

단결정 실리콘 태양전지 2차원 모델의 반사율 시뮬레이션

이상훈^{a1}, 강기환^a, 유권종^a, 안형근¹, 한득영¹
한국에너지기술연구원^a, 건국대학교¹

이상훈(ghoslee@kier.re.kr), 강기환(ghkang@kier.re.kr), 유권종(y-gj@kier.re.kr),
안형근(hkahn@konkuk.ac.kr), 한득영(dyhan@konkuk.ac.kr)

Two-dimensional model simulation for reflectance of single crystalline silicon solar cell

Lee, Sang-Hun^{a1}, Kang, Gi-Hwan^a, Yu, Gwon-Jong^a, Ahn, Hyung-Keun¹, Han, Deuk-Young¹

Lee, Sang-Hun(ghoslee@kier.re.kr), Kang, Gi-Hwan(ghkang@kier.re.kr), Yu, Gwon-Jong(y-gj@kier.re.kr),
Ahn, Hyung-Keun(hkahn@konkuk.ac.kr), Han, Deuk-Young(dyhan@konkuk.ac.kr),

Abstract

At present, crystalline solar cells take up a significant percentage of the solar industry. The ways of increasing the efficiency of crystalline solar cell are texturing and AR(Anti-Reflection) coating, and the purpose of these technologies is to increase the amount of available light on the solar cell by reducing the reflectivity. The reflectance of crystalline silicon solar cell combined with such technologies will be able to predict using the proposed simulation in this paper. The simulation algorithm was made using MATLAB, and it is a combination of the theories of reflection in textured wafer and in anti-reflection coated wafer. The simulation results were divided into three wavelength band and were compared with actual reflectance measured by a spectrometer. The wavelength band from 300 to 380 was named ultraviolet region and the wavelength band from 380 to 780 is named visible region. Finally, the wavelength band from 780 to 1200 named infrared region. When compared with measured reflection data, the simulation results had a small error from 0.4 to 0.5[%] in visible region. The error occurred in the rest two regions is larger than visible region. The extreme error occurred the infrared region is due to internal reflection effect, but in the ultraviolet region, the rationale on reduction phenomenon of reflectance occurred in small range did not proved. If these problem will be solve, this simulation will have high reliability more than now and be able to predict the reflectance of solar cells.

Keywords : 단결정 실리콘 태양전지(single crystalline silicon solar cell), 반사율(Reflectance), 시뮬레이션(Simulation)

기 호 설 명

α	: 피라미드의 각도[°]
R_{num}	: 빛의 반사 횟수
n_0	: 공기의 굴절률
n_1	: 반사방지막의 굴절률
n_2	: 웨이퍼의 굴절률
ϕ_i	: 태양전지(또는 웨이퍼)에 입사되는 빛의 입사각도[°]
ϕ_p	: 피라미드의 각도[°]
ϕ	: 반사방지막에 입사되는 빛의 입사각도[°]
d	: 반사방지막의 두께[m]
λ	: 파장 [m]
θ	: 위상차
r	: 반사계수
t	: 투과계수
M	: 전이행렬
R	: 반사율
T	: 투과율

1. 서 론

태양광 산업에서 큰 비중을 차지하고 있는 결정질 실리콘 태양전지는 고효율 저가화에 대한 연구가 진행되어 왔고, 현재도 계속해서 진행되고 있다. 고효율을 위한 연구로서는 표면 조직화(Texturing) 및 반사방지막(Anti-Reflection Coating)을 통해 태양전지의 반사율을 저감시키는 기술이 있는데, 본 연구에서는 이러한 기술에 접목된 태양전지의 반사율을 예측할 수 있는 시뮬레이션 알고리즘을 'MATLAB'을 사용하여 구성하였고 시뮬레이션 예측값을 실제 측정값과 비교 및 고찰하였다.

2. 태양전지의 반사율 예측 시뮬레이션

태양전지의 반사율 시뮬레이션에서 반사율을 예측하는 알고리즘의 구성과정에서 몇 가

지 가정과 근사화를 수행하였다.

우선 시뮬레이션에 사용된 웨이퍼는 단결정 실리콘 웨이퍼로 고정하였다. 결정립마다 결정방향이 다른 다결정 웨이퍼보다는 결정방향이 동일하여 일정한 방향으로 식각이 진행되는 단결정의 경우가 시뮬레이션과 실측치의 비교에 용이할 것으로 판단되었기 때문이다.

