

레이저 산란 메커니즘 매개변수의 실험적 선정 및 태양전지 웨이퍼의 레이저산란패턴 분석에 관한 연구

김경범[†]

[†]국립 충주대학교 항공기계설계학과

Study on Experimental Selection of Parameters in Laser Scattering Mechanism and Analysis of Laser Scattering Patterns in Solar Cell Wafer

Gyung-Bum Kim[†]

[†]Aeronautical & Mechanical Design Engineering, Chungju National University

ABSTRACT

In this paper, a laser scattering mechanism are designed to detect micro defects such as dent, scratch, pinhole, etc. Its influential parameters are experimentally selected and scattering patterns of micro defects have been analyzed for silicon wafer in solar cell. As a result of experiments, scattered lights are rather increased in wafer surface with micro defects, in comparison to no micro ones. Scattering parameters are optimally selected for obtaining robust and high quality laser scattering images of micro defects. It is shown that scattered light components are linearly increased according to the increase of micro defect sizes, and the depth of micro-defects give a large influence on optical deflection.

Key Words: Laser scattering mechanism, Laser scattering pattern, Micro defect, Solar cell wafer

1. 서 론

태양전지 실리콘 웨이퍼의 형상 결함과 표면결함 검사는 박형화(slimming) 되어가는 웨이퍼의 제조 공정 중 파손을 방지함과 동시에 태양전지의 효율에 악영향을 끼치는 것을 방지하고, 생산비 절감 측면에서 가장 중요하게 다루어지고 있다. 현재 태양전지 실리콘 웨이퍼 검사장비에서의 검사 항목을 보면 웨이퍼의 Saw mark, 두께, 직각도 등을 검사하는 형상결함과 칩핑(chipping), 에지 결함(edge defect), 접착 잔여물(contamination), 이물질(stain), 스크래치(scratch) 등을 검사하는 표면결함이 있다. 또한 핀홀(pinhole), 덴트(dent), 미세결정(micro crystal), 마이크로 크랙(micro crack)등을 검사하는 마이크로 결함 검사장비가 있으며, 표면뿐만 아니라 내부에 존재하는 마이크로 크랙을 검출하기 위해 공명 초음파 진동(resonance ultrasonic vibra-

tions), 적외선 열화상(infrared thermography), 초음파 열화상(ultrasonic thermography) 등과 같은 기술을 이용한 다양한 방법이 적용되고 있다.^(1,2) 그러나 위에서 서술한 기존의 연구 방향은 간단하고 일관된 검사를 수행할 수 있는 검사모듈개발에 대한 연구보다는 검출이 비교적 명확한 형상 및 표면결함을 대상으로 영상처리 기반의 복잡한 신호처리 알고리즘을 개발하는데 치중되어 고비용의 계산, 시스템 비용의 증가, 검출의 신뢰성 등에 따른 문제점이 발생하고 있다.

본 연구에서는 태양전지용 실리콘 웨이퍼의 표면에 존재하는 스크래치, 핀홀, 덴트, 마이크로 크랙 등과 같은 마이크로 결함을 검출하기 위해 레이저산란 메커니즘을 설계하고, 이를 기반으로 실험을 수행하였다. 또한, 실험계획법을 이용하여 실험에 영향을 주는 레이저산란 매개변수의 최적조건을 선정하고 확인실험을 통해 레이저산란 패턴을 분석하였다.

