

태양전지 실리콘 웨이퍼에서의 레일리기준 기반 레이저산란 패턴 분석 및 결함 검출

Investigation of Laser Scattering Pattern and Defect Detection Based on Rayleigh Criterion for Crystalline Silicon Wafer Used in Solar Cell

연정승¹, 김경범^{2,✉}Jeong Seung Yeon¹ and Gyung Bum Kim^{2,✉}¹ 충주대학교 항공기계설계학과 대학원 (Graduate School, Aeronautical & Mechanical Design Eng., Chungju National Univ.)² 충주대학교 항공기계설계학과 (Aeronautical & Mechanical Design Eng., Chungju National Univ.)

✉ Corresponding author: kimgb@cju.ac.kr, Tel: 043-841-5378

Manuscript received: 2010.9.2 / Revised: 2011.1.17 / Accepted: 2011.2.7

In this paper, patterns of laser scattering and detection of micro defects have been investigated based on Rayleigh criterion for silicon wafer in solar cell. Also, a new laser scattering mechanism is designed using characteristics of light scattering against silicon wafer surfaces. Its parameters are to be optimally selected to obtain effective and featured patterns of laser scattering. The optimal parametric ranges of laser scattering are determined using the mean intensity of laser scattering. Scattering patterns of micro defects are investigated at the extracted parameter region. Among a lot of pattern features, both maximum connected area and number of connected component in patterns of laser scattering are regarded as the important information for detecting micro defects. Their usefulness is verified in the experiment.

Key Words: Defect Detection (결함검출), Laser Scattering (레이저산란), Maximum Connected Area (최대연결면적), Rayleigh Criterion (레이리기준), Silicon Wafer (실리콘웨이퍼), Solar Cell (태양전지)

1. 서론

최근 화석에너지 고갈현상과 환경오염문제가 크게 대두되고 있는 가운데 그린에너지에 대한 관심이 높아지고 있다. 그 중 태양전지(solar cell)를 이용한 태양광 발전은 신재생 청정에너지로 각광받고 있다. 특히 1 세대 태양전지에 속하는 단결정 실리콘(mono silicon) 태양전지의 경우 광전효율이 27%~37%로 가장 우수하여 실생활에서부터 항공, 우주, 첨단 산업까지 가장 널리 사용되고 있다.^{1,2}

단결정 실리콘 태양전지의 제조 과정에서는 웨이퍼의 형상 결함 및 표면 결함, 마이크로 크랙

(micro-crack), 질화 규소(SiN) 증착 두께, 태양전지 셀 특성 등에 대한 전수검사를 수행하고 있다.

그 중 원재료 검사에 해당하는 단결정 실리콘 웨이퍼의 표면 형상과 표면 결함 검사는 박형화(slimming)되어가는 웨이퍼의 공정 중 파손을 방지함과 동시에 태양전지의 효율에 악영향을 미치는 것을 미연에 방지하고, 생산비 절감 측면에서 가장 중요하게 다루어지고 있다. 따라서, 이를 위한 적외선 열화상(infrared thermography)과 초음파 열화상(ultrasonic thermography) 기술을 이용한 마이크로 크랙(crack)을 검출하는 다양한 방법³은 제안되어 적용되고 있다. 그러나 태양전지용 실리콘

웨이퍼를 위한 형상 결함(topology defect), 표면 결함(surface defect) 그리고 마이크로 결함(micro defect)을 위한 검사 모듈 및 검사 기기에 대한 연구는 미비한 실정이다. 또한, 스크래치(scratch), 핀홀(pinhole) 그리고 매우 얇고 상대적으로 넓은 영역의 덴트(dent), 함몰(inclusion) 등과 같이, 검출이 어렵고 직관적인 마이크로 결함을 대상으로 영상 취득을 위한 조명계 및 광학계 설계를 통해 간단하며 일관된 검사 모듈 연구에 초점을 두지 않았다. 반면, 검출이 비교적 명확한 형상 및 표면 결함을 대상으로 영상처리 기반의 복잡한 영상 및 기타 신호처리 알고리즘을 개발하는데 치중되어 고비용의 계산, 시스템 비용의 증가, 검출의 신뢰성 등에 따른 문제점이 발생하고 있다.^{4,5}

따라서, 본 연구에서는 태양전지용 실리콘 웨이퍼의 표면에 존재하는 마이크로 결함을 대상으로 레이저산란(laser scattering) 메커니즘을 구성하여 비교적 간단하고 신뢰성 있는 결함 검출 정보를 도출하기 위한 레이저산란 분석을 시도하고자 한다. 우선, 레이저산란 광학계를 구성하고 레일리기준(Rayleigh criterion) 기반 레이저 입사각을 정한 다음, 카메라 관찰각 변화에 따른 레이저산란 패턴을 분석하였다. 이 분석 결과, 마이크로 결함 검출을 위한 레이저산란 변수 영역이 도출되었다. 이 변수영역에서 마이크로 표면결함의 레이저산란 패턴분석을 통해, 최대산란연결면적 및 산란연결성분의 수인 패턴 특징이 무결함 웨이퍼 대비 차별화됨을 규명하였다. 이를 통해 레이저산란 광학계를 통한 마이크로 표면 결함 검출을 위한 중요한 설계자료로 사용할 수 있을 것으로 확신한다.