2.1 표면 조직화된 웨이퍼에서의 빛의 반사 시뮬레이션에서 웨이퍼에 형성된 피라미드 구조물은 그림1과 같이 모두 동일한 크기를 갖는다고 가정하였고, 웨이퍼의 단면을 보고 계산을 수행하는 2차원 모델로 구현하였다.

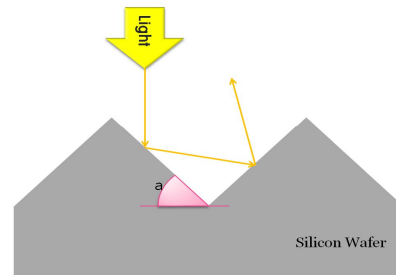


그림 1. 표면 조직화된 웨이퍼에서의 빛의 반사

피라미드에 입사된 빛의 반사 횟수는 피라미드의 각도와 피라미드에 대한 빛의 입사지점 및 각도에 따라 변할 수 있지만[1] 본 논문에서는 빛의 입사지점에 관련된 변수들을 제거하여 아래와 같은 근사화를 피하였다.

피라미드 각도에 대한 빛의 반사 횟수

$\alpha < 30^\circ$ 일 때, 1회 반사($R_{num}=1$)

$30 \leq \alpha < 45^\circ$ 일 때, 2회 반사($R_{num}=2$)

$\alpha \geq 45^\circ$ 일 때, 3회 반사($R_{num}=3$)

여기서 반사 횟수를 3회 이하로 제한한 이유는 후에 제시되어질 시뮬레이션을 몇 차례 수행하면서 결과 값을 비교한 결과 3회 이상 반사된 빛은 최종 결과 값에 미치는 영향이

미미하다고 판단되었기 때문이다. 반사 횡수를 제한함으로써 얻은 이점은 시뮬레이션이 좀 더 이른 시간에 계산을 수행할 수 있다는 사실이다.

2.2 반사방지막에서의 빛의 반사

반사방지막이 증착된 웨이퍼에서 빛은 그림 2와 같이 반사방지막의 표면과 내부에서 반복적으로 발생한다. 여기서 내부반사를 거친 빛은 반사 횡수가 증가할수록 점차 약해지기는 하지만 반사방지막의 총 반사율에 누적된다.

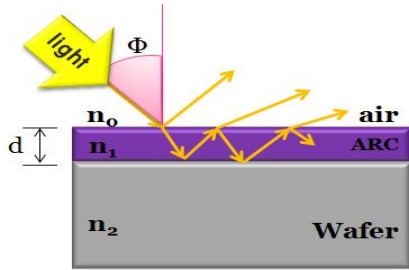


그림 2 반사방지막이 증착된 웨이퍼에서의 빛의 반사

이때 반사방지막에서의 빛의 반사율은 다중간섭(multiple interference)의 원리를 이용하여 해석할 수 있는데, 그 과정은 다음과 같다.[2][3][4]

먼저 빛의 위상차(phase difference)는 식(1)과 같이 계산되고, 수식에서 알 수 있듯이 각 파장에 대하여 각기 다른 값을 갖게 된다.

$$\theta = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 d \cos\phi \quad (1)$$

이렇게 계산된 위상차는 식(2)와 같은 매질에 대한 특성을 나타내는 특성행렬에 적용할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} 1 \\ n_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ -n_0 \end{bmatrix} r = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\frac{j\sin\theta}{n_1} \\ -jn_1\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ n_2 \end{bmatrix} t \quad (2)$$

특성행렬의 좌변은 n_0 의 굴절률을 갖는 매질(여기서는 공기)에 대응하고 우변의 2 by 2 행렬은 n_1 의 굴절률을 갖는 매질인 반사방

지막을, 그리고 나머지 부분은 n_2 의 굴절률을 갖는 매질인 웨이퍼에 대응된다. 여기서 반사방지막에 대응하는 2 by 2 행렬을 전이행렬(transfer matrix)이라 부르고, 행렬의 각 요소를 가지고 반사방지막의 반사율을 계산할 수 있다. 식(3)은 전이행렬의 각 요소를 간단한 기호로 치환한 식이다.

$$M = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\frac{j\sin\theta}{n_1} \\ -jn_1\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (3)$$

반사방지막의 반사계수 및 투과계수는 특성행렬을 통하여 얻을 수 있는 2개의 연립방정식을 이용하여 식(4) 및 (5)처럼 간단히 정리할 수 있다.

$$r = \frac{An_0 + Bn_2n_0 - C - Dn_2}{An_0 + Bn_2n_0 + C + Dn_2} \quad (4)$$

$$t = \frac{2n_0}{An_0 + Bn_2n_0 + C + Dn_2} \quad (5)$$

최종적으로 계산된 반사방지막의 반사율 및 투과율은 다음과 같다.

$$R = |r|^2 \quad (6)$$

$$T = \frac{n_2}{n_0} |t|^2 \quad (7)$$

2.3 태양전지에서의 빛의 반사

본 논문에서의 시뮬레이션은 2.1절 및 2.2절에서 제시된 두 가지 이론을 접목시켜 알고리즘을 구성하였고, 이는 그림 3과 4를 통해 한 눈에 볼 수 있다.

