균열이 발생한 것을 관찰할 수 있으며 이러한 균열의 방향은 (100) 결정배향의 실리콘 웨이퍼의 경우 [110] 방향의 강도가 가장 약하기 때문이다. 레이저 빔의 강도 측면에선 유한 요소 해석 결과와는 약간의 차이가 있지만, 일반적으로 취성 파괴 거동을 보이는 재료는 미세 균열 등 재료 내의 가장 약한 부분에서 파괴가 일어나기 쉬우며 실리콘 웨이퍼에서의 파괴강도는 큰 편차를 가진다. 이러한 편차에 의해 약간의 차이가 발생한 것으로 사료된다.^(22,23)

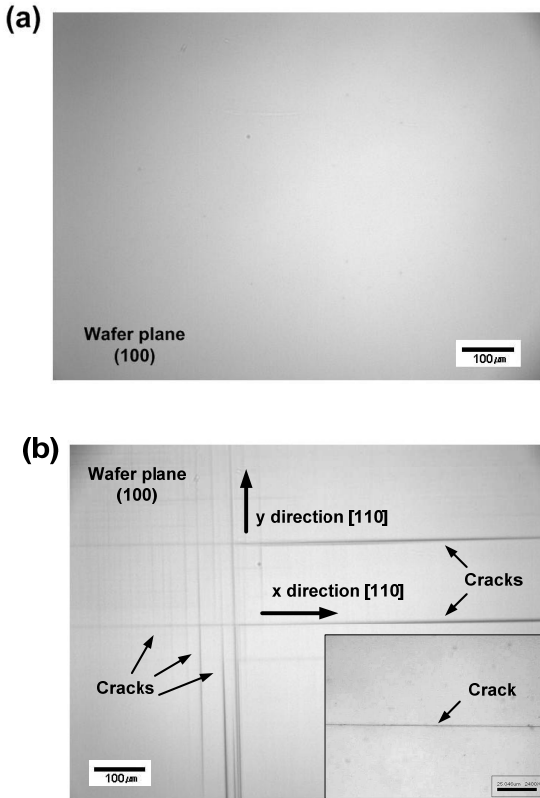


Fig. 7 OM images on the silicon wafer surface: (a) before laser beam irradiation and (b) after laser beam irradiation of 102 W/cm². The cracks were generated along the x [110] and y [110] directions

Fig. 8(a)는 140 W/cm²의 레이저 빔이 조사된 후의 레이저 조사 중심점에서 실리콘 웨이퍼 표면의 광학현미경 측정 이미지이다. 실리콘 웨이퍼의 표면부에서 용융이 일어나 표면의 형상이 레이저 빔 조사 전에 비해 확연히 달라진 것을 관찰할 수 있으며 용융부 표면의 형상은 불규칙적으로 나타났다. 이러한 형상은 용융이전에 표면부에서 발생하였던 균열에 의한 것으로 균열이 존재할 경우 입사된 레이저 빔은 균열 면 또는 균열과 표면이 만나는 부분에서 레이저 빔의 다중반사와 흡수가 일어나 가장 먼저 용융이 일어나게 때문이다. Fig. 8(b)는 용융부의 경계 부분 이미지로 용융부 뿐만 아니라 용융이전에 존재하였던 균열 또한 관찰할 수 있다. 용융부의 경계는 수직형태로 나타났으며 이는 앞서 언급한 바와 같이 균열 면, 균열과 표면이 만나는 부분에서 가장 먼저 용융이 일어났기 때문이다.

