

박막 실리콘 태양전지의 반사코팅 설계기술 연구

김창봉^{1*}

¹공주대학교 정보통신공학부 전자전공

The Study on the Reflection Coating Design Scheme in the Thin-Film Silicon Solar Cell

Chang-Bong Kim^{1*}

¹Division of Radio-wave Engineering, Kongju National University

요약 본 논문은 박막 실리콘 태양전지에 적용되는 반사방지 또는 고반사 코팅 기술에 관한 연구이다. 태양광 흡수율을 개선하기 위하여 박막 실리콘 태양전지의 앞면에는 반사를 줄이는 반사방지막 기술이 필요하며, 뒷면에는 반대로 반사를 높이는 고반사 기술이 필요하다. 반사방지막 기술에서 단층의 구조에서는 코팅의 두께에 따라 반사율이 틀러지고, 적절한 범위에서 두께를 제어하면 낮은 반사율을 얻을 수 있다. 대칭형태의 다층의 구조에서는 단층구조에 비해서 넓은 파장대에 걸쳐서 낮은 반사율을 얻을 수 있다. 또한 뒷면에 적용되는 고반사막 기술에서는 높은 굴절율을 갖는 매질과 낮은 굴절율을 갖는 매질을 대칭 구조로 구성하여 계산한 결과 높은 반사율을 얻을 수 있다는 것을 확인하였다.

Abstract This paper presents a reflection coating design scheme in the thin-film silicon solar cell. The antireflection(high reflection) coating skill is needed in the front(back) panel of the thin-film solar cell to improve an efficiency of light absorbing. In the single structure a reflectivity is changed according to the thickness of coating for antireflection scheme and its minimum value can be obtained by controlling thickness of coating. In the symmetric multi layer structure low reflectivity can be obtained in the wide wavelength range. And we also find that high reflectivity can be obtained through multi layer structure, which has alternate layers of high and low material, for high reflection scheme in the back panel.

Key Words : Antireflection Coating, Transfer Matrix, Light Capturing, Refractive Index

1. 서론

태양전지는 태양광발전 시스템의 핵심 부품으로서 현재 생산되는 태양전지의 80% 이상은 단결정 및 다결정 실리콘을 기반으로 하는 Bulk 실리콘 태양전지가 차지하고 있다. Bulk 타입이 아닌 박막태양전지는 실리콘의 두께를 극한까지 얇게 하여 실리콘 소재의 양을 절감하면서 다양한 형태의 기판을 선택 할 수 있고, 자동화를 통해서 모듈공정까지 일관화 시킬 수 있는 장점으로 인하여 개발이 활발히 이루어지고 있고, 시장의 점유율도 매년 증가하고 있다. 박막 태양전지는 유리, 스테인레스 또는 플라스틱 같은 저가의 기판에 감광성 물질의 얇은

막을 수 마이크로 두께로 씌어서 만든다. 따라서 고가의 실리콘에 의존하는 결정질 Si 태양전지에 비해서 박막 태양전지는 원료비중이 적어 생산단가가 낮고, 대량생산에 유리하다는 장점을 갖는 반면에, 대체적으로 변환효율이 낮다는 단점이 있다. 이러한 박막실리콘 태양전지의 낮은 변환효율을 개선하기 위해서 다양한 기술이 개발되고 연구되고 있다. 그 중 대표적인 것이 투명전극 조직화(Texture)기술과 반사방지막(Antireflection Coating) 기술을 적용하는 광 포획기술(Light Capturing)이다[1]. 이러한 기술들은 고효율의 변환효율을 갖는 재료의 적용만으로는 한계가 있는 태양광의 이용률을 극대화하는 기술로서 최근 많은 연구개발이 이루어지고 있다. 투명전극