2. 실리콘 웨이퍼의 광산란 속성

태양전지용 단결정 실리콘 웨이퍼는 Fig. 1 과 같은 제조공정에 따라 제작된다. 제조공정 중 연마, 와이어 절단(wire sawing) 등의 공정은 웨이퍼의 표면에 가공손상을 입히고 이러한 손상을 제거하기 위한 목적으로 식각(etching) 등의 작업을 수행한다.

Fig. 2 는 식각공정 후의 단결정 실리콘 웨이퍼 표면의 3 차원 마이크로 형상의 특징을 보여주는 AFM(atomic force microscope) 측정 영상이다. 보통 연삭, 래핑 가공과 같은 기계가공 후에는 가공결(machined lay)이 형성되어 가공결의 특징을 내포하고 있는 특정한 산란광 패턴이 형성된다. 그러나,

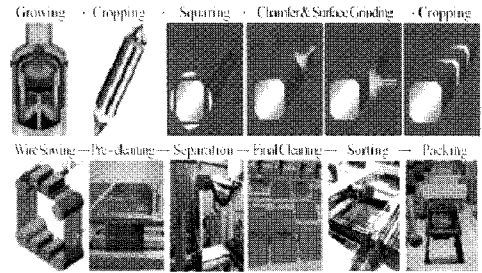


Fig. 1 Production process of crystalline silicon wafer

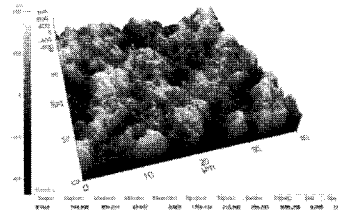


Fig. 2 3D AFM image of crystalline silicon wafer

식각 공정 후의 단결정 실리콘 웨이퍼 표면의 경우, 가공결과 같은 특징이 나타나지 않는 완전한 랜덤표면이 형성되기에 이러한 표면에서 특정한 광산란광 패턴을 해석하기가 쉽지 않을 것이라 판단된다.^{6,7}

일반적인 표면에서 나타나는 반사광 성분은 정반사 성분과 산란광 성분으로 그 반사광 특징을 묘사할 수 있다. 만약 표면이 매끄럽다면 정반사 성분이 증가하고 산란광 성분은 줄어들 것이고, 거친 표면에서는 정반사 성분이 감소하고 산란광 성분이 증가할 것이다. 또한 이때 나타나는 산란광 성분은 특정 조건을 제외하면 보통 강한 광 강도 값을 갖는 정반사성 성분을 중심으로 가우시안(Gaussian) 형태로 나타난다.⁸

기하학적인 고려 안에서, 반사표면의 기하학적 반사 속성은 광의 입사복사조도(irradiance)에 대한 반사복사조도(radiance)의 비로 정의 되는 양방향 반사율 분포함수(BRDF; bidirectional reflectance distribution function)로 그 특성을 묘사할 수 있다.^{9,10} 양방향 반사율 분포함수의 인자들을 고찰해보면 표면의 반사율, 색상, 조직, 광택 등과 같은 물리 상수들이 일정하게 유지된다면 표면 위에서 나타나는 산란광은 결국 표면의 마이크로 형상에 의해 변화된다는 것을 알 수 있다. 이처럼 표면 정보를 내포한 산란광의 속성이 기하광학적인 측면이 두드러지는 하나 빛의 전자기적 특성을 함께 고려하면 광의 파장, 표면 물질의 전도성, 광의

파장과 관계된 표면거칠기 범위, 광의 입사방향과 검출기 사이의 기하학적 관계, 입사광의 복사조도와 선속에 의해 레이저산란광의 양상이 변화함을 알 수 있다.

이와 같이 반사표면에서 일어나는 레이저산란 광 속성들을 종합해보면 결국, 산란광의 양상은 반사표면의 기하학적인 마이크로 형상의 지배적인 영향을 받고, 레이저의 입사각(incident angle)에 따라 레이저산란광의 강도가 달라지며, 레이저산란광을 검출하는 관찰각(viewing angle) 또한 매우 중요함을 알 수 있다. 또한 단결정 실리콘 웨이퍼와 같이 완전한 랜덤표면에서 나타나는 레이저산란광은 특정한 패턴이 형성되기 보다는 표면 거칠기(surface roughness)에 의해 발생하는 헤이즈(haze) 성분만이 검출될 것이라 판단된다