그림 3은 표면 조직화된 웨이퍼에 반사방지막을 증착시켰을 때의 모습을 간략히 표현한 것이다. 여기서 주목할 점은 각각의 피라미드 한 쪽 면을 평탄한 웨이퍼에 반사방지막을 입힌 형태로 표현했다는 사실이다. 이는 결국 피라미드에 입사된 빛을 2.2절에서 제시된 ‘반사방지막에서의 빛의 반사이론’에 바로 적용 가능함을 나타낸다. 피라미드의 첫 번째 벽에서 반사율만큼 반사된 빛은 바로 옆에 있는 피라미드의 벽으로 입사될 것이고, 이러한 과정은 반사 횡수(R_{num})만큼

반복된다. 시뮬레이션이 반사 횟수(R_{num})만큼 계산을 수행하고 나면 각각의 반사율은 R_1, R_2, R_3 라는 변수에 저장되고, 태양전지의 최종 반사율은 결국 R_1, R_2, R_3 의 곱으로 표현될 수 있다.

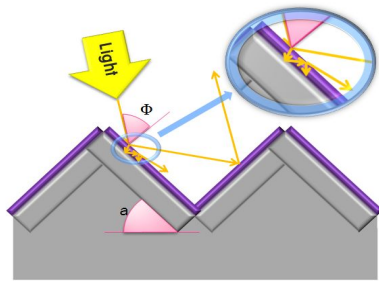


그림 3. 태양전지에서 빛의 반사

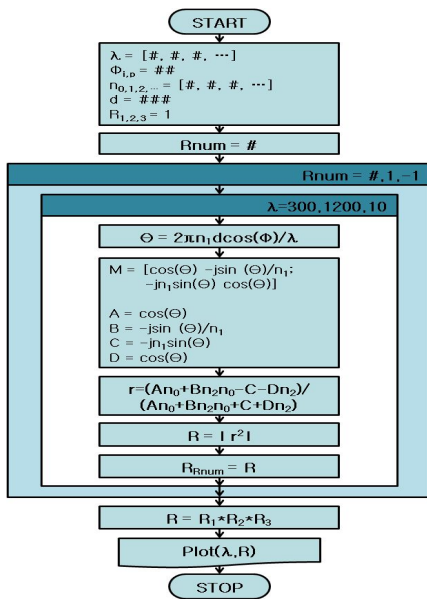


그림 4 태양전지 반사율 예측 시뮬레이션의 알고리즘

이해를 돕고자 하나의 예를 들어 $R_1=0.7, R_2=0.5, R_3=0.6$ 이라 하자. 처음 입사된 빛을 1이라고 했을 때 첫 번째 피라미드 벽면에서 0.7의 반사가 일어나고, 반사된 0.7의 빛이 두 번째 벽면에서 0.5만큼 반사되므로 이때까지의 최종 반사율은 0.35가 된다. 세 번째 벽면

에서는 0.6의 반사가 일어나므로 최종 반사율은 0.35의 6[할]인 0.21이고, 백분율로 표현하면 21[%]가 되는 것이다. 그리고 빛의 반사가 3번까지 일어나지 않는 경우를 생각해 시뮬레이션에서 R_1, R_2, R_3 의 초기값을 1로 선언했기 때문에 결과값에는 문제가 없다.

3. 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 변수 설정

시뮬레이션을 통해 얻은 결과 값과 실제로 제작된 태양전지의 반사율 측정 결과와 비교하기 위해서 이 절에서는 실제와 동일하게 시뮬레이션의 변수를 일치시켰다.

시뮬레이션에 사용된 매질은 대기, 반사방지막, 웨이퍼로서 총 3가지이고 각각 air, silicon nitride, silicon에 해당한다.

