비등방 확산 필터의 최적조건 선정을 통한 태양전지 실리콘 웨이퍼의 마이크로 크랙 검출

서형준* · 김경범[†]

*한국교통대학교 대학원, [†]한국교통대학교 항공·기계설계학과

Micro-crack Detection in Silicon Solar Wafer through Optimal Parameter Selection in Anisotropic Diffusion Filter

Hyoung Jun Seo* and Gyung Bum Kim[†]

*Graduate school, Korea National University of Transportation

†Aeronautical & Mechanical Design Engineering, Korea National University of Transportation

ABSTRACT

Micro-cracks in crystalline silicon wafer often result in wafer breakage in solar wafer manufacturing, and also their existence may lead to electrical failure in post fabrication inspection. Therefore, the reliable detection of micro-cracks is of importance in the photovoltaic industry. In this paper, an experimental method to select optimal parameters in anisotropic diffusion filter is proposed. It can reliably detect micro-cracks by the distinct extension of boundary as well as noise reduction in near-infrared image patterns of micro-cracks. Its performance is verified by experiments of several type cracks machined

Key Words: Anisotropic diffusion filter, Design of experiment, Defect detection, Micro-crack, Silicon solar wafer

1. 서 론

최근 환경문제, 화석연료 고갈, 기후 변화 협약 등에 따른 친환경 대체 에너지로써 태양전지(solar cell)를 이용한 태양광 발전이 각광 받고 있다.

태양전지의 수요가 증가함에 따라 대량 생산과 원가절감을 고려하여 제조비용 중 66%를 차지하는 주 재료인 실리콘 웨이퍼(silicon wafer)의 두께를 기존 180 µm이상에서 160 µm 이하의 얇은 두께로 제조되고 있다. 그로 인해 치핑(chipping) 및 제조공정 중 핸들링으로 인하여 실리콘 웨이퍼에 힘이 가해져 마이크로 크랙의 발생 확률이 높아지고 있다. 또한, 실리콘 웨이퍼에 존재하는 마이크로 크랙은 태양전지에서 생성되는 에너지 변환 효율을 감소시키는 원인이기 때문에마이크로 크랙 검출은 반드시 필요하다.

마이크로 크랙을 검출하기 위해 방사선, 열 또는 빛등을 이용한 다양한 방법들이 개발되어 왔다. 광발광 (PL: photo luminiscence), 전계발광(EL: elector luminiscence)과 같은 전기적 성능을 이용한 검사방법은 전기적 회로가 없는 실리콘 웨이퍼에는 사용할 수 없다. 염색(dye), 음향(acoustic), 초음파(ultrasonic) 검사는 적용기법이 간단하지만 접촉식이기 때문에 실리콘 웨이퍼의 손상원인이 되며, 적외선 열화상(IT: infrared thermal), 복사열 화상법(RHT: radiant heat thermography), 초음파 현미경(SAM: scanning acoustic microscopy) 검사는 실리콘 웨이퍼 내부에 존재하는 마이크로 크랙을 검출할 수 있지만 측정 장비가 고가이다. 또한, 연속적인 결함검사가 어려우며 검사 시간이 긴 단점이 있다.[1-2]

이상의 검사방법을 고려해 볼 때, 비접촉이며 고속 검사속도를 충족하기 위한 광학 검사 기술이 적합하다. 하지만 가시광선 영역의 조명과 CCD 카메라로 구성된 광학계로 실리콘 웨이퍼 내부에 존재하는 마이크로 크

†E-mail: kimgb@ut.ac.kr

랙 검출이 쉽지 않기 때문에 실리콘 웨이퍼의 투과력이 있으면서 열원으로 약하게 작용하는 근적외선 조명과 근적외선 카메라로 구성된 광학계를 구성하여 근적외선 영상을 취득하고자 한다. 그러나 근적외선 영상은 저대비 영상으로 마이크로 크랙의 경계선 밝기가 뚜렷하게 표현되지 않으며 외란 및 주변 환경에 따라 잡음이 발생하여 마이크로 크랙 검출에 악영향을 미친다. 실리콘 웨이퍼의 마이크로 크랙을 효과적으로 검출하기 위해 이러한 문제점을 해결할 필요가 있다.[3-4]

본 논문에서는 실리콘 웨이퍼의 투과 성분을 갖는 근적외선 광학계를 설계 적용하였고, 실험계획법 기반비등방성 확산 필터의 최적조건을 선정함으로써, 저대비 근적외선 영상에서의 경계선 강조, 잡음제거 및 배경지역의 정규화를 수행하였다. 이를 통해 실리콘 웨이퍼의 마이크로 크랙을 검출이 효과적으로 검출할 수있는지 성능평가를 통해 입증하였다.