3. 레이저산란 패턴 분석 및 결함 검출

3.1 레일리산란 메커니즘

단결정 실리콘 웨이퍼 표면에서 나타나는 레이저산란 패턴의 특성을 알아보기 위해 Fig. 3 과 같이 기존 연구^{6,7,11}를 토대로 레이저산란 메커니즘을 새롭게 설계하여 실험을 수행하였다. 우선 검출부의 경우 비전시스템을 적용하여 영상을 통해 가시적으로 산란광의 경향을 파악할 수 있게 구성하였고, 광원으로는 직진성이 강하고 636.6nm의 파장을 갖는 스폿(spot) 형태의 Stockeryale 사의 SNF 레이저를 사용하였다. 2 장에서 고찰한 바와 같이 레이저의 입사각과 산란광을 검출하는 카메라의 관찰각이 중요하므로 기구부의 θ_i 와 θ_o 를 표준법선을 기준으로 레일리기준을 만족하도록 $\pm 90^\circ$ 까지 구현이 가능하게 하였다. 또한 다양한 방향에서 레이저산란의 편향성을 규명하기 위해 카메라 방위각 ϕ_o 를 X 축을 기준으로 $\pm 90^\circ$ 까지 구현 가능하게 하였다. 검사 테이블의 경우, $\pm 15^\circ$ 까지 경사각 구현이 가능한 피치(pitch) 스테이지를 복합적으로 구성하여 경사면에서 일어나는 레이저산란광의 편향성을 인위적으로 구현 가능하게 하였고, ϕ_o 이 $0^\circ \sim 360^\circ$ 까지 회전하는 회전(rotation) 스테이지는 동일한 물체에 대해서 테이블의 롤(roll)스테이지를 대치하는 역할을 하도록 구성하였다. 마지막으로, 선형모터를 이용하여 웨이퍼를 이동시키고 향후 라인스캔카메라(line scan camera)를 적용하여 인라인(in-line) 검사시스템 구현 시 유연하게 대처할 수 있도록 구성하였다.

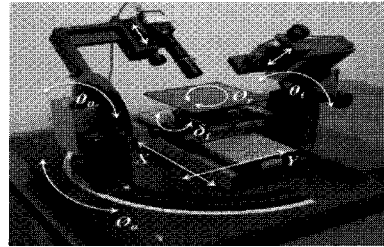


Fig. 3 Laser scattering mechanism

3.2 레일리기준 기반 레이저산란 패턴 분석

이와 같은 레이저산란 메커니즘을 이용하여 단결정 실리콘 웨이퍼 표면에서 나타나는 레이저산란 패턴의 경향을 알아보는 실험을 수행하였다. 수행한 실험 조건으로는 레이저 입사각의 경우 카메라와의 기구적인 간섭을 피할 수 있는 최소각과 레일리기준을 토대로 만족하지 않은 두 개의 각도와 레일리기준을 만족하는 정반사 성분을 강하게 나타내는 두 개의 스침 입사각(grazing incident angle)을 사용하였다.

스침 입사각은 거친 표면(rough surface)을 이상적인 광학 표면(specular surface)처럼 여기려 할 때 사용하며 이것은 레일리 기준식(Rayleigh's criterion)¹¹으로부터 도출할 수 있다. Fig. 4 에서 광선 1 과 광선 2 가 스침 입사각도로 형상 높이 h 를 가지는 표면에 입사할 때, 두 개의 광선의 광로차(optical path difference) Δr 은 식 (1)과 같고 위상차(phase difference) $\Delta\Phi$ 는 식 (2)와 같이 된다. 여기서, λ 는 광의 파장이고 위상차가 작은 경우, 두 광선은 간섭이 일어나 정반사(specular) 성분이 된다. 또한, 위상차가 0, 즉 평평한 표면에서 간섭은 최대이고 반면, 위상차가 π 인 경우에는 일어나지 않는다. 입사각을 증가함으로써 더 많은 에너지가 정반사 방향에서 나타난다.

$$\Delta r = 2h \cos \theta_i \tag{1}$$

$$\Delta \Phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r = \frac{4\pi h}{\lambda} \cos \theta_i \tag{2}$$

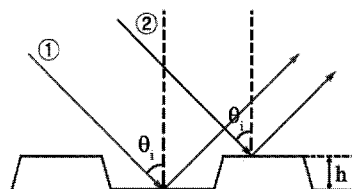


Fig. 4 Rayleigh criterion for dominance of the specular against diffuse reflectance

$\Delta\Phi < \pi/2$ 인 경우, 정상적인 간섭이 기대되고 식 (2)를 이 부등식에 대입하면 표면이 완만한, 즉 정반사가 일어나게 하는 조건, 즉 아래의 레일리 기준식을 유도할 수 있다.

$$h < \frac{\lambda}{8\cos\theta_i} \quad (3)$$

여기서, θ_i 는 레이저의 입사각이고 h 는 단결정 실리콘 웨이퍼의 표면거칠기 Ra 를 의미한다.