[†]E-mail : kimgb@cjnu.ac.kr

2. 레이저산란 메커니즘 변수의 실험적 선정 및 레이저산란 패턴분석

2.1. 레이저산란 메커니즘

기존의 산란광을 이용한 표면 검사법⁽³⁾으로는 이중 통과 역반사 기법(D-sight), TIS(total integrated scattering)기법, ARS(angle resolved scattering)기법, 명시야(bright-field)기법, 암시야(dark-field)기법 등이 있으며, 본 연구에서는 암시야 기법을 적용하였다. 암시야 기법의 원리는 표면에 조사되는 광의 정반사영역을 제외한 곳에 카메라를 위치시키는 것이며, 만일 표면이 완전한 경면이라면 산란된 광의 강도가 작아 영상에 어둡게 나타나고, 표면에 결함이 존재할 경우 입사한 광이 여러 방향으로 산란되기 때문에 밝은 영상이 나타난다. 실리콘 웨이퍼에 존재하는 마이크로 결함을 분석하고 검출하기 위해 기존의 연구를⁽⁴⁻⁶⁾ 토대로 Fig. 1과 같이 레이저산란 검사 메커니즘을 설계하였고, 이에 대한 상세규격은 Table 1에 나타내었다.

이 메커니즘은 검출부, 기구부, 구동부, 제어부로 구성하였으며, 우선 검출부의 경우 비전시스템을 적용하여 영상을 통해 가시적으로 산란광의 경향을 파악할 수 있게 구성하였다. 카메라는 Basler사의 CCD 카메라와 50mm CCTV렌즈, 80 mm 클로즈업 링(close-up)을 사용하였다.

또한 고품질의 레이저산란 영상을 얻기 위해서 편광필터(polarizing filter)와 ND(neutral density) 필터를 사용하였다. 편광필터는 입사각도와 카메라의 관찰각도 변화에 따른 기구적 외란과 대기 중에서 산란되어 나타나는 잡음의 양을 최대한 줄이고, ND필터는 빛에 대하여 그 세기를 조절하고 정보손실 없이 세기만 감소시킬 수 있다. 본 레이저산란 메커니즘에서는 명시야 광학계에 가까운 암시야 광학계로 레이저산란 실험을 하기 때문에 레이저 광의 세기가 강하여 카메라에 획득되는 영상이 포화된다. 따라서 레이저산란 패턴 분석이 불가능하므로, 50%, 25% ND필터를 사용하여 빛의 세기를 87.5% 감소시켰다. 광원으로는 Stockeryale사의 SNF레이저를 사용하였다.

기구부에서는 레이저 입사각 θ 과 표면의 마이크로 형상에 따라 변화될 산란광을 검출하기 위한 카메라 관찰각 θ_c 이 중요한 변수이다. 따라서, 카메라의 중심축이 입사평면과 일치되게 하고, 카메라와 레이저가 웨이퍼 표면의 한 점에서 포커스(focus)가 정확하게 일치되게 구성하였다. 레이저 입사각과 카메라 관찰각의 기구적인 동작범위는 표준범선을 기준으로 $\pm 90^\circ$ 까지 조절할 수 있게 하였고, 각도 조작은 웜기어(worm



Fig. 1. Laser scattering inspection mechanism.

Table 1. Specifications of laser scattering mechanism.

List	Specification
CCD Camera	Basler A631f Resolution: 1392×1040 Pixel size: 4.65 μm×4.65 μm Frame rate: 17fps Pixel resolution: 8bit Video output type: IEEE 1394
Lens	50mm CCTV Close-up ring
Laser	Stockeryale SNF Laser Wavelength: 636.6nm Shape: spot
Filter	Polarization filter ND filter
Motor	DCT linear pulse motor Repeatability Open loop: ± 5 μm Close loop: ± 2 μm
Motion controller	Ajinextek SMC2V030
Frame grabber	Matrox Solios

gear)를 사용하여 진동과 소음을 적게 하였다. 또한, 다양한 방향에서 레이저산란의 편향성을 규명하기 위해 카메라 방위각(azimuth angle, ϕ_a)을 X축을 기준으로 $\pm 90^\circ$ 까지 구현 가능하게 하였다. 카메라 방위각의 움직임을 위해 카메라의 가이드 블록(guide block)과 베이스 스테이지(base stage)의 중심축을 회전 바(rotation bar)로 연결하고, 이 움직임의 원주를 갖는 반원의 호를 베이스 스테이지에 가공하여 호를 따라 움직이게 하였다. 베이스 스테이지와 카메라 블록의 마찰부분은 캠 플로워 베어링(cam flower bearing)을 부착하여 마