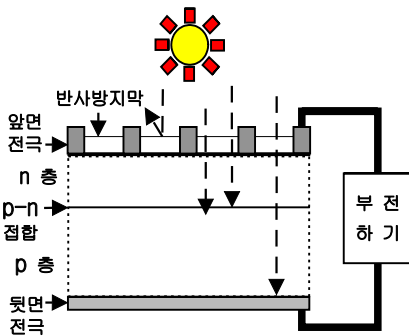
*교신저자 : 김창봉(aggie@kongju.ac.kr)

접수일 11월 09일 15일

수정일 11년 10월 11일

재제확정일 11년 11월 10일

조직화기술은 투명전극에서 빛의 투과도를 높여서 태양광의 손실을 줄이고 태양광의 흡수율을 높이는 것이다. 그 방법은 태양광의 손실을 줄이기 위해서 표면을 조직화하여 입사하는 태양광의 반사율을 줄이고 흡수율을 높히는데, 식각이나 패터닝을 통하여 표면을 조직화하면 입사하는 태양광의 일부는 투과하고 일부는 반사되는데 반사된 태양광은 조직화된 표면에 충돌하여 일부가 재반사되고 일부는 재투과 되어 실제의 반사 되는 태양광의 양은 감소한다. 다음으로 본 논문에서 다룰 반사방지막 기술은 그림 1의 태양전지 구조에서 보듯이 앞면에 얇은 반사방지막을 코팅하여 반사를 줄이는 기술이다. 또한 반사방지막 기술은 앞면에 적용하지만, 뒷면의 경우에는 반대로 반사율을 높게하여 앞면에 입사되어 광흡수층에 흡수되지 않고 뒷면에 도달한 태양광이 다시 광흡수층으로 재흡수 되어 태양전지의 효율을 높이게 된다. 즉, 앞면에 입사하는 태양광의 반사율을 감소시키고, 뒷면에는 반사율을 높여서 태양광의 재흡수를 높이는 기술이다.



[그림 1] 태양전지의 구조[2]
[Fig. 1] The structure of solar cell[2]

반사방지막은 태양전지 증착 전에 유리 기판 위에 얇은 투과막을 코팅하여 빛의 간섭(Interference) 현상을 이용하여 반사를 방지한다. 반사방지막은 빛의 간섭현상을 이용하여 반사율을 제어하므로 기판위에 증착되는 코팅물질의 굴절률 및 두께가 반사막의 반사(Reflection) 또는 반사방지(Antireflection(AR))의 정도를 결정하는 가장 중요한 요소이다. 따라서 이를 실현하기 위하여 여러 가지 방법들이 시도되었고 비교적 좋은 결과들이 발표되었다 [3-5]. 위의 여러 가지 방법 중 원자층증착법(Atomic Layer Deposition)[3]은 굴절률이 서로 다른 물질을 혼합하여 굴절률을 변화시키고 코팅 두께를 변화시켜서 비교적 정밀한 반사도를 제어 할 수 있는 기술이다. 따라서 본 논문에서는 원자층증착법으로 성장시켜서 얻은 물질의 굴절률 및 두께 등의 데이터를 이용하여 태양전지의 앞

면의 반사방지막과 뒷면의 고반사막(High Reflection(HR) Coating) 기술의 실현 타당성 및 향후 광포획기술의 실제의 적용 가능성에 대해서 조사하고자 한다.

2. 본론

2.1 원자층증착법을 이용한 혼합물의 생성

광학적인 박막코팅(Thin film coating)에서 반사방지막 코팅기술은 코팅물질의 두께와 굴절률을 제어하는 것이 중요하다. 특히 코팅물질의 두께를 제어하는 여러 기술 중 원자층증착법 기술은 정확한 코팅 두께의 제어, 코팅 두께의 우수한 균일성, 높은 재현성 등의 장점을 갖는다. 이 기술은 굴절률이 서로 틀린 물질을 혼합하여 서로 다른 굴절률의 혼합물을 생성하고 또한 코팅의 두께를 제어하는 기술이다. 높은 유전율을 갖는 물질인 Al_2O_3 , ZrO_2 , HfO_2 , Ta_2O_5 , TiO_2 은 코팅물질로 적합하다. 그 중에서 Al_2O_3 는 가장 적은 굴절률 값인 약 1.7을 갖고, TiO_2 는 가장 큰 굴절률 값인 2.4 이상이다. 그래서 만약 이 두 물질을 혼합하여 복합물질인 Al_xTi_yO 을 만든다면, 굴절률 값을 1.7과 2.4 범위에서 제어가 가능하다.