본 실험에 사용한 단결정 실리콘 웨이퍼의 표면거칠기는 AFM 을 이용하여 Table 1 과 같이 10 번의 측정을 반복하여 Ra 평균값 0.212 μm 을 이용하였다. 여기서, 레이저의 파장과 실리콘 웨이퍼의 표면거칠기를 레일리 기준에 적용하면 레이저의 입사각은 67.8° 보다 커야 함을 알 수 있다. 이 조건이 만족한 레이저입사각에서는 표면이 평탄 즉 정반사된다고 고려되는 것을 의미한다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 현상을 레이저산란 패턴을 통해 고찰하기 위해 계산된 레일리기준 각도보다 크고 작은 각도 30°, 60°, 70°, 75°, 80° 를 선정하여 실험하였다. 여기서, 레이저산란 패턴을 분석하기 위한 카메라 관찰각은 입사평면(incident plane) 안에서 0° ~ 80° 까지 10° 간격으로 균등하게 설정하였다. 실험을 통해 획득한 레이저산란 영상을 Fig. 5 에 나타내었다. 이 영상은 10 점의 레이저산란 영상 중 하나이다. 레이저산란 영상 안에서 밝게 나타나는 레이저산란광 성분들을 각각 가시적으로 비교해 보면 레이저 입사각이 30° 일 때 레이저산란광 성분들이 전반적으로 강하게 나타나고 큰 입사각에서는 레이저산란광 성분들이 현저히 줄어들 수 있다. 이는 레이저 입사각이 커짐에 따라 근축광선에 가까워져 정반사 성분이 강해지고 산란광 성분이 줄어들기 때문이다.

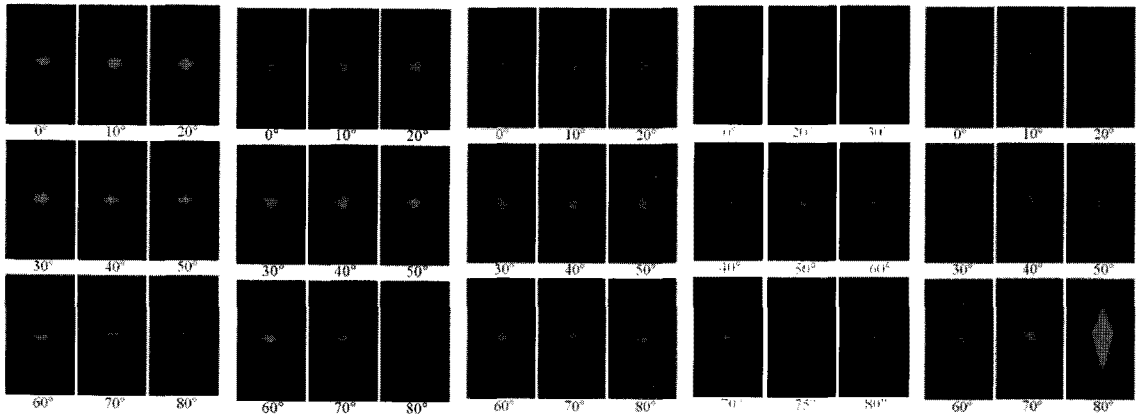
또한, 카메라 검출각이 커짐에 따라 샤임플러그(Scheimpflug) 효과가 나타나 세로방향의 산란광 분포 영역이 줄어들어도 확인할 수 있다. 이는 데이터 분석 시 영상내의 전체 레이저산란광 성분을 대상으로 하면 잘못된 결과를 나타낸다는 것을 의미한다. 획득한 레이저산란 영상의 광 강도를 기반으로 분석한 결과를 Fig. 6 에 도시하였다. 레이저산란광의 강도 산출은 웨이퍼의 산란 면적 및 입체각을 최대한 반영하기 위해 샤임플러그 효과에 영향을 받지 않고 레이저산란 패턴을 포함하는 영상 중앙의 일정 영역에서 평균 산란 강도를 계

산하여 정규화하였다. 여기서, 레이저산란 강도의 신뢰성을 확보하기 위해 웨이퍼 상에서 임의의 10 점을 선정하고 이에 대한 레이저산란 패턴을 획득하여 평균 산란 강도를 추출하였다.