모에 의한 변형을 줄였다. 이로써 카메라의 검출영역을 반구(hemisphere)에 가깝게 하여 입사평면에서의 산란 검사뿐만 아니라 반구상에서 일어나는 광편향에 의한 산란광 성분도 검출이 가능하다. 검사테이블은 ϕ_r 이 $0^\circ \sim 360^\circ$ 까지 회전하는 회전(rotation) 스테이지와 경사면에서 일어나는 레이저산란광의 편향성을 알아보기 위해 δ_r 를 $\pm 15^\circ$ 까지 조절 가능한 피치(pitch) 스테이지를 복합적으로 구성하였다.

구동부는 스트로크(stroke)가 240 mm인 리니어 펄스 모터(linear pulse motor)를 사용하여 웨이퍼를 이동시키고 향후 인라인(in-line) 검사 시스템 구현 시 유연하게 대처할 수 있도록 구성하였다.

2.2. 레이저산란 메커니즘 변수의 실험적 선정

설계된 레이저산란 메커니즘 매개변수의 최적조건을 선정하기 위해 선행 실험을 수행하였다.

태양전지 웨이퍼의 형태는 모듈의 면적 대비 효율을 고려하여 사각형으로 제작되고, 두께는 현재 200 μm 정도를 사용하고 있으나 재료 절약을 위하여 점점 얇아지고 있다. 산업에서 널리 사용되고 있는 태양전지용 실리콘 웨이퍼의 규격은 Table 2와 같다.

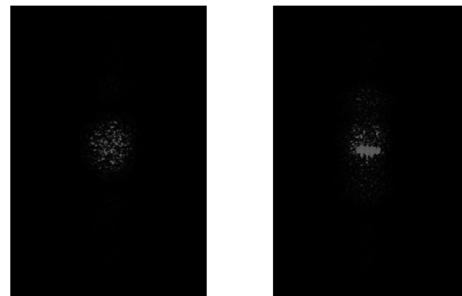
우선, 실리콘 웨이퍼의 표면에서 마이크로 결함에 대한 모의 실험을 위해 FIB(focused ion beam)를 이용하여 웨이퍼 시편을 제작하였다. 마이크로 결함의 길이(L)는 64 μm , 32 μm , 16 μm , 폭(W)은 32 μm 으로 일정하게 하고, 깊이(D)는 32 μm , 16 μm , 8 μm , 꼭지점각(A)은 약 60° , 90° , 120° 이다. 레이저산란 실험의 직관성과 다양성을 고려하여 본 레이저산란 변수의 실험적 선정에서는 L64 μm , W32 μm , D32 μm A90°인 웨이퍼 시편만을 이용하였다. 레이저 입사각의 경우 레일리기준을 적용하였다.

실험에 사용한 실리콘 웨이퍼의 표면 거칠기는 AFM을 이용하여 10번의 측정을 반복하여 Ra 0.221 μm 를 얻었고, 레이저의 파장과 실리콘 웨이퍼의 표면 거칠기를 레일리기준에 적용하면 레이저의 입사각은 약 70° 보다 커야 한다.

따라서 계산된 레일리기준 각도보다 큰 80° 를 레이저 입사각으로 선정하였다. 카메라 관찰각의 경우 마이크로 결함에 의해 편향된 산란광 성분을 적정수준으로 획득하기 위해 중간 값인 45° 로 하고 실험을 통해 레이저산란 영상을 획득하였다. Fig. 2(a)는 결함이 없는 표면에서 획득한 영상이며, Fig. 2(b)는 마이크로 결함이 존재하는 표면에서 획득한 영상이다. 레이저의 입사 방향은 마이크로 결함의 길이에 수직방향으로 입사되며, 그 방향은 Fig. 2 에서 영상의 상부로부터 영상의

Table 2. Specifications of silicon wafer in solar cell.