각 매질의 파장에 대한 굴절률은 직접 측정 또는 문헌을 통해 얻을 수 있었는데, 공기의 굴절률은 약간의 차이가 있기는 하지만 그 차이가 시뮬레이션에 큰 영향을 주지 않을 정도로 근소하여 그 값을 '1'로 고정하였다. 그 외의 매질 굴절률은 'J.A.Woollam'사의 Ellipsometer 'V-VASE'를 사용하여 측정하였다. 반사방지막의 두께는 약 75[nm]이고, SEM을 통해 측정한 실리콘 웨이퍼의 피라미드 각도는 약 55[°]이다.

3.2 시뮬레이션 결과

앞 절에서 제시된 변수 값을 이용하여 시뮬레이션을 수행한 결과 그림 5와 같은 그래프를 얻었다. 그래프에서 녹색, 청색 파선은 실제 태양전지(표면 조직화 공정을 거친 웨이퍼에 반사방지막을 증착함)의 반사율 측정값이고, 적색 실선은 시뮬레이션 결과이다. 태양전지의 반사율은 'JASCO'사의 'spectro-parameter V-670'을 사용하여 측정하였다.

시뮬레이션에 대한 해석은 파장대역을 300~380[nm]의 자외선 영역, 380~780[nm]의 가시광선 영역, 780~1200[nm]의 적외선 영역

으로 나누어 해석하게 된다.

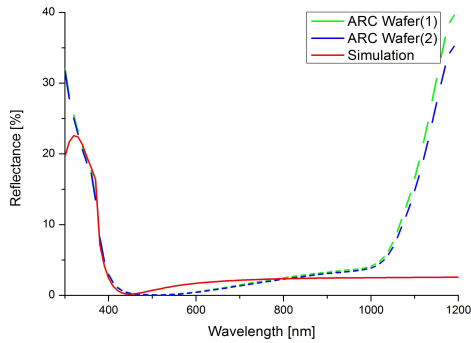


그림 5. 시뮬레이션 결과

(1) 가시광선 영역(380~780[nm])

가시광선 영역에서 시뮬레이션 예측 값과 실제 태양전지의 측정값이 정확히 일치하는 추세를 이루지는 않지만 전체적으로 근사한 값을 가진다고 판단된다. 시뮬레이션 예측값과 태양전지의 측정값 사이에 발생한 오차 정보를 표1에 제시하였다.

표 1. 가시광선 영역에서의 오차

	예측값-측정값(1)	예측값-측정값(2)
평균 오차	0.492 [%]	0.574 [%]
최대 오차	1.220 [%]	1.275 [%]
최소 오차	0.011 [%]	0.048 [%]

(2) 적외선 영역(780~1200[nm])

적외선 영역에서의 반사율은 예측 값과 측정값의 그래프 추세가 전혀 일치하지 않는 모습을 보이는데 이러한 모습으로 인해 시뮬레이션 알고리즘이 잘못되었다고 생각할 수도 있다. 하지만 이러한 오차는 잘못된 결과가 아니고, 장파장 영역에 존재하는 파동의 특성상 당연한 결과이다.

태양전지에 입사된 대부분의 빛은 반사방지막의 표면이나 반사방지막과 웨이퍼 사이의 계면에서 반사가 일어난다. 하지만 약 1000[nm]이상의 장파장의 빛이 입사되면 빛이 반사방지막을 지나 웨이퍼내부까지 투과

된 후 그림 6과 같이 웨이퍼 후면에서 반사되어 다시 태양전지 전면 쪽으로 빠져나오게 된다.[5] 이 사실에 비추어 볼 때 적외선 영역에서의 예측값과 측정값 사이의 오차는 파장 특성이 드러나는 측정값과 웨이퍼를 단순한 벌크영역으로 생각하고 계산한 시뮬레이션의 차이에서 기인한 것이다. 본 논문에서 이러한 오차를 개선하지 않은 이유는 웨이퍼 내부를 거치고 나온 빛은 태양전지의 발전(전자-정공쌍 생성)에 기여한 빛이기 때문에 이를 일반적인 개념의 반사율에 포함시킬 수 없었기 때문이다.