용융이 발생하는 레이저 빔의 강도는 유한 요소 해석 결과와는 차이가 있었으며 이는 레이저 빔의

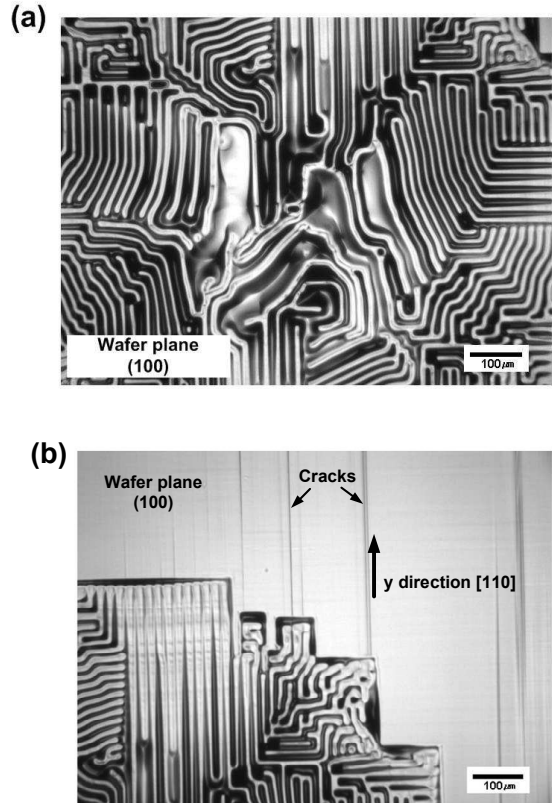


Fig. 8 OM images on the silicon wafer surface when the irradiance of the laser beam was 140 W/cm²: (a) center of the melted zone and (b) boundary of the melted zone

다중반사와 흡수에 의한 것으로 판단된다.⁽²⁴⁾ 유한 요소 해석에서는 레이저 빔이 입사되면 한 번만 흡수된다고 가정하였지만, 균열 및 표면 거칠기가 존재하게 되면 레이저 빔의 다중반사와 흡수가 일어나 레이저 빔의 흡수량이 증가하게 되고 이로 인해 유한 요소 해석 결과보다 더 낮은 강도에서 실리콘 웨이퍼의 표면이 용융된 것으로 판단된다.

6. 결론

CW 레이저 조사에 의한 실리콘 웨이퍼의 손상을 평가하였다. 먼저 유한 요소 해석을 이용하여 온도 및 응력 변화를 해석하였으며 이로부터 균열 및 용융이 발생하는 레이저 강도를 예측하였다. 유한 요소 해석 결과, 93 W/cm²과 186 W/cm²의 레이저가 조사되었을 때 각각 균열과 용융이 발생할 것으로 예상되었다.

유한 요소 해석 결과를 바탕으로 실험을 수행하였으며 102 W/cm²의 레이저가 조사되었을 때

[110] 방향으로 균열이 발생하였고 140 W/cm^2 의 레이저가 조사되었을 때 표면부 용융이 발생하였다. 용융부 표면의 형상은 용융이전에 존재한 균열에 의존하여 나타났다. 용융이 발생한 레이저 강도는 유한 요소 해석과 차이가 있었으며 이는 균열면에서 레이저 빔의 다중반사와 흡수가 일어나 레이저 빔의 흡수량이 증가하였기 때문이다.

후 기

이 논문은 국방과학연구소 생존성 기술 특화연구센터의 사업으로 지원받아 연구되었음(계약번호 UD090090GD).