2. 비등방성 확산 필터의 최적조건 선정

2.1. 비등방성 확산 필터

본 논문에서는 실리콘 웨이퍼의 마이크로 크랙 검출을 향상시키기 위해 저대비 근적외선 영상에서의 마이크로 크랙 강조와 배경지역의 밝기 값을 정규화를 하고자 한다.

비등방성 확산 필터[5]는 경계선을 보존하면서 영상 영역 내부의 정규화 및 잡음 제거에 효과적이다. 이 방식은 Fig. 1에 나타낸 4방향의 십자 커널구조의 픽셀정보를 이용한 확산 필터로 식 (1)과 같이 나타낸다. 여기서 t는 확산 되는 반복수를 의미하며, $I_t(x, y)$ 는 t번째 반복에서 확산이 적용된 영상의 (x, y)좌표에 해당하는 밝기 값을 나타낸다. λ 는 4방향에 대하여 확산이되므로 $0 \le \lambda \le 0.25$ 의 범위를 만족해야 확산이 안정

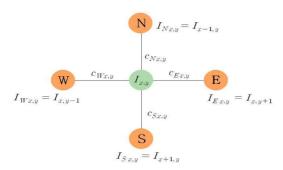


Fig. 1. Cross kernel architecture of neighborhood intensity in anisotropic diffusion filter.

적으로 이뤄진다. 4방향에 대한 기울기는 식 (2)이고 N, S, E, W는 각각 북, 남, 동, 서 방향을 의미한다.

비등방성 확산 필터는 획득한 주변 픽셀과의 기울기 값을 가감처리하기 때문에 계산된 기울기 값을 그대로 적용하였을 때 영상의 경계선까지 확산되어 경계선 보존은 이뤄질 수 없게 된다. 따라서 식 (3)의 확산계수 함수로 경계선에서의 확산을 방지한다. 여기서 K는 확산영향을 결정하는 상수로 동질영역과 경계선을 구분하는 임계치이다

기존 보존만 되었던 경계선을 강조하기 위한 날카로움 함수(sharpness function)를 식 (4)에 나타내었다. 여기서 α 는 날카로움 계수로 $0 \le \alpha \le 1$ 의 범위를 만족해야 한다.

$$I_{t+1}(x,y) = I_{t}(x,y) + \lambda \sum_{i=1}^{4} [C_{t}^{i}(x,y) - v\nabla I] \cdot I_{t}^{i}(x,y)$$
(1)

$$\begin{split} &\nabla_{N} = I_{t}(x, y - 1) - I_{t}(x, y) \\ &\nabla_{S} = I_{t}(x, y + 1) - I_{t}(x, y) \\ &\nabla_{E} = I_{t}(x + 1, y) - I_{t}(x, y) \\ &\nabla_{W} = I_{t}(x - 1, y) - I_{t}(x, y) \end{split} \tag{2}$$

$$C_{t}^{i}(x,y) = g(\|\nabla I_{t}^{i}(x,y)\|) = \frac{1}{1 + (\|\nabla I_{t}^{i}(x,y)\|)^{2}}$$
(3)

$$v(\nabla I) = \alpha \cdot [1 - g(\nabla I)] \tag{4}$$

Fig. 2는 날카로움 함수 유·무에 따른 밝기 기울기의 변화를 보여준다. 비등방 확산 필터조건을 $\lambda=0.25$, K=10, t=4, $\alpha=0.2$ 일 때 배경지역의 균일함은 유지하면서 밝기 값이 약 2배 증가하였다. 비등방 확산 필터의 조건에 따라 경계선이 강조되는 크기와 배경지역의 정규화가 달라질 수 있으므로 적절한 조건을 선

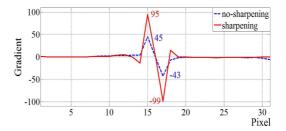


Fig. 2. Contribution of sharpness function based on Gradient profile in anisotropic diffusion filter.