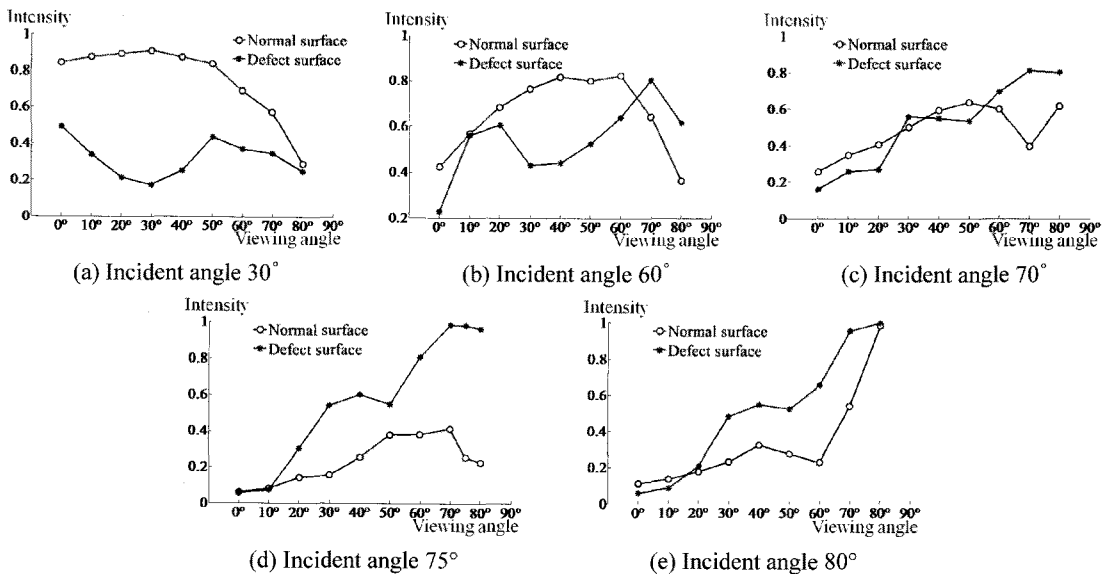
그래프에서 가로축은 카메라 관찰각을 나타내고 세로축은 검출된 레이저산란광의 강도를 보여준다. 우선, Fig. 6(a)를 살펴보면 작은 레이저 입사각 30° 에서 검출한 레이저 산란광의 강도는 정반사 성분인 관찰각 30° 에서 가장 강한 광 강도를 나타냄을 알 수 있다. 또한 이때 정반사 성분을 중심으로 가우시안 형태의 레이저산란광의 강도가 형성됨을 확인 할 수 있다. 마찬가지로, 레일리기준 계산각보다 다소 적은 레이저 입사각이 60° 인 Fig. 6(b)의 경우도 정반사 성분인 카메라 관찰각 60° 에서 가장 강한 레이저산란광의 강도는 보여주지만 이정반사각을 중심으로 가우시안 형태가 다소 변형되는 것을 볼 수 있다. 레일리기준을 만족하는 레이저 입사각 근처인 70° 인 Fig. 6(c)의 경우를 살펴보면, 가장 강한 광 강도를 중심으로 레이저 입사각 60° 의 현상보다 더 변형된 비대칭 가우시안 형태로 레이저산란광 분포의 특징은 유지되지만, 가장 강한 광 강도가 정반사 성분 영역에 존재하지 않고 레이저입사각보다 대략 20° 적은 카메라 관찰각 50° 로 이동한 것을 확인 할 수 있다. 이것은 표면에서 복잡하게 이루어지는 레이저산란 현상의 비직관적인 모습¹² 을 잘 표현해주고 있다. 또한, 레이저 입사각 30° 와 60° 보다 레이저 산란의 정반사 성분이 상대적으로 대략 30% 정도 약해진 것을 확인할 수 있다. 레일리기준을 만족하는 Fig. 6(d)의 레이저 입사각 75° 의 경우, 가장 강한 레이저산란 강도는 5° 가 적은 70° 에서

Table 1 Surface roughness of silicon wafer

Wafer No.	Rq(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
1	0.300	0.239	2.083
2	0.259	0.206	1.695
3	0.273	0.213	2.987
4	0.256	0.201	2.079
5	0.254	0.200	1.912
6	0.243	0.196	1.750
7	0.294	0.232	1.969
8	0.281	0.226	1.578
9	0.246	0.191	2.150
10	0.267	0.212	2.925
Mean	0.267	0.212	2.113



(a) Incident angle 30° (b) Incident angle 60° (c) Incident angle 70° (d) Incident angle 75° (e) Incident angle 80°
 Fig. 5 Laser scattering images according to change of viewing angle



(a) Incident angle 30° (b) Incident angle 60° (c) Incident angle 70°
 (d) Incident angle 75° (e) Incident angle 80°
 Fig. 6 Distributions of laser scattering intensity according to change of viewing angle

발생하고 있고, 레이저 입사각 70° 에서와 마찬가지로 비대칭 가우시안 분포의 형태이다. 여기서 중요한 점은 레이저 입사각 75°, 카메라 관찰각 70° 에서의 레이저산란 강도는 레일리기준을 만족하지 않는 레이저 입사각 30°, 60° 의 정반사 성분보다 대략 50%가 감소되어 마이크로 결함 검출 시 중요한 정보로 이용될 것임을 알 수 있다. Fig. 5(e)의 레이저 입사각 80° 에서 이전의 연구결과와는 다르게 강한 산란광성분이 검출됨을 확인할 수 있다. 이는 실험을 수행할 때 나타난 잡음(noise)이나 기구적인 오차일수도 있겠지만 가장 강하게 나타난 광 강도와 유사한 값을 나타내는 것으로 보

아 카메라와 마주보고 있는 표면의 경사면에 조사된 레이저의 일부가 스침입사각 조건이 성립되어 강하게 카메라로 수렴된 현상이라 추정된다. 마지막으로, 레이저 입사각이 80° 인 Fig. 6(e)의 경우 정반사 성분에서 가장 강한 광 강도 값을 얻을 수 있었다. 반면, 기존에 가우시안 형태로 형성되던 레이저산란광의 강도 분포가 카이제곱(Chi-square) 분포와 유사한 비대칭 형상으로 변화되었다. 이는 광이 스침 입사각으로 조사될 경우 전반사에 가까운 정도로 정반사 성분이 강해지고 산란되는 확산광 성분(diffuse component)이 감소하기에 나타나는 현상으로 간주된다.