Item	Unit	Specification
Resistivity	$\Omega\text{-cm}$	0.5 ~ 3.0
Lifetime	μs	(min) 10
Carbon Concentration	Atoms/cm ²	(max) 0.5E+18
Oxygen Concentration	Atoms/cm ²	(max) 0.5E+18
Etch pit density	ea/cm ²	(max) 3000
Thickness	μm	180 ~ 220
Wafer length	mm	155.5 ~ 156.5
Diagonal	mm	199.0 ~ 201.0
TTV	μm	(max) 50
Warpage	μm	(max) 70
Bow	μm	(max) 60
Saw mark depth	μm	(max) 20



(a) Original image (b) Micro defect image

Fig. 2. Laser scattering images.

하부 방향이다.

결함이 없는 표면에서는 레이저가 조사된 영역에서 표면 거칠기에 의해 약간의 산란광 성분이 불규칙적으로 검출되는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 마이크로 결함에서는 결함이 없는 표면과는 다르게 산란광 성분이 강하게 나타나는데 이것은 입사된 레이저가 마이크로 결함의 경사면에서 산란된 성분이라 생각된다. 이진화 후의 영상을 보면 결함이 없는 표면에서는 산란광 성분이 모두 없어지고, 결함이 존재하는 표면에서는 산란광 성분이 나타났다. 이때 검출된 산란광 성분을 비교한 결과 결함이 없는 표면보다 마이크로 결함이 존재하는 표면에서 산란광 성분이 약 37% 증가함을 보였다.

실험계획법(design of experiments)은⁽⁷⁾ 해결하고자 하는 문제에 대하여 어떻게 실험을 수행하고, 데이터를

어떻게 취하며, 어떠한 통계적 방법으로 데이터를 분석하면 최소의 비용과 실험횟수에서 최대의 정보를 얻을 수 있는가를 계획하는 것이다. 즉, 제품의 특성에 영향을 미치는 여러 가지 인자(factors)를 선정하고 이들의 관계를 알아보기 위한 실험을 실시하여 자료를 얻고 이를 분석함으로써 최적조건을 경제적으로 찾아내는 것이다.

본 연구에서는 실리콘 웨이퍼에 존재하는 다양한 형태의 마이크로 결함에서 레이저산란 매개변수의 최적조건을 선정하기 위해 실험계획법 중 다구찌 방법(Taguchi method)을 사용하였다. 다구찌 방법은 행렬 내부벡터의 내적이 0이 되어 직교성을 띠는 특수한 직교배열표를 사용함으로써 최소한의 실험횟수로 전체 실험과 유사한 결과 데이터를 얻을 수 있다. 또한, 실험의 특성치 값으로 SN비(signal to noise ratio)를 사용한다. SN비는 신호대 잡음의 비율로 입력신호의 크기와 잡음이 주는 영향의 크기의 비율로 나타내며 특성치 값에 따라 망목특성(nominal-the-best type characteristic), 망소특성(smaller-the better type characteristic), 망대특성(larger-the-better type characteristic)으로 나누어진다. 레이저산란 메커니즘과 선행실험을 통해 레이저산란 매개변수를 Table 3과 같이 선정하고, 그 수준을 정하였다. 우선, 레이저 입사각 (θ)은 레일리기준을 적용하여 70° 보다 커야 하므로 75° , 80° , 85° 로 선정한다. 카메라 관찰각(θ_o)은 정반사 성분을 피하는 암시야 기법에 영향 받기 때문에 $10^\circ \sim 60^\circ$ 까지 10° 간격으로 선정하였다. F-number의 경우 1.8C ~ 16C의 범위가 존재하지만 80 mm Close-up ring에 의해 블러링(blurring) 현상이 야기되므로 1.4C, 4C로 선정한다. 편광필터는 0° , 45° , 90° 로 방위각은 0° , 45° 로 선정한다. 최소한의 실험횟수인 직교배열표는 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 이며 인자 배치는 Table 4에 나타내었다. 이것은 2수준인자 1개와 3수준인자 7개를 사용하여 18 번의 실험만으로 매개변수의 최적조건을 선정할 수 있다. 1열과 2열은 다수준(multi level)법을 사용하여 카메라 관찰각을 6수준으로 배치하였고, 레이저 입사각과 편광필터는 3수준으로, F-number와 방위각은 의수준(dummy level)법을 사용하여 2수준의 인자를 3수준열에 배치하였다. 선정한 제어인자가 6개이므로 7열과 8열은 오차항으로 비워두었다.