원자층증착법[3]에서 Al_xTi_yO 코팅 필름을 p 형 Si 기판위에 성장온도 각각 200 °C 및 250 °C로 증착시켰고 코팅물질의 굴절률등 관련 데이터는 아래 표 1에 첨부하였다.

[표 1] 코팅물질의 증착온도 및 Ti 함량에 따른 굴절률
[Table 1] Refractive index of coating materials according to the deposition temperature and Ti content

번호	코팅 물질	온도 (°C)	Ti (at.%)	굴절률
1	Al_2O_3	200	0.0	1.70
2	$Al_xTi_yO(1)$	200	13.1	2.00
3	$Al_xTi_yO(2)$	200	20.7	2.19
4	$Al_xTi_yO(3)$	200	22.9	2.24
5	$TiO_2(1)$	200	34.6	2.40
6	$TiO_2(2)$	250	33.2	2.42

태양전지에 적용되는 반사방지막의 성능을 결정하는 중요한 요소는 보다 넓은 파장대역에서 낮은 반사율을 얻는 것이다. 즉 파장대역에 따른 반사율 곡선을 넓은 범위로 확장하는 기술이 중요하다. 이러한 기술을 이루기 위해서는 코팅의 두께를 조절하거나 다층이 아닌 다층

구조의 반사방지막을 구성한다.

본 연구에서는 위의 주어진 데이터 값을 이용하여 (1) 코팅두께에 따른 반사율 (2) 다층구조를 갖는 코팅을 적용하여 반사율의 변화를 분석하고 그 결과를 이용하여 향후 태양전지의 효율을 높이고자 한다.

2.2 코팅 두께에 따른 반사율

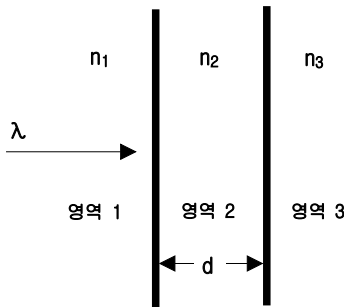
아래의 그림 2에서처럼 3개의 영역으로 이루어진 경계면에 빛이 수직으로 입사한다고 가정하자. 이때 영역 1은 공기($n_1 = 1$)이고, 굴절률이 n_2 이고 두께가 d 인 코팅 (영역 2)을 굴절률이 n_3 인 기판위(영역 3)에 입힐 때 코팅두께 d 와 코팅물질의 굴절률 n_2 가 다음을 만족할 때 반사율 R 이 영이 된다[6]. 즉,

$$d = \frac{\lambda}{4n_2} + m \frac{\lambda}{2n_2}$$

$$n_2 = \sqrt{n_3} \tag{1}$$

여기에서 m 은 정수(integer)이고, λ 는 진공에서 입사파의 파장이다. 그러나 만약 위의 조건을 만족하지 못하면 반사율 R 은 아래와 같이 주어진다.

$$R = \left(\frac{n_3 - n_2^2}{n_3 + n_2^2} \right)^2 \tag{2}$$



[그림 2] 경계면에서의 반사율
[Fig. 2] Reflectivity at the boundaries

위의 식 (1)과 (2)에서 보듯이 코팅의 두께와 굴절률은 반사방지막 코팅의 특성을 결정하는 중요한 요인이 된다는 것을 알 수 있다.

