

## 태양전지용 결정질 실리콘 웨이퍼에서의 레일리기준 기반 레이저산란의 광편향 분석에 관한 연구

김 경 범<sup>†</sup>

<sup>†</sup>국립 충주대학교 항공기계설계학과

### Study on Analysis of Optical Deflection of Laser Scattering Based on Rayleigh Criterion for Crystalline Silicon Wafer in Solar Cell

Gyung-Bum Kim<sup>†</sup>

<sup>†</sup>Aeronautical & Mechanical Design Engineering, Chungju National University

#### ABSTRACT

In this paper, optical deflection of laser scattering has been investigated based on Rayleigh criterion for crystalline silicon wafer in solar cell. A laser scattering mechanism is newly designed using light scattering properties in silicon wafer. Intensity distributions of laser scattering are different, depending on the incident angle of laser computed from Rayleigh criterion. In case of the incident angle satisfied with the criterion, they are asymmetric. Also, their specular reflection angle is shifted to unpredicted ones. These phenomena are in accordance with previous theories of laser scattering. The optical deflection of laser scattering is experimentally identified with the designed laser scattering mechanism. Its mathematical model is presented from the geometric relationship of laser scattering. It is shown that the optical deflection of laser scattering agree with the presented model, exclusive of grazing angles which is satisfied with Rayleigh criterion.

**Key Words** : Crystalline silicon wafer, Laser scattering, Optical deflection, Rayleigh criterion, Solar cell

#### 1. 서 론

최근 화석에너지를 대체하는 청정에너지로 태양전지(solar cell)를 이용한 태양광 발전에 대한 관심이 높아지고 있다. 그 중에서 단결정질 실리콘을 이용한 태양광 발전이 발전효율과 반도체 및 디스플레이산업의 인프라(infra) 이용에 대한 이점으로 당분간 태양전지 시장을 주도 할 것으로 예상된다[1].

원재료 검사에 해당하는 단결정 실리콘 웨이퍼의 표면 형상과 표면 결함 검사는 박형화(slimming) 되어가는 웨이퍼의 공정 중 파손을 방지함과 동시에 태양전지의 효율에 악영향을 끼치는 것을 미연에 방지하고, 생산비 절감 측면에서 가장 중요하게 다루어지고 있다. 이를 위한 적외선 열화상(infrared thermography)과 초음파 열화상(ultrasonic thermography) 기술을 이용한

마이크로 크랙(crack)을 검출하는 다양한 방법[2]은 제안되어 적용되고 있다. 그러나 태양전지용 실리콘 웨이퍼를 위한 형상 결함(topology defect), 표면 결함(surface defect), 마이크로 결함(micro defect)을 위한 검사모듈 및 검사기기에 대한 개발은 미비한 실정이다. 검출이 비교적 명확한 형상 및 표면 결함을 대상으로 복잡한 영상처리 알고리즘을 개발하는데 치중되어 고비용의 계산, 시스템 비용의 증가, 검출의 신뢰성 등에 따른 문제점이 발생하고 있다. 또한, 스크래치(scratch), 핀홀(pinhole) 그리고 매우 얇고 상대적으로 넓은 영역의 덴트(dent), 함몰(inclusion) 등과 같은 마이크로 결함은 검출이 어렵고 직관적이어서 조명계 및 광학계 설계를 통한 비전 기반 검사로는 실제 적용이 쉽지가 않다[3,4].

본 연구에서는 태양전지용 결정질 실리콘 웨이퍼의 표면을 대상으로 레이저산란(laser scattering) 메커니즘을 구성하고 레일리기준(Rayleigh criterion) 기반 레이저 입사각을 정한 다음, 카메라관찰각 변화에 따른 레

<sup>†</sup>E-mail : kimgb@cjnu.ac.kr

이저산란 패턴을 분석하였다. 또한, 레이저광학계의 피치(pitch) 스테이지 각도 조정을 통한 실리콘 표면의 경사(slope)면에서 일어나는 레이저산란의 광편향을 규명하였다. 향후, 레이저산란 광학계를 통한 마이크로 표면 결함 검출 시스템 개발을 위한 설계자료로 사용할 수 있을 것으로 확신한다.