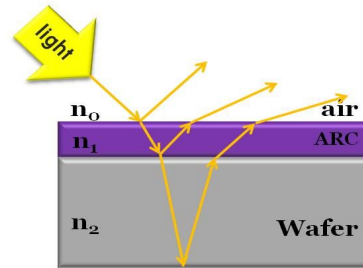


그림 6. 웨이퍼 후면에서의 반사

(3) 자외선 영역(300~380[nm])

자외선 영역은 측정 장비의 파장범위 제한으로 인해 적은 파장 범위 밖에 비교하지 못하였는데, 그 적은 범위에서도 그래프의 추세가 약간 다른 것이 발견되었다. 실제 측정값의 경우 파장이 짧아질수록 계속해서 반사율이 증가하는 모습을 보이는데 반해, 시뮬레이션 예측값은 파장이 짧아짐에 따라 반사율이 증가하다가 320[nm]부근에서 다시 감소하는 모습을 보이고 있다. 이 사실만 놓고 본다면 시뮬레이션을 통해 얻은 반사율은 파장이 짧아질수록 감소하는 것처럼 보일 수 있다.

이에 따라 두 값(예측값과 측정값)을 직접적으로 비교할 수는 없지만 300[nm]이하에서의 예측값의 추세를 보기위하여 시뮬레이션의 파장대역을 250~380[nm]로 넓이고 그때의 결과를 그림7에 도시하였다. 그림 7의 그래프에서 알 수 있는 결과는 감소하던 예

측값이 290[nm]부근에서 다시 증가로 이어진다는 점이다. 즉, 자외선 영역에서 시뮬레이션 예측값이 파장의 감소에 따라 계속해서 같이 감소하는 것이 아니라는 점이다. 이처럼 파장대역의 확장을 통하여 시뮬레이션에서 반사율의 증가추세는 확인되었다. 그리고 인용된 문헌[6][7]에서도 300~400[nm]사이의 파장대역에서 한 번의 굴곡을 보이고 있어 오차발생이 시뮬레이션 예측값에서 발생했다고 단정하기는 어려운 상황이다.

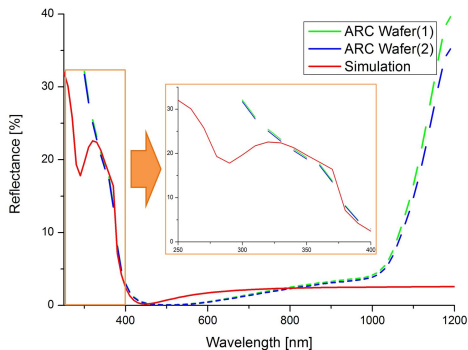


그림 7. 증가된 파장대역에서의 시뮬레이션 결과

4. 결론 및 고찰

제시된 시뮬레이션의 반사율 예측값과 실제 측정값은 가시광선 영역에서는 평균적으로 0.4~0.5[%]의 오차를 보였기에 어느 정도 안정적이라고 사려된다. 하지만 자외선 영역에서 발생한 오차는 시뮬레이션의 신뢰성 향상을 위해 반드시 개선되어야 할 점으로 사려되며, 알고리즘의 개선과 장비 조율을 통해 얻을 수 있을 것으로 보고 있다.

만약, 추후 연구에서 이러한 문제점들이 개선되어 시뮬레이션의 신뢰성이 확보된다면 본 논문에서 제시한 알고리즘은 표면 조직화 및 반사방지막 공정을 거친 태양전지의 반사율을 예측하는데 이용할 수 있을 것이고, 역으로 단결정 실리콘 태양전지의 낮은 반사율을 얻기 위해 태양전지 제작공정에서 피라미드 각도, 반사방지막 두께 등의 수치 값에 대

한 정보를 제공할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP) 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.(No. 20113010010010-11-1)

참 고 문 헌

1. 이준신, 김경해, 태양전지공학, 도서출판 그린, 2007, pp.116
2. Kh. S. Martirosyan, A. S. Hovhannisyan, V. M. Aroutiounian, Calculation of reflectance of porous silicon double-layer antireflection coating for silicon solar cells, *physica status solidi(c)*, Vol 4, Issue 6, 2007.05.
3. 정기수, 물리의 이해, 경상대학교 물리학과, <http://physica.gnu.ac.kr/>
4. D. Bouhafs, A. Moussi, Design and simulation of antireflection coating systems for optoelectronic devices: Application to silicon solar cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol 52, Issues 1-2, pp.79-93, 1998.03
5. 김동환, 탁성주, Solarcell Simulation, 제 1차 실리콘 태양전지 기술교육 교재
6. S. Strehlke, Design of porous silicon antireflection coatings for silicon solar cells, *Materials Science and Engineering B*, Vol 69-70, pp.81-86, 2000
7. Kartika Chandra Sahoo, Reflectance of sub-wavelength structure on silicon nitride for solar cell application, *Materials Science*, Vol 180, Issue 10, pp.2-5, 2009