표 1의 3번 물질 $Al_xTi_yO(2)$ (굴절률=2.19)을 Si 기판(굴절률=3.8) 위의 코팅물질로 쓰고 코팅의 두께를 30nm, 40nm, 50nm, 그리고 110nm 로 변화시키고 반사율

을 분석하였다. 그림 3에서 코팅두께에 따른 반사율을 보면 두께가 30nm에서 50nm로 증가함에 따라 최소반사율이 파장이 긴 쪽으로 이동하고 있다는 사실을 알 수 있고 또한 코팅의 두께가 증가할수록 반사율의 곡선이 더 넓은 파장대역으로 확장되는 것을 알 수 있다. 그러나, 코팅 두께가 110nm 에서는 식 (1)에서

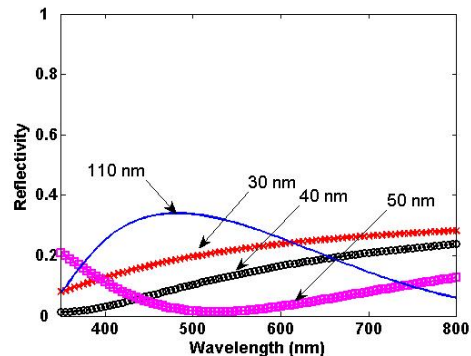
$$m = 0 \text{ 일 때}$$

$$\lambda = 4n_2d = 963.6 \text{ nm 이고,}$$

$$m = 1 \text{ 일 때}$$

$$\lambda = \frac{4}{3}n_2d = 321.2 \text{ nm}$$

로서, 반사율곡선에서 최소반사율 값이 파장대역 350 nm에서 800nm의 범위를 벗어나고 있기 때문에 종모양의 곡선을 보인다. 즉, 코팅의 두께를 최소 반사율을 갖는 범위 내에서 적절히 조절하면 반사율의 곡선을 더 넓은 범위로 확장 가능하다는 것을 알 수 있다.



[그림 3] 코팅 두께에 따른 반사율 곡선
[Fig. 3] Reflectivity of different thickness

2.3 코팅의 다층구조에 따른 반사율

코팅의 다층구조의 반사율을 알기 위해서는 단층 코팅 매질에서의 반사율을 결정하는 전달매트릭스(Transfer matrix)에 대한 이론이 필요하다. 즉, 단층 코팅매질에서의 전달 매트릭스 M 은 다음과 같이 주어진다[7].

$$M = \begin{pmatrix} \cos knd & \frac{i}{n} \sin knd \\ i n \sin knd & \cos knd \end{pmatrix} \tag{3}$$

여기에서 n 은 코팅매질의 굴절률이고, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 이고, d 는 코팅의 두께이다. 만약 코팅이 다층의 구조를 갖는다면,

$$M_1 M_2 M_3 \cdots M_N = M = \begin{pmatrix} A & iB \\ iC & D \end{pmatrix} \quad (4)$$

이다. 여기에서 $M_1, M_2, M_3 \cdots, M_N$ 은 각 코팅 층에 대한 전달 매트릭스이다. 이때 다층구조의 반사율 R 은

$$R = \frac{(A - n_s D)^2 + (n_s B - C)^2}{(A + n_s D)^2 + (n_s B + C)^2} \quad (5)$$

으로 주어진다. 이때 n_s 는 기판의 굴절률이고 입사되는 매질은 공기라고 가정하였다.