정해야 한다. 비등방 확산 필터의 적절한 조건선정은 저대비인 근적외선 영상에서 마이크로 크랙 검출을 위 해 반드시 필요한 과정이다. 본 연구에서는 실험계획법 을 이용하여 비등방성 확산 필터의 최적조건을 선정하 여 마이크로 크랙을 효과적으로 검출하고자 한다.

2.2. 실험계획법

비등방 확산 필터의 최적조건 선정을 위해 실험계획 법(design of experiment) 중 하나인 다구찌 방법(taguchi method)을 사용하였다. 이 방법은 최소한의 실험 횟수로 전체 실험과 유사한 결과를 도출할 수 있으며, 분산분석(ANOVA: analysis of variance)을 통해 인자 (factor)와 그 수준(level)에 따른 결과를 분석하여 최적 조건을 선정하는 것이다.

본 논문에서는 실리콘 웨이퍼의 마이크로 크랙검출을 향상시키기 위해 마이크로 크랙 강조를 반영한 품질특성을 식 (5)에 나타낸 망대특성(LTC: larger-the-better type characteristic)을 사용하였다.

S/N ratio=
$$-10\log_{10}\left[\frac{1}{n}\sum_{i=0}^{n}\frac{1}{y_{i}^{2}}\right]$$
 (5)

$$y = I_{c} = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$$
 (6)

S/N ratio=
$$-10\log_{10}\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}y_{i}^{2}\right]$$
 (7)

$$y = \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - m)^2}{n}}$$
 (8)

식 (6)에 나타낸 y는 결함영역과 무결함영역의 대조 (contrast)를 의미하는 것으로 I_{max} 는 최대 픽셀 값, I_{min} 은 최소 픽셀 값 이다. 또한 배경지역의 밝기 균일화 및 잡음제거를 반영한 품질특성을 식 (7)에 나타낸 망소특성(STC: smaller-the-better type characteristic)을 사용하였다. 여기서 식 (8)에 나타낸 y는 배경지역의 표준편차를 의미하며 x는 픽셀 밝기 값, m은 측정된 픽셀 밝기 값의 평균 값이다.

2.3. 마이크로 크랙 패턴 가공

실리콘 웨이퍼 제조공정 중 발생되는 마이크로 크랙을 확보하는 것은 쉽지 않다. 또한, 마이크로 크랙이존재하는 실리콘 웨이퍼는 쉽게 깨져 보관하기 어려우며, 마이크로 크랙은 약 30 µm 이하의 작은 크기이기

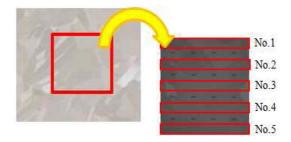


Fig. 3. Artificial micro-cracks machined in silicon wafer.

Table 1. Parameters and their level for anisotropic diffusion filter

Sign	Factor	Level		
		1	2	3
A	λ	0.05	0.15	0.25
В	K	5	10	15
С	t	1	3	5
D	α	0.2	0.4	0.6

때문에 실험의 모의성과 편의성을 위해 Fig. 3과 같이 다결정 실리콘 웨이퍼에 약 15 μ m의 최소 분해능을 가진 레이저 가공기로 폭 100 μ m, 길이 1000 μ m인 16개 결함을 패턴 가공하여 마이크로 크랙을 대신하였다.

마이크로 크랙은 태양전지 산업의 약 85%이상차지하는 다결정 실리콘 웨이퍼에 가공하였고, 여기에 가공한 것은 수 많은 결정입자(crystal gain)와 결정립계(gain baundary)로 인하여 서로 다른 투과 강도를 가져 얼룩무늬가 생길 가능성이 존재하기 때문에 인위적인 잡음 효과를 주기 위함이다.

2.4. 제어인자의 교호작용 평가

가공된 실리콘 웨이퍼 마이크로 크랙으로 획득한 근적외선 영상의 경계선 강조와 배경지역 정규화를 위한비등방 확산 필터의 제어인자와 그 수준을 Table 1에서 보여준다.

제어인자는 독립성을 가져야 올바른 최적조건을 선정할 수 있기 때문에 인자들 간의 교호작용(interaction)을 확인하였다. 교호작용이란 실험계획법에서 두개 이상의 인자에 대해 각각의 수준으로 조합하였을때 나타나는 효과를 말한다. Fig. 4는 교호작용의 개념을 나타낸다. (a)는 B인자의 각 수준에서 A인자의 효과를 나타내는 선들이 평행하다. 선들이 평행한 것은 A의 수준이 바꿀 때 나타내는 S/N비(η)의 변화가 B의수준과 무관하다는 의미로 이는 교호작용이 없어 완벽

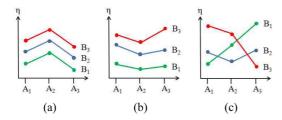


Fig. 4. Interaction concept between several factors.