다음으로 고려해야 할 사항은 품질특성으로 획득하는 결과물의 특성치 값이다. 암시야 기법에서 마이크로 결함이 존재하는 영역에서 광이 산란되기 때문에 본 실험에서는 일정영역의 산란광 강도값을 추출하여 그 값의 평균을 특성치 값으로 하였다. 그리고 결함이 존재할 때 산란광 성분이 강하게 나타나므로 이 평균값은 크게 나타난다. 따라서 식 (1)과 같이 특성치 값이

Table 3. Selected factors and levels.

Control factor	Level		
	1	2	3
A. Viewing angle of camera	10	20	30
B. Viewing angle of camera	40	50	60
C. Incident angle of laser	75	80	85
D. F-number	1.8	4	1.8
E. Polarization angle	0	45	90
F. Azimuth angle	0	45	0

Table 4. Orthogonal array for selecting optimum scattering parameters in silicon wafer.

No.	Inner array						SN ratio
	AB	C	D	E	F	G H	
1	10	75	1.8	0	0		44.99
2	10	80	4	45	45		-21.06
3	10	85	1.8	90	0		-21.06
4	20	75	1.8	45	45		-21.06
5	20	80	4	90	0		-21.06
6	20	85	1.8	0	0		33.82
7	30	75	4	0	0		34.32
8	30	80	1.8	45	0		23.52
9	30	85	1.8	90	45		-21.06
10	40	75	1.8	90	45		-21.06
11	40	80	1.8	45	0		26.74
12	40	85	4	0	0		27.69
13	50	75	4	90	0		-21.06
14	50	80	1.8	0	45		-12.04
15	50	85	1.8	45	0		7.95
16	60	75	1.8	45	0		26.44
17	60	80	1.8	90	0		-18.06
18	60	85	4	0	45		-21.06

크면 클수록 좋은 망대특성 함수를 사용하였다.

$$SN = -100 \log \left\{ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{1}{y_{ij}} \right\} \quad (1)$$

여기서, y_{ij} 는 특성치 값을 나타내고, 아래첨자 i 와 j 는 i 번째 행의 j 번째 데이터, n 은 실험점에서 y 의 반복 관측수를 의미한다.

실험은 제작된 마이크로 결함에서 18번씩 수행하였고, 각각의 결함에서 얻은 특성치 값으로 평균을 구한 후 식 (1)를 적용하여 Table 4와 같이 SN 비를 구하였다. 주어진 SN비를 이용하여 최적의 조건을 선정하기 위해 인자들의 수준별 효과를 식 (2)을 이용하여 계산한다. 여기서, m_{41} 은 4인자의 첫 번째 수준이다. 그 수

준별 효과는 ANOVA 그래프인 Fig. 3을 이용하여 알 수 있다.

$$m_{A1} = \frac{1}{n}(\eta_1 + \eta_2 + \eta_3) \quad (2)$$

카메라관찰각은 3수준인 30° 레이저입사각은 1수준인 75°, F-number는 1수준인 1.8, 편광필터는 1수준인 0°, 카메라 방위각은 1수준인 0°이다.