결국, 레일리기준 기반 입사각보다 적은 레이저 입사각에서는 레이저산란의 광 강도 분포는 가우시안 형태이며 이것은 표면이 거칠어 확산된 레이저산란광 성분이 반사됨을 알 수 있다. 반대로, 레일리기준 기반 입사각보다 큰 레이저 입사각에서는 가우시안 형태와 다른 형태를 보이고 실리콘 웨이퍼 표면이 이상적으로 광학적인 평탄면이고 정반사가 되는 것으로 고려된다. 여기서, 정반사되는 영역이 일정 각도만큼 적은 카메라 관찰각으로 이동되는 것을 확인할 수 있다. 이때, 레이저산란 강도가 상대적으로 상당히 감소되는 점을 알 수 있다. 따라서, 이 정보를 근거로 마이크로 결함에 대한 레이저산란 패턴 분석 및 연구를 통해 위 정보의 효용성을 검증하고 또한, 레이저산란 패턴의 특징을 도출하여 마이크로 결함 검출을 위한 근거를 마련하고자 한다.

3.3 레이저산란 패턴 기반 마이크로 결함 검출

본 연구에서는 이상의 분석으로부터 결함과 무결함의 레이저산란강도 기반으로 도출된 레이저 입사각 75° 와 카메라 관찰각 70° 를 레이저산란 메커니즘에 적용하여 마이크로 결함을 추출할 수 있는 근거를 도출하고자 한다.

Fig. 7 은 단결정 실리콘 웨이퍼의 마이크로 결함에 대한 모의 실험을 위해 실리콘 웨이퍼 시편을 FIB(focused ion beam)으로 길이와 폭을 64 μm, 32 μm으로 하고 깊이를 각각 4 μm, 16 μm, 32 μm으로 가공하여 전자현미경으로 취득한 영상이다. 본 실험에서는 길이 64 μm, 폭 32 μm, 깊이 4 μm인 마이크로 결함을 사용하였다. 이 치수는 매우 얇은 깊이와 상대적으로 넓은 영역에 존재하는 마이크로 결함 중 스크래치, 덴트, 함몰 등을 반영하여 정한 것이다. 또한, 실험의 복잡도와 실제 결함 입수의 어려움이 고려되었다.

3.2 에서 레이저산란 강도 기반으로 고찰된 레이저산란 변수의 검증과 마이크로 결함 검출을 위한 정보 도출을 위해 마이크로 결함의 레이저산란 패턴을 취득하였다. 마이크로 결함에 대한 레이저산란 영상은 Fig. 8 에 나타내었다. Fig. 9 는 무결함 웨이퍼와 결함웨이퍼에서의 최대산란연결면적(maximum connected area of scattering)을 비교한 것이다. 최대산란연결면적은 마이크로 결함으로부터의 산란이 많이 발생할 가능성이 예상되므로 레이저산란 영상의 특징으로 결정하였다. 왜냐하면, 레일리기준으로 레이저 입사각을 선정하고 카메라

관찰각은 이때의 입사각보다 작은 암시야 영역이기 때문이다. 무결함웨이퍼의 최대산란연결면적은 Fig. 5 의 레이저산란영상을 이용하였다. 최대산란연결면적은 무결함과 결함 영상에서 문턱치값(threshold)을 80 으로 선정하여 라벨링과정(labeling process)을 통해 연결된 성분 중에서 최대의 연결 성분을 웨이퍼의 10 군데에서 각각 도출하여 평균하였다. 여기서, 앞의 3.1 에서 중요 레이저산란 변수로 도출된 Fig. 9(d)의 레이저 입사각 75° , 카메라 관찰각 70° 에서 무결함 웨이퍼와 결함 웨이퍼의 최대산란연결면적이 많은 차이를 보이고 있어 결함 검출에 중요한 정보로 사용된다고 판단된다. 이 현상은 레이저 입사각은 레일리기준을 충분히 만족하고 있어 실리콘 웨이퍼 표면이 거친 표면이 아닌 이상적인 광학표면이라 가정되었고 카메라 관찰각 70° 암시야(dark-field) 영역에서 마이크로 결함으로부터 정반사가 아닌 산란 확산영역이 매우 큼을 알 수 있다. 최대산란연결면적과 마찬가지로, 무결함 웨이퍼와 마이크로 결함으로부터의 레이저산란의 비교를 정량적으로 파악하기 위해 레이저산란의 연결성분(connected component of scattering)들의 수를 Fig. 10 에서 고찰하였다. 이상의 레이저산란 변수조건에서 레이저산란이 무결함 웨이퍼보다 상대적으로 마이크로 결함으로부터 많은 양이 발생할 것을 예상할 수 있어 레이저산란의 연결된 성분의 수를 이용하였다. 본 실험에서도, 레이저 입사각 75° 인 Fig. 10(d)에서, 관찰각에 따라 무결함웨이퍼의 레이저산란연결성분이 증가하다 감소하는 영역에서 반대로, 마이크로결함의 경우는 매우 적은 양으로부터 관찰각 70° 에서 급격하게 커짐을 알 수 있다. 위의 실험을 바탕으로 레이저 입사각 75° , 카메라 관찰각 70° 에서 결함 검출을 위한 모의 검증 실험을 실행하였다. 실험에는 무결함 웨이퍼내의 임의 100 점과 Fig. 7 에 나타낸 세가지 결함 내에서 각 20 점 영상을 이용하였고 그 결과는 Fig. 11 에 나타내었다. Fig. 11 에서 가로축은 실험 횟수를 의미하고 세로축은 최대산란연결면적을 정규화한 것이다. 이 검증실험