## 2. 실리콘 웨이퍼의 광산란 속성

결정질 실리콘 태양전지의 제조 과정은 Fig. 1과 같이 화학적 식각(chemical etching), 표면조각화(texturisation), 에미터(emitter) 형성, 산화막(PSG; phosphor-silicate glass) 제거, 반사방지막(ARC; anti-reflection coating) 증착, 전·후면 금속전극 형성 및 열처리 공정, 성능 평가 및 분류 공정 순으로 진행되고 있으며, 각각의 공정을 시행하기 앞서 웨이퍼의 형상, 표면 결함, 마이크로 크랙(micro-crack), SiN 증착 두께, 태양전지 셀 특성과 같이 직전에 행해진 제조공정의 특성에 맞춰 전수검사를 시행하고 있다.

웨이퍼 제조과정 중 연마, 와이어 절단(wire sawing) 등의 공정은 웨이퍼의 표면에 가공손상을 입히고 이러한 손상을 제거하기 위한 목적으로 식각(etching) 등의 작업을 수행한다. Fig. 2(a)는 실험에 사용된 단결정 실리콘 웨이퍼이고 Fig. 2(b)는 Acid식각공정 후의 단결정 실리콘 웨이퍼 표면의 3차원 마이크로 형상의 특징

을 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, 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[5,6].

기하학적인 고려 안에서, 반사표면의 기하학적 반사 속성은 입사한 광의 복사조도(irradiance)에 대한 반사된 광의 복사조도(radiance)의 비로 정의 되는 양방향 반사를 분포함수(BRDF; bidirectional reflectance distribution function)로 그 특성을 묘사할 수 있다[7]. 양방향 반사를 분포함수의 인자들을 고찰해 보면 표면의 반사율, 색상, 조직, 광택 등과 같은 물리 상수들이 일정하게 유지된다면 표면 위에서 나타나는 산란광은 결국 표면의 마이크로 형상에 의해 변화 된다는 것을 알 수 있다. 이처럼 표면 정보를 내포한 산란광의 속성이 기하광학적인 측면이 두드러지기는 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 레이저산란광 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.

## 3. 레이저산란의 광편향 분석

### 3.1. 레이저산란 메커니즘 설계

단결정 실리콘 웨이퍼 표면에서 나타나는 레이저산란 패턴의 특성을 알아보기 위해 Fig. 3과 같이 기존 연구[5,8,9]를 토대로 레이저산란 메커니즘을 새롭게 설계하여 실험을 수행하였다. 우선 검출부의 경우 비전 시스템을 적용하여 영상을 통해 가시적으로 산란광의 경향을 파악할 수 있게 구성하였고, 광원으로는 직진성이 강하고 636.6nm의 파장을 갖는 스폿(spot) 형태의 Stockeryale사의 SNF 레이저를 사용하였다. 2장에서 고찰한 바와 같이 레이저의 입사각과 산란광을 검출하는 카메라의 관찰각이 중요하므로 기구부의  $\theta_1$ 와  $\theta_2$ 를 표준법선을 기준으로 레일리기준을 만족하도록  $\pm 90^\circ$ 까지 구현이 가능하게 하였다. 또한 다양한 방향에서 레

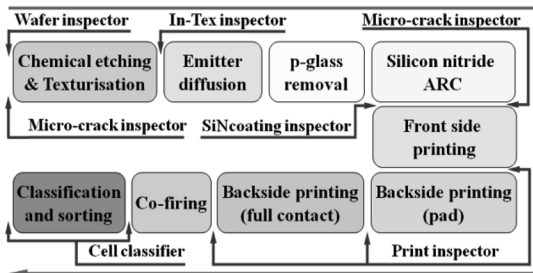
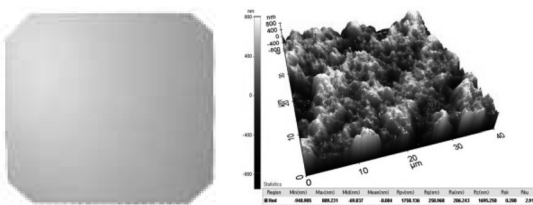


Fig. 1. Manufacturing system of solar cell.



(a) A bare silicon wafer (b) 3D AFM image

Fig. 2. Mono-crystalline silicon wafer.



Fig. 3. Laser scattering mechanism.

레이저산란의 편향성을 규명하기 위해 카메라 방위각  $\phi_a$ 를 X축을 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,  $\phi_s$ 이  $0^\circ \sim 360^\circ$ 까지 회전하는 회전(rotation) 스테이지는 동일한 물체에 대해서 테이블의 롤(roll)스테이지를 대체하는 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.