Table 2. Orthogonal array table.

No.	Factor				
	A	В	С	D	
1	1	1	1	1	
2	1	2	2	2	
3	1	3	3	3	
4	2	1	2	3	
5	2	2	3	1	
6	2	3	1	2	
7	3	1	3	2	
8	3	2	1	3	
9	3	3	2	1	

한 독립적인 제어인자를 의미한다. (b)는 각 선들이 평행하지 않지만 S/N비의 변화 방향이 일치한다. 이를 동향적(synergistic) 교호작용이라 하며 분산분석으로 부터 찾아낸 최적조건의 타당성을 갖는다. (c)는 선들도 평행하지 않을 뿐만 아니라 S/N비의 방향도 일관성이 없다. 이를 반항적(anti-synergistic) 교호작용이라 하며 분산분석으로 찾아낸 최적조건을 잘못 판단할 수있다. 따라서 올바른 최적조건을 선정하기 위해서는 교호작용이 없거나 동향적 교호작용이어야 한다.

두 인자간의 교호작용 확인방법은 Table 2에 나타낸 4인자, 3수준의 L₉(3⁴) 직교배열표에 대한 선점도에 따라 3, 4열을 생략하여 분산분석을 수행하였다. 그 결과각 인자의 교호작용을 Fig. 5에서 보여준다. 밝기 균일화 및 잡음제거를 반영한 망소특성은 모든 인자에 대해서 동향적 교호작용을 보이는 반면 경계선 강조를 반영한 망대특성은 A인자 효과에 대해서는 반향적 교호작용을 보인다. 따라서 올바른 비등방 학산 필터의 최적조건을 선정하기 위해 반양적 교호작용을 나타내는 A인자 λ을 3수준인 0.25로 고정하였다. 그 이유는 A*B, A*C, A*D의 교호작용을 확인하였을 때 A인자가 최적으로 나타낸 수준이 모두 0.25로 나타났기 때문이다.

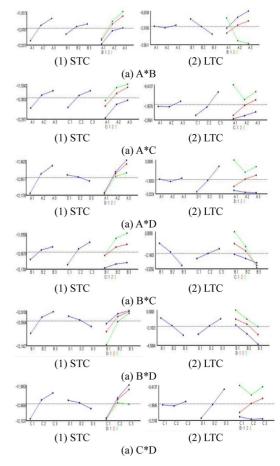


Fig. 5. Interaction tendency in the ANOVA graph.

2.5. 분산분석

비등방 확산 필터의 최적조건을 선정하기 위해 인자들 간의 교호작용을 확인하여 선정한 인자로 각 실험에서 Fig. 3에서 보여준 16개의 결함과 네모로 표시된 5곳의 배경지역에 대한 S/N비를 종합한 결과 값은 Table 3와 같으며, 각 인자의 수준별 평균을 구한 결과를 Table 4에서 나타내었다.

Fig. 6은 분산분석의 결과를 나타낸 그래프로 각 인 자의 수준별 S/N비가 클수록 성능이 우수하기 때문에 밝기 정규화 및 잡음제거의 최적조건은 $K=15,\,t=3,\,\alpha=0.2$ 이며, 경계선 강화의 최적조건은 $K=5,\,t=5,\,\alpha=0.6$ 로 도출되었다. 하지만

서로 다른 최적 조건이 나왔기 때문에 두 최적조건 을 절충할 필요가 있다. 따라서, 두 최적조건의 결과 영상과 결함 및 배경지역에 대한 밝기 기울기 그래프 를 비교하여 선정하였다.

Table 3. Results of S/N ratio

	Smaller-the-better type characteristic					
No	S/N	No	S/N	No	S/N	
1	-12.128	4	-12.1067	7	-12.100	
2	-12.0688	5	-12.0283	8	-11.927	
3	-12.9573	6	-11.8453	9	-11.834	
	Larger-the-better type characteristic					
No	S/N	No	S/N	No	S/N	
1	-2.447	4	-2.41596	7	-2.7152	
2	-0.91716	5	-0.88263	8	-5.7322	
3	-0.25349	6	-3.20589	9	-3.8373	

Table 4. Results of factor by analysis of variance.