2.3.1 반사방지막(AR) 코팅을 위한 다층구조

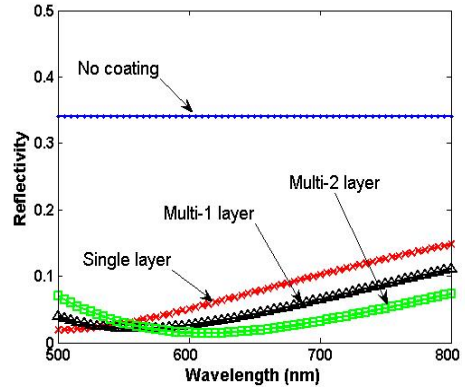
다층구조의 AR 코팅을 만들기 위하여 대칭구조의 3층을 고려해보자. 이 대칭구조의 전달 매트릭스는 $M = M_1 M_2 M_1$ 으로 주어진다. 즉,

$$M = M_1 M_2 M_1 = \begin{pmatrix} E & iF \\ iG & H \end{pmatrix} \quad (6)$$

으로 주어지고, 대칭구조 형태의 3층의 코팅층에 대한 반사율 R 은

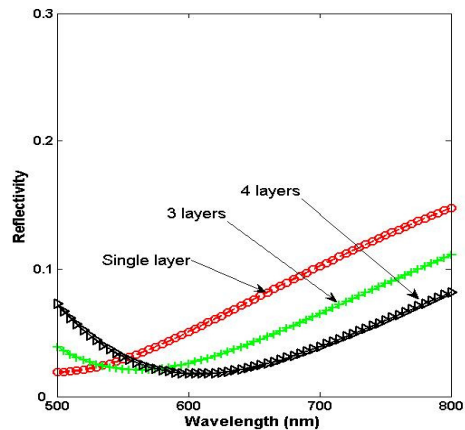
$$R = \frac{(E - n_s H)^2 + (n_s F - G)^2}{(E + n_s H)^2 + (n_s F + G)^2} \quad (7)$$

로 주어진다. 이 대칭구조의 반사율과 단층의 반사율을 비교해보기 위하여 표 1의 코팅물질에서 (1) 단층: $Al_x Ti_y O(3)$, 두께= 55.7 nm (2) 다층-1(Multi-1): $Al_2 O_3$, 두께= 15 nm / $TiO_2(1)$, 두께= 35 nm / $Al_2 O_3$, 두께= 15 nm (3) 다층-2(Multi-2): $TiO_2(1)$, 두께= 6 nm / $Al_x Ti_y O(2)$, 두께= 57 nm / $TiO_2(1)$, 두께= 6 nm 의 구조로 이루어지며, 위의 다층 구조는 원자층증착법에서 실험적으로 수행한 구조를 참조하였다. 각 구조에 대한 반사율을 계산한 결과가 아래의 그림 4에 나타나 있다.



[그림 4] 다층 및 단층구조의 반사율 곡선
[Fig. 4] Reflectivity of single and multi layer

그림 4의 결과를 보면 대칭구조의 두가지 유형 (Multi-1, Multi-2)의 코팅조합을 보면 코팅물질의 종류와 두께의 적절한 조합을 통해서 반사율을 제어 할 수 있고 Multi-2가 Multi-1보다 반사율 곡선을 더 넓은 범위의 파장대로 확장이 된다는 것을 알 수 있다. 또한 단층의 구조보다는 대칭구조를 갖는 다층의 구조가 보다 더 넓은 파장대역에서 더 낮은 반사율을 얻을 수 있다는 것을 보여준다. 다음으로 3층 대칭구조와 4층의 구조와의 반사율을 비교하기 위하여 단층 및 3층 대칭구조는 위의 그림 4의 단층 및 다층-1의 구조를 그대로 적용하였고 4층의 구조는 다층-1의 구조에 한층($TiO_2(1)$, 두께= 6 nm)이 더 추가되는 구조이다. 이때 각 구조에 대한 반사율을 계산해 보면 아래 그림 5의 결과를 얻는다.