### 3.2. 레일리기준 기반 레이저산란 패턴

이와 같은 레이저산란 메커니즘을 이용하여 단결정 실리콘 웨이퍼 표면에서 나타나는 레이저 산란 패턴의 경향을 알아보는 실험을 수행하였다.

수행한 실험 조건으로는 레이저 입사각의 경우 카메라와의 기구적인 간섭을 피할 수 있는 최소각과 레일리기준을 토대로 만족하지 않은 세 개의 각도와 레일리기준을 만족하는 정반사 성분을 강하게 나타내는 하나의 스칩 입사각(grazing incident angle)을 사용하였다. 스칩 입사각은 거친 표면(rough surface)을 이상적인 광학표면(specular surface)처럼 여기려 할 때 사용하며 이것은 레일리기준식 (Rayleigh's criterion)[6,10]으로부터 식 (1)과 같이 도출할 수 있다.

$$h < \frac{\lambda}{8 \cos \theta_i} \quad (1)$$

여기서,  $\theta_i$ 는 레이저의 입사각이고  $h$ 는 단결정 실리콘 웨이퍼의 RMS(root mean square) 표면거칠기 Ra를 의미한다. 본 실험에 사용한 단결정 실리콘 웨이퍼[11]의 표면거칠기는 AFM을 이용하여 Table 1과 같이 10

회 측정을 반복하여 Ra 평균값  $0.212 \mu\text{m}$ 을 이용하였다. 레이저의 파장과 실리콘 웨이퍼의 표면거칠기를 레일리기준에 적용하면 레이저의 입사각은  $67.8^\circ$ 보다 커야 함을 알 수 있다. 이 조건이 만족한 레이저 입사각에서는 표면이 평탄 즉, 정반사된다고 고려되는 것을 의미한다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 현상을 레이저산란 패턴을 통해 고찰하기 위해 계산된 레일리기준 각도보다 크고 작은 각도  $30^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ$ 를 선정하였다. 여기서, 레이저산란 패턴을 분석하기 위한 카메라 관찰각은 입사평면(incident plane) 안에서  $0^\circ \sim 80^\circ$ 까지  $10^\circ$  간격으로 균등하게 설정하였다.

실험을 통해 획득한 레이저산란 영상을 Fig. 4에 나타내었고, 획득한 레이저산란 영상의 광 강도를 기반으로 분석한 결과를 Fig. 5에 도시하였다. 레이저산란광의 강도 산출은 웨이퍼의 산란 면적 및 입체각을 최대한 반영하기 위해 샤임플러그(scheimpflug) 효과에 영향을 받지 않고 레이저산란 패턴을 포함하는 영상 중앙의 일정 영역에서 평균 산란 강도를 정규화 하였다.

웨이퍼 상에서 임의의 10점을 선정하고 이에 대한 레이저의 패턴을 획득하여 평균 산란강도를 추출하였다. 그래프에서 X축은 카메라 관찰각을 나타내고 Y축은 검출된 레이저산란광의 광 강도를 보여준다. 우선, Fig. 5(a)를 살펴보면 레일리기준 보다 작은 레이저 입사각  $30^\circ$ 에서 검출한 레이저산란광의 강도는 정반사 성분인 관찰각  $30^\circ$ 에서 가장 강한 광 강도를 갖는 가우시안 형태의 레이저산란광의 강도가 형성됨을 확인할 수 있다. 마찬가지로, 레일리기준 계산각 보다 다소 작은 레이저 입사각이  $60^\circ$ 인 Fig. 5(b)의 경우도 정반사 성분인 카메라 관찰각  $60^\circ$ 에서 가장 강한 레이저산란

Table 1. Surface roughness of silicon wafer.