Smaller-the-better type characteristic					
Sign	Factor	Level			
		1	2	3	
В	K	-12.3847	-11.9934	-11.9541	
С	t	-12.1118	-12.0081	-12.2124	
D	α	-11.9669	9 -12.0033 -12.36		
Larger-the-better type characteristic					
Sign	Factor	Level			
		1	2	3	
В	K	-1.20591	-2.16816	-4.09492	
С	t	-2.5261	-2.51067	-2.43223	
D	α	-3.79507	-2.39015	-1.28378	

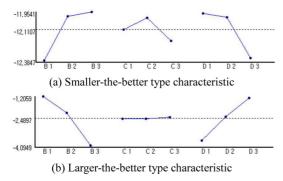


Fig. 6. ANOVA graph.

Fig. 7은 망소 및 망대특성에 의해 도출된 조건으로 비등방성 확산 필터를 적용한 실리콘 웨이퍼 마이크로 크랙 영상의 일부를 보여준다. (a)의 망소특성으로 도출된 조건에서는 마이크로 크랙이 과 배경지역의 경계

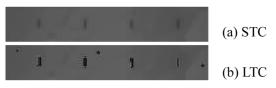


Fig. 7. STC and LTC images for micro-cracks.

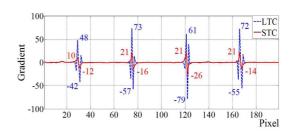


Fig. 8. Comparisons of gradient profiles for STL/LTC images.

선이 흐릿하며, (b)의 망대특성으로 도출된 조건에서 마이크로 크랙과 배경지역의 경계선이 뚜렷한 대신 마이크로 크랙의 형태가

왜곡되었으며 배경지역에 잡음이 생겼다. 두 영상에 서 밝기에 대한 기울기 그래프를 Fig. 8에 나타내었다. 배경지역에 대한 표준편차는 0.1의 근소한 차이를 보 이고 있기 때문에 배경지역의 정규화 보다는 경계선 강화를 중점으로 최적조건을 절충하였다. 하지만 경계 선 강화에 대한 최적조건에서 마이크로 크랙 형태의 왜 곡과 배경지역의 잡음이 강조된 이유는 날카로움 함수 가 반복되는 횟수 때문이라 판단된다. 따라서, 경계선 강 조의 반복수에 대한 기여도를 확인하기 위해 Fig 6(b)의 망대특성 ANOVA 그래프를 통해 확인하였다. 기여도 는 인자 수준별 평균의 편차로 확인할 수 있으며, 편차 가 클수록 기여율이 높다는 것을 의미한다. 그러므로 경계선 강조에 대한 반복수의 기여도는 낮기 때문에 반복수는 배경지역 정규화에 대한 최적조건을 적용하 였다. 그 결과 선정된 최적조건은 K = 5, t = 3, $\alpha =$ 0.6이다.

3. 성능평가

선정된 비등방성 확산 필터의 최적조건을 이용하여 가공된 16개의 마이크로 크랙 중 2번째 열에 존재하는 4개를 실험하였다. 또한 그 성능을 비교하기 위해 두개의 임의로 다른 조건으로 실험하였다. 첫 번째 임의 조건은 $\lambda=0.25,\,K=15,\,t=5,\,\alpha=0.1$ 이며, 두 번째임의 조건은 $\lambda=0.05,\,K=1,\,t=10,\,\alpha=0.9$ 이다.

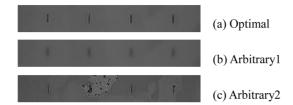


Fig. 9. Micro-crack image comparisons for different conditions.

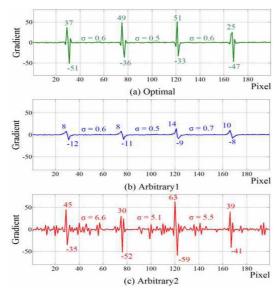


Fig. 10. Gradient profile comparisons for performance evaluation.