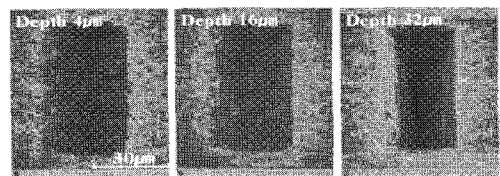
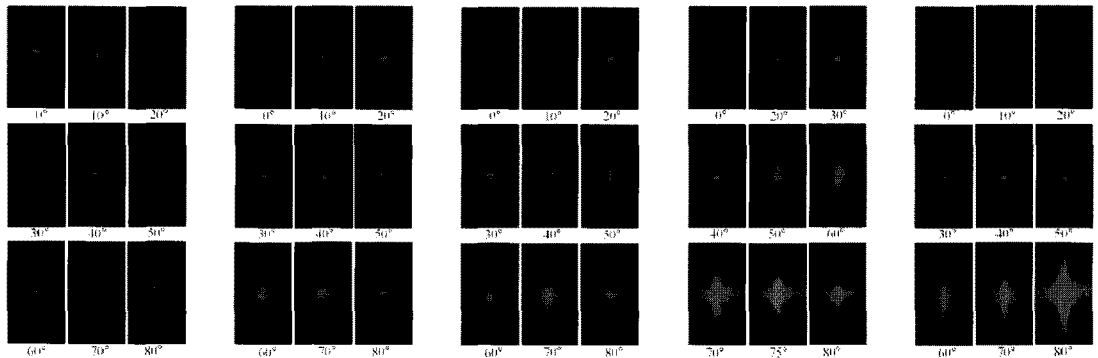


Fig. 7 SEM images of defects machined by FIB



(a) Incident angle 30° (b) Incident angle 60° (c) Incident angle 70° (d) Incident angle 75° (e) Incident angle 80°

Fig. 8 Scattered images of a defect according to change of viewing angle

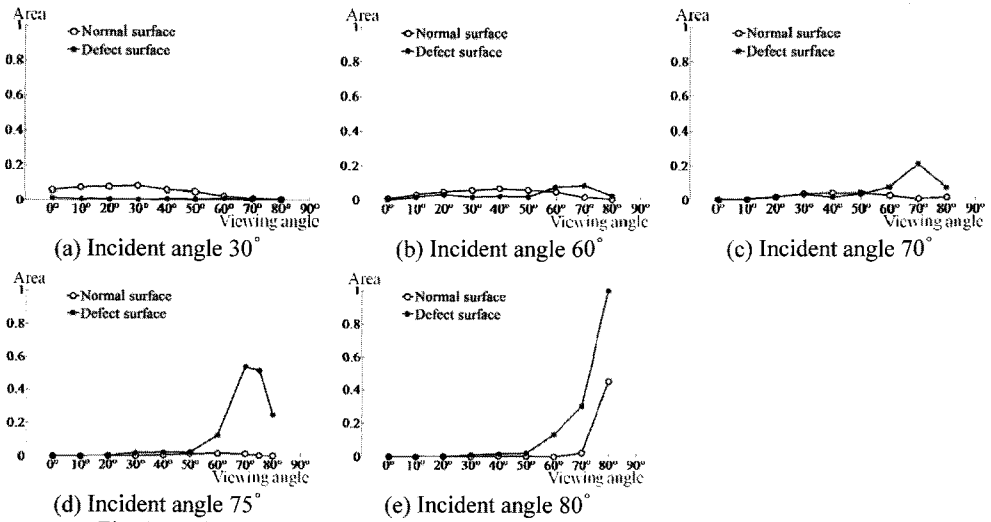


Fig. 9 Maximum connected area of scattering for different incident angles of laser

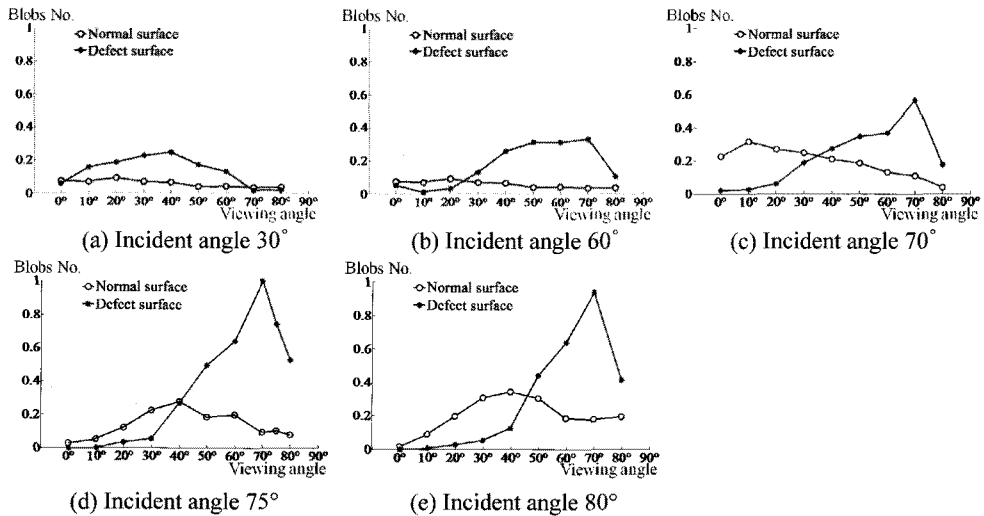


Fig. 10 Connected component number of scattering for different incident angles of laser