Wafer No.	Rq( $\mu\text{m}$ )	Ra( $\mu\text{m}$ )	Rz( $\mu\text{m}$ )
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

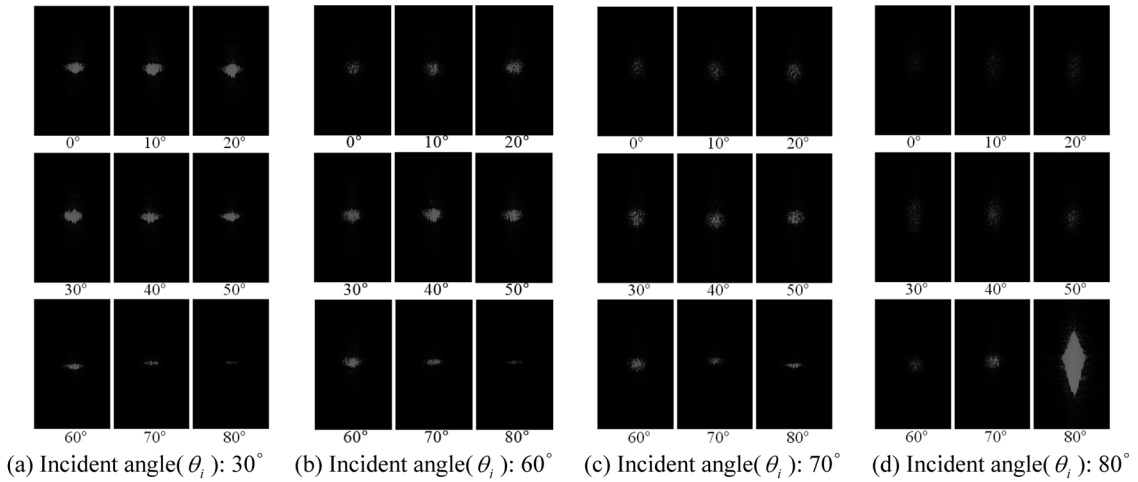


Fig. 4. Laser scattering images according to the change of viewing angle.

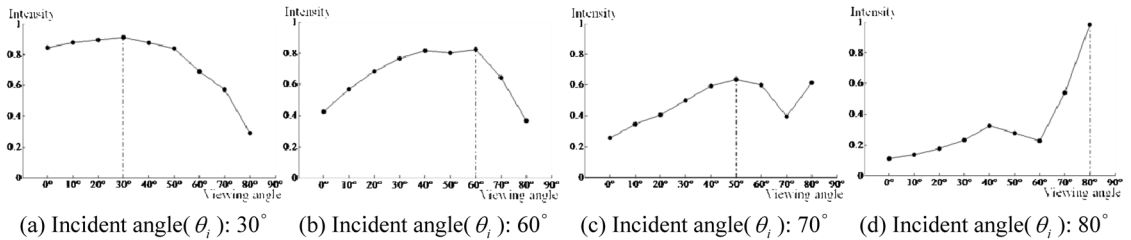


Fig. 5. Distributions of laser scattering intensity according to the change of viewing angle.

광의 강도는 보여주지만 이 정반사각을 중심으로 가우시안 형태가 다소 변형되는 것을 볼 수 있다.

레이리기준을 만족하는 레이저 입사각 근처인 70°인 Fig. 5(c)의 경우를 살펴보면, 가장 강한 광 강도를 중심으로 레이저 입사각 60°의 현상 보다 더 변형된 비대칭 가우시안 형태로 레이저산란광 분포의 특징은 유지되지만, 가장 강한 광 강도가 정반사 성분 영역에 존재하지 않고 레이저 입사각보다 대략 20°적은 카메라 관찰각 50°로 이동한 것을 확인 할 수 있다. 이것은 표면에서 복잡하게 이루어지는 레이저산란 현상의 비직관적인 모습[12]을 잘 표현해주고 있다. 또한, 레이저 입사각 30°와 60°보다 레이저산란의 정반사 성분이 상대적으로 대략 30% 정도 약해진 것을 확인 할 수 있다.

마지막으로, 레이저 입사각이 80°인 Fig. 5(d)의 경우 정반사 성분에서 가장 강한 광 강도 값을 얻을 수 있었다. 반면, 기준에 가우시안 형태로 형성되던 레이저 산란광의 강도 분포가 카이제곱(chi-square) 분포와 유사한 비대칭 형상으로 변화되었다. 이는 광이 스침 입사각으로 조사될 경우 전반사에 가까울 정도로 정반사 성분

이 강해지고 산란되는 확산광 성분(diffuse component)이 감소하여 나타나는 현상으로 간주된다.