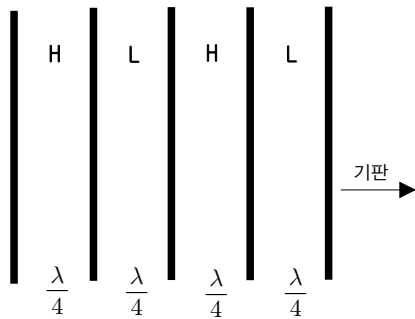


[그림 5] 다층(4층) 구조의 반사율 비교 곡선
[Fig. 5] Comparison of 4 layers to single layer and 3 layers in reflectivity

그림 5의 결과를 보면 층의 수가 증가할수록 최소 반사율 값이 긴 파장대로 이동하는 것과 4층 구조가 3층 대칭구조 및 단층 구조보다 더 넓은 파장대역에서 더 낮은 반사율을 얻을 수 있다는 것을 보여준다. 이러한 결과를 얻기 위해서는 각 코팅물질의 적절한 두께가 설계 시 함께 고려되어야 한다.

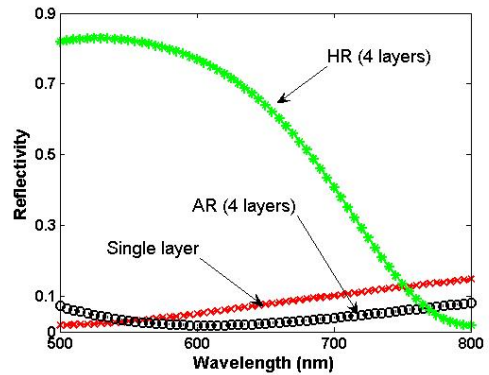
2.3.2 고반사막(HR) 코팅을 위한 다층구조

반사방지막은 광효율을 높이기 위해서 앞면에 적용하지만, 뒷면의 경우에는 반대로 반사율을 높이는 고반사막을 적용하여 광흡수층에 흡수되지 않고 뒷면에 도달하는 광을 반사시켜서 광흡수층으로 재흡수 되도록 하여 태양전지의 효율을 높인다. 고반사막을 얻기 위해서는 광학적 간섭을 이용하는 방법으로 그림 6과 같이 굴절률이 큰 매질과 작은 매질의 조합으로 하고 적절한 두께의 구조를 적용하는 것이다[7].



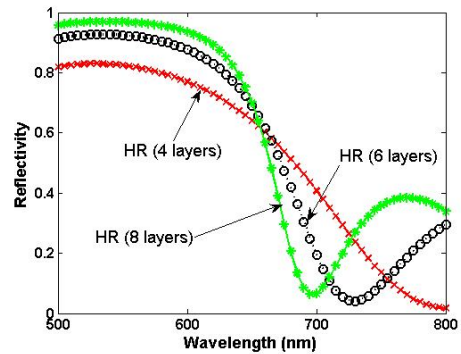
[그림 6] 고반사막 구조
[Fig. 6] Structure of high reflection

고반사막 구조를 이루기 위해서 코팅물질은 표 1의 코팅물질 중 굴절률이 제일 큰 TiO_2 (2)와 굴절률이 제일 적은 Al_2O_3 를 선택하였다. 구조는 그림 6의 구조를 적용한 4층(HR)으로 구성하고, 두께를 각각 56.7 nm, 65.9 nm로 하였다. 이때 단층 및 4층(AR)의 구조는 위의 그림 5의 데이터를 그대로 적용하였다. 아래의 그림 7은 그 결과를 보여준다. 그림 7에서 보듯이 고반사막 구조에서는 일정 파장대역에서 큰 반사율을 보이고 이 구조를 적절히 적용하면 광학필터의 기능을 구현할 수 있다.



[그림 7] 고반사막(HR)과 반사방지막(AR)
[Fig. 7] High and antireflection coating

마지막으로 코팅물질 및 두께는 그림 7의 데이터를 그대로 적용하고 고반사막 층의 수만을 늘려가면서 반사율을 계산해 보았고, 그 결과가 그림 8에 나타나 있다. 고반사막의 층의 숫자가 증가할수록 반사율이 증가하는 것을 볼 수 있다.