즉 레이저산란 매개변수의 최적조건은 A3, C1, D1,

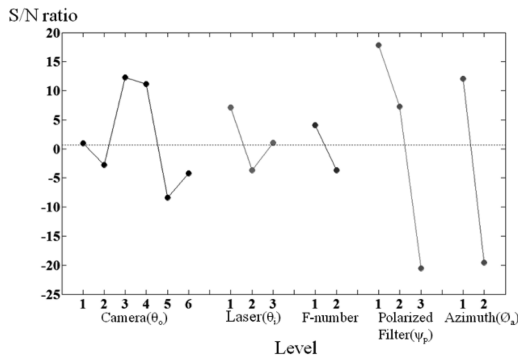


Fig. 3. ANOVA graph for selection optimum conditions.

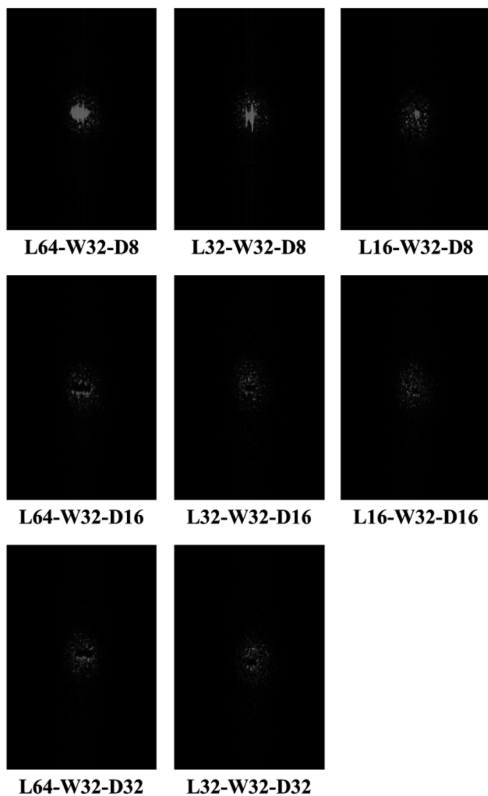


Fig. 4. Optimum laser scattering images of micro defects.

E1, F1임을 알 수 있다.

2.3. 레이저산란 패턴의 분석

실험계획법에 의해 선정된 레이저산란 매개변수의 최적조건과 그 수준이 유의한지 알아보기 위해 마이크로 결함의 레이저산란패턴 분석을 수행하였다. Fig. 4는 획득한 영상을 나타낸 것이며, 선행실험에서와 같이 마이크로 결함이 존재하는 부분에서 산란광 성분이 강하게 나타났다. 또한, 어두운 부분과 밝은 부분이 나타나는데, 이것은 마이크로 결함의 형상에 의해 밝은 부분은 레이저를 바라보는 마이크로 결함의 경사면에서 편향된 산란광 성분이 카메라로 수집되어 형성된 것으로 나타나고, 어두운 부분은 레이저가 입사되지 않은 영역이라 확인된다.

결함의 크기와 깊이에 따른 산란광 성분을 Fig. 5, 6에 그래프로 나타내었다. 우선 Fig. 5는 마이크로 결함당 10번의 반복 실험을 하여 산란광 성분을 정규화하여 나타낸 것이며, Fig. 6은 이 산란광 성분의 평균을 나타낸 것이다.

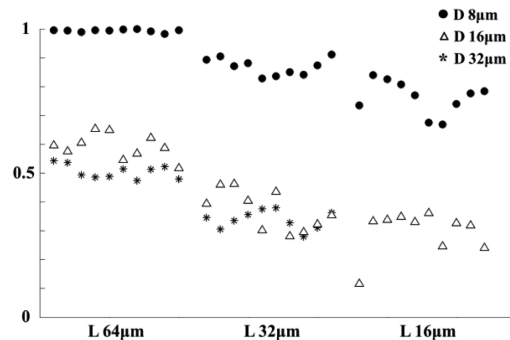


Fig. 5. Features of laser scattering in micro defects.