결국, 레이리기준 기반 입사각 보다 작은 레이저 입사각에서는 레이저산란의 광 강도 분포는 가우시안 형태이며 이것은 표면이 거칠어 확산된 레이저산란광 성분이 반사됨을 알 수 있다. 반대로, 레이리기준 기반 입사각보다 큰 레이저 입사각에서는 가우시안 형태와 다른 형태를 보이고 실리콘 웨이퍼 표면이 이상적으로 광학적인 평탄면이고 정반사가 되는 것으로 고려된다. 여기서, 정반사되는 영역이 일각 강도만큼 적은 카메라 관찰각으로 이동되는 것을 확인할 수 있다. 이때, 레이저산란 강도가 상대적으로 상당히 감소되는 점을 알 수 있다. 따라서, 이 정보는 레이저산란 패턴 분석 및 고찰을 통해 마이크로 결함 검출을 위한 근거로 사용할 수 있다.

### 3.3. 레이저산란의 광편향 분석

표면으로부터 반사되는 광의 방향은 입사각에 의해 결정되는데 표면의 불규칙적인 마이크로 형상은 이

입사각에 영향을 미쳐 산란광의 광로(light ray)를 편향시킨다.

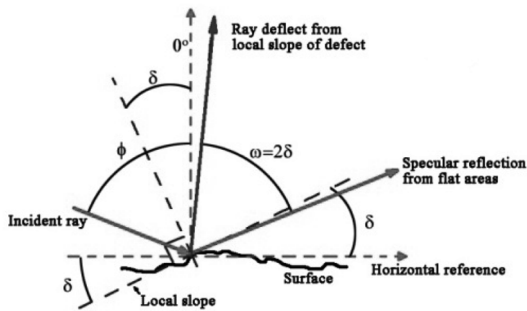


Fig. 6. Deflection of light ray from a flatness anomaly.

특히, 국소적으로 매우 작은 기울기를 갖는 함몰 및 돛트 결함의 경우 목시로 보기도 매우 힘들뿐더러 검출하기도 쉽지 않다. 따라서, 이러한 매우 얇고 상대적으로 넓은 영역에 걸친 마이크로 결함을 가시화하는데 있어 적절한 가정이 필요하다. 그것은 강한 정반사 성분 영역의 국소 표면 기울기에 따른 편향각에 의해 이동한다는 것이다. 이 편향각(deflection angle)은 Fig. 6의 간단한 기하학적 계산에 의해 아래식과 같이 정의된다.

$$\omega = 2\delta \quad (2)$$

여기서,  $\omega$ 는 편향각을,  $\delta$ 는 광이 조사된 표면 마이크로 형상 경사면의 최대 표준 기울기를 의미한다. 이는 결국 카메라에 의해 획득되는 광량이 광이 조사되는 레이저 입사각과 광이 조사된 표면의 경사면에 의해 변화된다는 것을 나타낸다. 결함 영역 안에서 최대 기울기가  $\delta_{\max}$ 인 경우, 이 결함이 검출되는 최소의 카메라 관찰각  $\delta_{o \min}$ 은 식 (3)과 같이 된다.

$$\theta_{o \min} = \theta_i - 2\delta_{\max} \quad (3)$$

이와 같이 기하학적으로 유도된 수학적 모델이 함몰 및 돛트 등과 같은 마이크로 표면 결함에서 실제의 광편향을 반영하는지를 규명하기 위해 레일리기준 기반으로 4개의 레이저 입사각을 이용하였고, 태양전지 실리콘 웨이퍼의 기울기를 레이저의 입사 방향과 마주하는 방향으로 0°에서 15°까지 5°씩 변화 시키며 실험을 수행하였다.

Fig. 7은 고정된 레이저 입사각에 대해 피치 스테이지를 이용하여 실리콘 웨이퍼의 기울기를 4단계로 구분하여 광편향을 실험한 그래프이다. 이는 마이크로 결함의 기울기를 피치스테이지를 이용하여 모의실험 하

고자 하였다. 레이저 입사각을 45°로 선정한 까닭은 큰 입사각에서 나타나는 비직관적인 현상이 나타나지 않아 안정적인 실험이 가능하고 레이저 입사각 60°와 70°의 적용은 레일리기준 각도보다 다소 적고 큰 주변 각도이기 때문이다. 80°의 적용은 스팀 입사각으로 간주되어 실험하기 위함이다. 획득한 그래프를 살펴보면, 레일리기준 각도 보다 작은 레이저 입사각의 경우, 실리콘 웨이퍼의 기울기가 변함에도 레이저산란 광의 분포는 정반사 성분 영역을 중심으로 가우시안 형태를 보인다. 반면 레일리기준 각도보다 큰 경우, 정반사 영역을 중심으로 비대칭의 다른 형태의 분포가 형성됨을 알 수 있다.