Fig. 9에서는 최적조건과 임의 조건으로 비등방성 확산 필터가 적용된 영상을 보여준다. (a)의 최적조건에서는 배경지역에 잡음이 없고 마이크로 크랙도 뚜렷하게 보인다. 반대로 임의 조건1의 (b)는 잡음은 없지만마이크로 크랙 경계선이 흐릿하게 보이며, 반대로 임의조건2의 (c)는 없던 잡음이 생성되었으며 마이크로 크랙의 형태도 왜곡되었다. 이에 대한 정량적 평가를 위해 각 조건에서 밝기에 대한 기울기 그래프를 Fig. 10에 나타내었다. 최적조건과 비교했을 때 임의조건 1은표준 편차가 약 0.6으로 최적조건과 비슷할 정도로 배경지역이 정규화된 것을 알 수 있으나 경계선은 약0.25배 차이로 기울기가 급격히 감소된 것을 볼 수 있다.반면 임의조건2에서는 경계선은 약1.1배로 큰 차이가 없으나 배경지역의 표준 편차는 약10배 증가하였다.

본 논문에서 선정된 비등방 확산 필터의 최적조건은 경계선을 강조하면서, 배경지역의 정규화가 수행되므

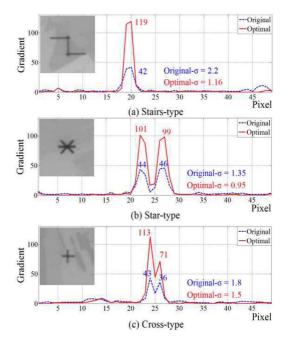


Fig. 11. Gradient profiles for three-type crack images.

로 결함과 배경지역을 구분하는 임계치의 설정이 쉬워져 실리콘 웨이퍼 마이크로 크랙을 효과적으로 검출할수 있다.

가공된 결함패턴 외에도 성능을 확인하기 위해 계단 (stairs), 별(star), 십자(cross) 모양을 가진 실리콘 웨이 퍼의 저대비 근적외선 영상에 선정된 비등방 확산 필터의 최적조건을 적용하였다. 그 결과는 Fig. 11에 나타낸 비등방성 확산 필터의 최적조건 적용 전·후의 밝기 기울기 그래프를 통해 확인하였다. 계단 결함은 경계선이 약 2.8배, 배경지역 정규화가 약 0.5배 증가하였다. 별 결함 역시 경계선 약 2.8배, 배경지역 정규화 약 0.7배 증가하였고, 십자 결함 또한 경계선 약 2.3배, 배경지역 정규화 약 0.8배 증가하였다. 각 형태에 따라약간의 차이를 보이지만 경계선 강조와 배경지역 정규화하기 비등방성 확산 필터의 최적조건 적용 전 보다 좋아진 것을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 제안하는 방법은 마이크로 크랙을 신뢰성 있게 검출하는데 유용할 것이라 판단된다.

4. 결 론

본 논문에서는 실험계획법 기반 비등방 확산 필터의 최적조건을 선정함으로써 저대비 근적외선 영상의 잡 음제거 및 배경지역 정규화와 경계선을 강조하여 실리 콘 웨이퍼 마이크로 크랙 검출을 향상 시키는 방법을 제안하였다. 인자간의 교호작용을 고려한 성능평가 경과 마이크로 크랙과 배경지역을 구분하는 임계치의 설정이 쉬워져 향후 실리콘 웨이퍼 마이크로 크랙 검출에 유용하게 적용될 것이라고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 정부의 재원으로 한국연구재단의 기초 연구 지원 사업(2012001630)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- Chiou, Y., "Micro Crack Detection of Multi-Crystalline Silicon Solar Wafer using Machine Vision Techniques", Sensor Rev, Vol. 31, pp. 154-165, 2011
- 2. Singh. E., "Review of Micro Crack Detection Tech-

- niques for Silicon Solar Cells", IEEE Jouranl of Photovoltaics, Vol. 4, No. 1, pp. 514-524, 2014
- 3. Kim, G. B., "Development of Inspection System with Optical Scanning Mechanism and Near-infrared Camera Optics for Solar Cell Wafer", Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 11, No. 3 pp. 1-6, 2012.
- Seo, H. J., Kim, G. B., "Optimal Parameter Selection of Near-infrared Optics Based Design of Experiment for Silicon Wafer in Solar Cell", Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 12, No. 3 pp. 29-34, 2013.
- Tsai, D. M., "Micro-Crack Inspection in Heterogeneously Textured Sola Wafers using Anisotropic Diffusion", Image and Vision Computing, Vol. 28, pp. 491-501, 2010

접수일: 2014년 9월 5일, 심사일: 2014년 9월 16일, 게재확정일: 2014년 9월 22일