[그림 8] 층 수에 따른 고반사막(HR)
[Fig. 8] High reflection at different layers

3. 결론

박막태양전지는 여러 장점으로 인하여 시장 점유율이 매년 증가하고 있지만, 변환효율이 낮다는 단점이 있다. 이러한 단점을 개선하기 위하여 반사방지막을 이용한 광포획 기술은 중요한 기술로 대두되고 있다. 광포획 기술은 앞면에서는 반사방지막을 이용하여 입사하는 태양광의 반사율을 감소시키고, 뒷면에서는 반대로 반사율을 높여서 태양광의 흡수율을 높이는 것이 중요하다. 태양전지에서 적용되는 반사방지막의 성능을 결정하는 것은 보다

넓은 파장대에서 낮은 반사율을 얻는 것이다. 이러한 기술을 이루기 위한 중요한 요소는 코팅 층의 구조, 코팅 층의 두께, 코팅 매질의 굴절률을 어떻게 제어하고 구성 하느냐가 중요한 관건이다. 위의 요소들에 대한 분석 결과는 코팅의 구조에서는 단층인 경우에는 코팅의 두께에 따라 반사율이 틀러지고, 적절한 범위에서 두께를 제어하면 낮은 반사율을 얻을 수 있고, 다층의 구조에서는 대칭 구조를 갖는 것이 단층구조에 비해서 비교적 넓은 파장 대에 걸쳐서 낮은 반사율을 얻을 수 있다는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 뒷면에 적용되는 고반사막 기술에서는 높은 굴절율을 갖는 매질과 낮은 굴절율을 갖는 매질을 대칭 구조로 구성하여 계산한 결과 높은 반사율을 얻을 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과들을 태양 전지의 코팅 설계 시 적용하면 광 포획율을 개선하여 태양전지의 광효율을 높일 수 있다.

김 창 봉(Chang-Bong Kim)

[정회원]



- 1988년 6월 : 미국 Florida Institute of Technology 전기전자공학 (공학석사)
- 1992년 5월 : 미국 Texas A&M University 전기전자공학 (공학박사)
- 2000년 9월 ~ 현재 : 미국전기전자공학회(IEEE)Senior Member
- 1993년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 전파전공 정교수

<관심분야>

광소자, 광센서, 태양전지 반사막 설계기술

References

- [1] Stephen J. Fonash, "Solar Cell Device Physics", pp.32-36, Elsevier, 2nd edition, 2010.
- [2] New Recycling Energy: R&D Plan 2030 Series 9, "Solar Cell", pp. 4, Books Hill, 2008. 7.
- [3] J. W. Lim, S. J. Yun, H. T. Kim, "Optical AlTiO Films Grown by Plasma Enhanced Atomic Layer Deposition", Japanese Journal of Applied Physics, vol. 47, pp. 6934-6937, Aug., 2008.
- [4] J. W. Lim, S. H. Lee, J. K. Kim, S. J. Yun, "Antireflection Properties of Al₂O₃ and Al_xTi_{1-x}O_y Films on ZnO:Ga Coated Si Wafer for Thin-Film Solar Cell", Electrochemical and Solid-State Letters, vol. 13, G17, Aug., 2010.
- [5] Parag Doshi, Gerald E. Jelison, Jr., and Ajeet Rohatagi, "Characterization and Optimization of Absorbing Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposited Antireflection Coatings for Silicon Photovoltaics", Applied Optics, vol. 36, pp.7826-7890, July. 1997.
- [6] J. Ushida, M. Tokushima, M. Shirae, M. Yamada, , "Systematic Design of Antireflection Coating for Semi-infinite One-dimensional Photonic Crystals Using Bloch Wave Expansion", Applied Physics Letters, vol. 82, pp. 7-9, June, 2009.
- [7] Grant R. Fowler, "Introduction to Modern Optics", pp.96-101, Dover Publication, INC., 2nd edition 4, 1992.