실리콘 웨이퍼 표면의 기울기가 0°일 때 정반사 성분 영역에서 안정적으로 광 강도가 높게 나타남을 알 수 있다. 이후, 4개의 레이저 입사각에 대해서 실리콘 웨이퍼 표면의 기울기가 변화함에 따라 레이저산란의 가장 강한 광 강도 성분은 그 기울기의 두 배만큼 레이저 입사각으로부터 작아지는 영역, 즉 식 (3)에 제시된 카메라 관찰각 방향으로 편향되는 것을 분명하게 확인할 수 있다. 다만, 레이저 입사각 70°, 표면기울기 0°인 경우에는 정반사 성분 영역에서 가장 강한 레이저산란광이 나타나야 되나 10°가 적은 카메라 관찰각 60°에서 보임을 Fig. 7(c)에서 확인할 수 있다. 마찬가지로, 레이저 입사각 80°인 경우, 실리콘 웨이퍼의 기울기 10°와 15°에서도 각각 10°적은 카메라 관찰각 70°와 40°에서 정반사 성분 영역이 뒹을 알 수 있다. 결국, 레일리기준 보다 큰 스팀 입사각에서 레이저산란광의 분포는 기존 연구 이론에서 제시한 정반사영역을 중심으로 대칭적인 형태를 보이는 것과는 다르게 비대칭적인 형태로 나타나고 그 레이저산란의 광편향이 식 (3)과는 다른 방향으로 광로가 형성되는 것을 알 수 있다.

Fig. 7(a)의 레이저 입사각 45°와 피치각 0° 그리고 Fig. 7(b)의 레이저 입사각 60°와 피치각 15°의 경우는 레이저빔과 웨이퍼의 상대각도 측면에서 동일하여 산란강도의 분포는 거의 동일하게 유지 되나 웨이퍼 기울기가 변하여 카메라로 입사되는 산란강도는 피치각도에 따라 더 크게 나타남을 알 수 있다.

마찬가지로, Fig. 7(b~d)의 다른 입사각과 피치각에서도 위와 동일한 현상이 나타남을 확인할 수 있다. 이러한 레이저산란의 광편향은 태양 전지의 실리콘 웨이퍼의 마이크로 결함 형상에서도 동일하게 나타날 것이라 추정된다. 향후, 이 정보를 토대로 마이크로 표면과 레이저 파장과의 연관성을 확인하고 레일리기준 각을 산출한 후, 레이저산란에 대한 광편향을 반구 영역 안에서 계산 및 추정이 제대로 수행된다면 실리콘 웨이퍼