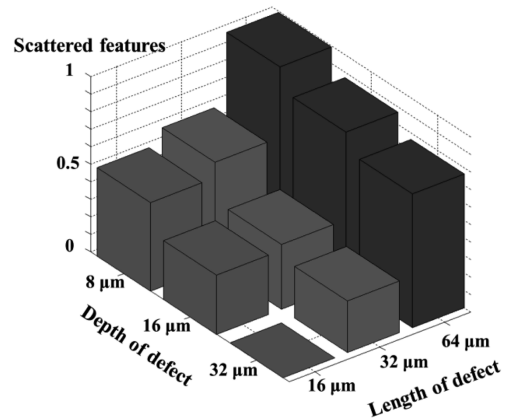


Fig. 6. Features of laser scattering in micro defects.

여기서, 마이크로 결함의 깊이가 커질수록 레이저가 입사하는 영역이 커지기 때문에 산란광 성분이 증가한다. 결함의 깊이는 얕아질수록 산란광 성분이 대체적으로 증가하는데 이는 결함의 깊이가 얕아질수록 결함의 꼭지점 각이 60°에서 120°로 커져 레이저가 결함의 경사면에 입사하는 영역이 커지기 때문이다. 마이크로 결함의 깊이가 8 μm 인 경우, 레이저산란 성분이 더욱 강하게 나타나게 된다. 왜냐하면, 레이저의 입사각도와 마이크로 결함의 경사각에 의한 편향 광이 정반사 성분으로 카메라에 입사되기 때문으로 판단된다. 한편, 결함 깊이 8 μm , 16 μm 일 때 길이 16 μm , 32 μm 을 각각 보면 산란광 성분이 대체적으로 증가하지만 비슷한 값을 가진다. 이는 제한된 실험 데이터와 광편향의 영향으로 전체적인 경향을 파악하는데 어려움을 반증한다.

3. 결 론

본 연구에서는 태양전지용 웨이퍼의 결함 검출을 위한 레이저산란 메커니즘을 설계하고, 이를 바탕으로 레이저산란 패턴을 분석하였다. 그 결과, 마이크로 결함이 있는 부분에서 산란광이 강하게 나타나고, 밝은 부분은 마이크로 결함의 경사면에서 편향된 산란광이며, 어두운 부분은 레이저가 입사되지 않은 영역임을 알 수 있었다. 마이크로 결함의 깊이가 커질수록, 깊이가 얕아질수록 레이저 산란광 성분이 증가함을 보여 결함 검출을 위한 근거로 사용할 수 있음을 보였다.

감사의 글

이 논문은 충주대학교 2011교내 학술연구비와 교육

과학기술부 기초연구사업(2009-0064599)의 지원을 받아 수행한 연구임.

참고문헌

1. Anton B., "Stress Diagnostics and Crack Detection in Full-Size Silicon Wafers Using Resonance Ultrasonic Vibrations," Ph. D. Dissertation, University of South Florida, 2005.
2. 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, pp. 491-501, 2010.
3. Takami, K., "Defect inspection of wafers by laser scattering," Materials Science and Engineering B, Vol. 44, No. 1-3, pp. 181-187, 1997.
4. Kim, G. B., "Study on Analysis of Optical Deflection of Laser Scattering Based on Rayleigh Criterion for Crystalline Silicon Wafer in Solar Cell," J. of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 9, No. 4, pp.31-37, 2010.
5. 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.
6. John, C. S., "Optical Scattering Measurement and Analysis 2nd Edition," SPIE Press, 1995.
7. Roy, R. K., "Design of Experiments using the Taguchi Approach," John Wiley & Sons Inc., 2001.

접수일: 2011년 4월 11일, 심사일: 2011년 5월 3일,
게재확정일: 2011년 5월 31일