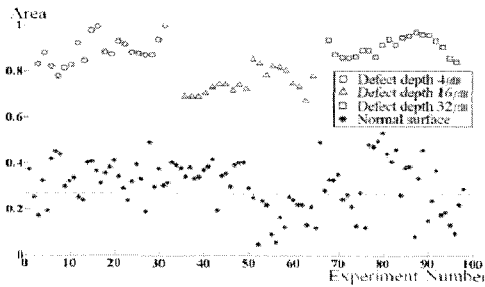


Fig. 11 Maximum connected area of scattering (Incident angle 75°, Viewing angle 70°)

에서 세가지 결함의 최대산란연결면적이 무결함의 최대산란면적에 비해 2~3 배 증가하여 무결함과 결함의 구분이 뚜렷함을 보였다. 이상의 레일리기준 레이저산란 패턴 분석과 검증 실험을 통해 레이저산란 변수를 도출한 후, 실리콘 웨이퍼 표면의 마이크로 결함의 유무를 검출할 수 있는 중요한 정보를 얻을 수 있었다.

4. 결론

본 논문에서는 태양전지용 실리콘 웨이퍼의 레이저산란 패턴 분석을 실험적으로 고찰하였고 또한 마이크로 표면결함의 검출을 위한 중요 설계정보를 얻을 수 있었다.

레일리기준에 의한 레이저 입사각을 기준으로 레이저산란 광의 분포는 정반사 영역 중심으로 가우시안 분포와 비대칭적인 카이제곱 분포로 형성되었다. 여기서, 레이저 입사각 75°와 카메라 관찰각 70°에서 무결함 웨이퍼의 산란강도가 결함 웨이퍼의 산란강도보다 상대적으로 큰 양이 감소하여 이때의 입사각과 관찰각이 결함 검출의 중요한 정보가 됨을 알 수 있었다. 이 도출된 레이저산란 변수를 기반으로 결함 및 무결함 웨이퍼에서 검증 실험한 결과, 최대산란연결면적 및 레이저산란연결성분들의 수가 결함 검출을 위한 중요한 설계 정보로 활용될 수 있었다고 판단된다.

후 기

본 연구는 2009 년 교육과학기술부 지역대학우 수과학자지원사업(2009-0064599) 및 중소기업청 산 학연협력사업의 지원을 받아 수행되었습니다. 이 에 감사드립니다.

참고문헌

1. Lee, J. H., "Current status and future prospects of solar cell," J. of KSPE, Vol. 25, No. 10, pp. 7-22, 2008.
2. Cho, Y. H., "Solar Cell," KISTI, 2002.
3. Byelyayev, A., "Stress diagnostics and crack detection in full-size silicon wafers using resonance ultrasonic vibrations," Department of Electrical Engineering, Ph. D. Thesis, University of South Florida, 2005.
4. Hilmersson, C., Hess, D. P., Dallas, W. and Ostapenko, S., "Crack detection in single-crystalline silicon wafers using impact testing," Applied Acoustics, Vol. 69, No. 8, pp. 775-760, 2008.
5. Tsai, D. M., Chang, C. C. and Chao, S. M., "Micro-crack inspection in heterogeneously textured solar wafers using anisotropic diffusion," Image and Vision Computing, Vol. 28, No. 3, pp. 491-501, 2010.
6. Hong, Y. K. and Kim, G. B., "A study on the analysis of laser scattering characteristics depending on surface shapes," Proceeding of KSPE Spring Conference, pp. 473-474, 2009.
7. Han, J. C. and Kim, G. B., "A Study on the optimal condition determination of laser scattering using the design of experiment," J. of KSPE, Vol. 7, No. 7, pp. 58-64, 2009.
8. Stover, J. C., "Optical Scattering Measurement and Analysis 2nd Edition," SPIE Press, 1995.
9. Beckmann, P. and Spizzichino, A., "The Scattering of electromagnetic waves from rough surface," Pergamon Press, 1963.
10. Nayar, S. K., Ikeuchi, K. and Kanade, T., "Surface reflection: physical and geometrical perspectives," IEEE Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 13, No. 7, pp. 611-634, 1991.
11. Bakolias, C., "Oblique imaging of scattered light for surface inspection," Department of Mechanical Engineering, Ph. D. Thesis, London University, 1996.
12. Guo, R. and Tao, Z., "The modified Beckmann-Kirchhoff scattering theory for surface characteristics in process measurement," Optics and Laser in Engineering, Vol. 47, No. 11, pp. 1205-1211, 2009.