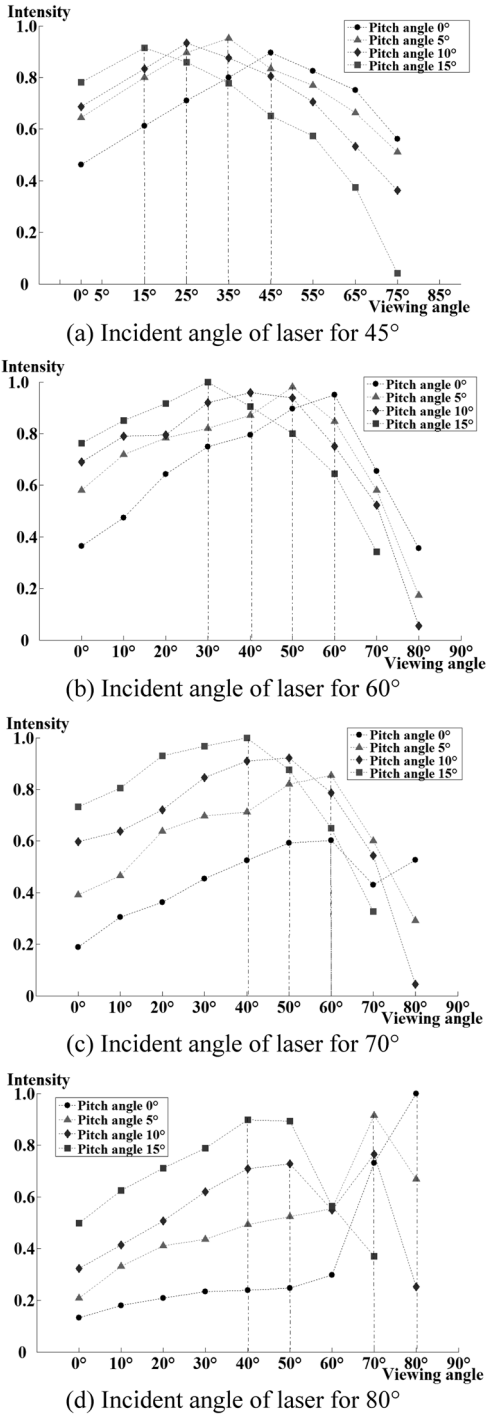


Fig. 7. Optical deflections for 4 surface slopes.

표면의 마이크로 결함의 유무와 그 형태를 추정할 수 있는 매우 중요한 설계 자료로 사용될 것으로 판단된다.

### 4. 결 론

본 논문에서는 태양전지용 실리콘 웨이퍼에 대한 레이저산란의 광편향을 새롭게 설계된 레이저산란 메커니즘에서 실험적으로 분석하였다.

레이저기준에 의한 레이저 입사각에 따라 레이저산란 광의 분포는 정반사 영역 중심으로 대칭적인 가우시안 분포와 비대칭적인 카이제곱 분포로 형성됨을 알 수 있었다. 또한 레이저기준 이상의 입사각 영역에서 레이저의 산란강도가 상대적으로 감소 하는 것을 알 수 있었다. 레이저산란의 광편향에 대해 분석한 결과 제시된 기하학적 관계식과 유사하게 기울기의 두 배만큼 편향되는 것을 실험적으로 규명하였다. 다만, 스침 입사각에서는 비대칭적인 분포를 가지며 다른 각도로 편향됨을 알 수 있었다.

### 감사의 글

본 연구는 2009년 교육과학기술부 지역대학우수과 학자지원사업(2009-0064599) 지원을 받아 수행되었습니다. 이에 감사 드립니다.

### 참고문헌

1. Lee, J. H., "Current Status and Future Prospects of Solar Cell," KSPPE, Vol. 25, No. 10, pp. 7-22, 2008.
2. Byelyayev, A., "Stress Diagnostics and Crack Detection in Full-size Silicon Wafers using Resonance Ultrasonic Vibrations," Department of Electrical Engineering, Ph. D, University of South Florida, 2005.
3. Takami, K., "Defect Inspection of Wafers by Laser Scattering," Materials Science & Engineering, Vol. 44, pp. 181-187, 1997.
4. Chang, C. Y. and Li, C., "An Supervised Neural Network Approach for Automatic Semiconductor Wafer Defect Inspection," Expert Systems with Applications, Vol. 36, pp. 950-958, 2009.
5. Hong, Y. K. and Kim, G. B., "A Study on the Experimental Identification of Surface Roughness using Laser Scattering Image," The Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 1, pp. 35-41, 2010.
6. John, C. Stover, "Optical Scattering Measurement and Analysis 2nd Edition," SPIE Press, 1995.
7. Nayar, S. K., Ikeuchi, K. and Kanade, T., "Surface Reflection: Physical and Geometrical Perspectives," IEEE Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 13, Issue 7, pp. 611-634, 1991.
8. Ha, T. H., "A Study on Light Scattering Characteris-

- tics of CMP-induced on Silicon Oxide Wafer Surface for Defects Detection and Classification,” Department of Mechanical Engineering and System, Ph. D, Osaka university, 2007.
9. Kim, G. B., “A structured mechanism development and experimental parameter selection of laser scattering for the surface inspection of flat-panel glasses,” *International Journal of Production Research*, Vol. 48, Issue. 13, pp. 3911-3923, 2010.
10. Bakolias, C., “Oblique Imaging of Scattered Light for Surface Inspection,” Department of Mechanical Engineering, Ph. D, London University, 1996.
11. <http://www.nexolon.com>
12. James, E. Harvey, Andrey Krywonos and Cynthia L. Vernold, “Modified Beckmann-Kirchhoff Scattering Theory for Rough Surfaces with Large Scattering and Incident Angles,” *Applied Optics*, pp.1-12, 2006.
- 
- 접수일: 2010년 11월 25일, 심사일: 2010년 12월 8일  
게재확정일: 2010년 12월 17일