참고문헌

- (1) Kalisky, Y. and Kalisky, O., 2011, "Applications and Performance of High Power Lasers and in the Battlefield," *Optical Materials*, Vol. 34, pp. 457~460.
- (2) Lee, H. H., Gwak, M. C., Choi, J. H. and Yoh, J. I., 2008, "High Power Laser Driven Shock Compression of Metals and Its Innovative Applications," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 32, No. 11, pp. 832~840.
- (3) Wang, X., Shen, Z. H., Lu, J. and Ni, X. W., 2010, "Laser-induced Damage Threshold of Silicon in Millisecond, Nanosecond, and Picosecond Regimes," *Journal of the Applied Physics*, Vol. 108, pp. 033103.
- (4) Rogalski, A., 2010, *Infrared Detectors, 2nd edition*, CRC Press, Boca Raton.
- (5) Arora, V. K. and Dawar, A. L., 1996, "Laser-induced Damage Studies in Silicon and Silicon-based Photodetectors," *Applied Optics*, Vol. 35, No. 36, pp. 7061~7065.
- (6) Wang, X., Qin, Y., Wang, B., Zhang, L., Shen, Z., Lu, J. and Ni, X., 2011, "Numerical and Experimental Study of the Thermal Stress of Silicon Induced by a Millisecond Laser," *Applied Optics*, Vol. 50, No. 21, pp. 3725~3732.
- (7) Gross, T. S., Hening, S. D. and Watt, D. W., 1991, "Crack Formation During Laser Cutting of Silicon," *Journal of Applied Physics*, Vol. 69, No. 2, pp. 983~989.
- (8) Li, D. H., Zheng, X. J., Wu, B. and Zhou, Y. C., 2009, "Fracture Analysis of a Surface Through-Thickness Crack in PZT Thin Film under a Continuous Laser Irradiation," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 76, pp. 525~532.
- (9) Murr, L. E. and Szilva, W. A., 1975, "Laser-Induced Fracture in Silicon," *Journal of Materials Science*, Vol. 10, pp. 1536~1548.
- (10) Conde, J. C., Martín, E., Gontad, F., Chiussi, S., Fornarini, L. and León, B., 2010, "Numerical Analysis of Temperature Profile and Thermal-Stress During Excimer Laser Induced Heteroepitaxial Growth of Patterned Amorphous Silicon and Germanium Bilayers Deposited on Si(100)," *Thin Solid Films*, Vol. 518, pp. 2431~2436.
- (11) Zorba, V., Boukos, N., Zergioti, I. and Fotakis, C., 2008, "Ultraviolet Femtosecond, Picosecond and Nanosecond Laser Microstructuring of Silicon: Structural and Optical Properties," *Applied Optics*, Vol. 47, No. 11, pp. 1846~1850.
- (12) Karnakis, D. M., 2006, "High Power Single-shot Laser Ablation of Silicon with Nanosecond 355 nm," *Applied Surface Science*, Vol. 252, pp. 7823~7825.
- (13) Said-Bacar, Z., Leroy, Y., Antoni, F., Slaoui, A. and Fogarassy, E., 2011, "Modeling of CW Laser Diode Irradiation of Amorphous Silicon Films," *Applied Surface Science*, Vol. 257, pp. 5127~5131.
- (14) Yan, J., Sakai, S., Isogai, H. and Izunome, K., 2009, "Recovery of Microstructure and Surface Topography of Grinding-Damaged Silicon Wafers by Nanosecond-Pulsed Laser Irradiation," *Semiconductor Science and Technology*, Vol. 24, pp. 105018.
- (15) Fu, Z., Wu, B., Gao, Y., Zhou, Y. and Yu, C., 2010, "Experimental Study of Infrared Nanosecond Laser Ablation of Silicon: The Multi-pulse Enhancement Effect," *Applied Surface Science*, Vol. 256, pp. 2092~2096.
- (16) Jellison, G. E. and Lowndes, D. H., 1982, "Optical Absorption Coefficient of Silicon at 1.152 at Elevated Temperatures," *Applied Physics Letters*, Vol. 41, pp. 594~596.
- (17) Fu, C. J. and Zhang, Z. M., 2006, "Nanoscale Radiation Heat Transfer for Silicon at Different Doping Levels," *Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, pp. 1703~1718.
- (18) Bass, M., Decusatis, C., Enoch, J., Lakshminarayanan, V., Li, G., Macdonald, C., Mahajan, V. and Stryland, E. V., 2011, *Handbook of Optics, 3rd Edition Volume IV*, McGraw-Hill, New York.
- (19) Hull, R., 1999, *Properties of Crystalline Silicon*, INSPEC, London.
- (20) Ravindra, N. M., Sopori, B., Gokce, O. H., Cheng, S. X., Shenoy, A., Jin, L., Abedrabbo, S., Chen, W. and Zhang, Y., 2001, "Emissivity Measurements and Modeling of Silicon-Related Materials: An Overview," *Journal of Thermophysics*, Vol. 22, No. 5, pp. 1593~1611.
- (21) Kim, K. W., Lee, J. H., Suh, J. and Cho, H. Y., 2007, "Finite Element Analysis for Prediction of Band Shape of Nd:YAG Laser Fillet Welding," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 31, No. 8, pp. 839~846.

- (22) Cook, R. F., 2006, "Strength and Sharp Contact Fracture of Silicon," *Journal of Material Science*, Vol. 41, pp. 841~872.
- (23) Jeong, S. M., Park, S. E., Oh, H. S. and Lee, H. L., 2004, "Evaluation of Damage on Silicon Wafers using the Angle Lapping Method and a Biaxial Fracture Strength Test," *Journal of Ceramic Processing Research*, Vol. 5, No. 5, pp. 171~174.
- (24) Choi, S. H., Kim, C. S., Jhang, K. Y. and Shin, W. S., 2011, "Influence of Surface Roughness on Morphology of Aluminum Alloy After Pulsed-Laser Irradiation," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 35, No. 9, pp. 1105~1111.