

굴절률 분포에 따른 박막 실리콘 태양전지 반사방지막 설계기술 연구

김창봉^{1*}

¹공주대학교 정보통신공학부 전자전공

The Study on the Antireflection(AR) Coating Design Scheme According to the Index Profile in the Thin-Film Silicon Solar Cell

Chang-Bong Kim^{1*}

¹Division of Radio-wave Engineering, Kongju National University

요 약 본 논문에서는 향후 태양전지 반사방지막에 적용여부를 알기 위하여 굴절률 분포에 따른 반사방지막의 성능을 분석하였다. 기존논문에서 제시되었던 1차, 3차 및 5차 함수의 굴절률 분포를 6층 구조의 두께 180 nm 반사방지막에 적용하고 각 굴절률 분포에 대한 반사율을 계산하고 비교하였다. 또한 새로운 구배형 굴절률(graded index) 구조를 제안하였고, 제안한 구조와 기존의 1차, 3차 및 5차 함수의 반사율과 비교하였다. 그 결과로써, 굴절률 분포가 고차 함수로 갈수록 반사율이 대체적으로 감소하였고, 구배형 굴절률 분포의 경우는 짧은 파장대(500 nm ~ 700 nm 이하)에서는 1차, 3차 및 5차 함수보다 더 높은 반사율을 보였고, 긴 파장대(700 nm 이상 ~ 800 nm)에서는 더 낮은 반사율을 보였다. 따라서 긴 파장대에서는 구배형 굴절률 분포가 기존의 1차, 3차, 5차 함수인 경우보다 더 좋은 반사방지막이 될 수 있다는 것을 발견했고, 이 결과는 긴 적색 가시광선에서 적외선 영역에 적용되는 광소자 및 광필터에 적용 가능하리라 판단된다.

Abstract This paper shows an antireflection coating design skill for utilization the thin-film silicon solar cell in the future. The reflectivity of each index profile previously suggested as linear, cubic and quintic function has been calculated and compared. Each index profile is applied to the antireflection coating consisting of 6 layers with 180nm thickness. Also we suggest the graded index profile and compare it's reflectivity to the linear, cubic and quintic's ones. As a results we find the reflectivity generally decreases as the order goes to higher. However the reflectivity in the graded index profile shows the higher(lower) value than ones in the linear, cubic and quintic especially in the shorter(longer) wavelength range from 500 nm to below 700 nm(above 700 nm to 800 nm). Therefore we find that the graded index profile structure could be applied for the better antireflection coating design scheme especially for optical device and optical filter in the range of from deep red to infrared.

Key Words : Antireflection Coating, Transfer Matrix, Index Profile, Reflectivity

1. 서론

결정질 실리콘 태양전지에 비해서 박막 실리콘 태양전지는 생산단가가 낮고 대량생산에 유리하다는 장점을 갖는 대신에 변환효율이 낮다는 단점이 있다. 따라서 낮은

변환효율의 단점을 보완하기 위하여 다양한 기술이 적용되고 있는데, 그중의 하나가 반사방지막(antireflection coating)기술이다. 반사방지막은 태양전지 증착 전에 유리 기판 위에 얇은 투과막을 코팅하여 빛의 간섭(interference) 현상을 이용하여 반사를 방지한다. 반사방

이 논문은 2012년 공주대학교 연구년 사업에 의하여 연구 되었음.

*Corresponding Author : Chang-Bong Kim

Tel: +82-41-521-9196 email: aggie@kongju.ac.kr

접수일 12년 05월 16일

수정일 (1차 12년 08월 29일, 2차 12년 09월 03일)

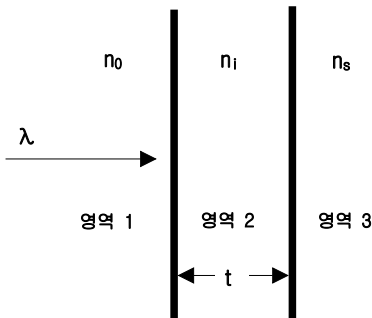
계재확정일 12년 09월 06일

지막은 빛의 간섭현상을 이용하여 반사율을 제어하므로 기관위에 증착되는 코팅물질의 굴절률 및 두께가 반사막의 반사방지(antireflection(AR))의 정도를 결정하는 가장 중요한 요소이다. 그리고 우수한 반사방지막을 얻기 위해서는 보다 넓은 파장대에 걸쳐서 낮은 반사율을 얻는 기술이 중요하며 이를 실현하기 위하여 단층이 아닌 다층의 반사방지막 구조를 갖아야 한다. 다층의 반사방지막을 효과적으로 구성하기 위하여 각 층의 두께를 적절하게 변화시키는 방법이 있고[1], 각층의 일정한 두께 내에서 굴절률을 변화시키는 방법이 있다. 이 방법은 공기에서 기관 방향으로 굴절률을 증가하는 방식이며, 이때 굴절률의 변화는 1차, 또는 고차함수 등으로 굴절률 분포를 변화시켜 가능한 넓은 파장대에 걸쳐서 낮은 반사율을 갖도록 하는 것이다[2]. 이러한 기술이 가능하게 한 것은 최근 실리콘 나노막대 구조를 갖는 방식을 사용하고 나노막대의 각도를 변화시켜어 정밀한 굴절률 제어 (1.09 ~ 2.6)를 가능하게 하거나[3], 원자층증착법(atomic layer deposition) [1]을 사용하여 굴절률이 서로 다른 물질을 혼합하여 정밀한 굴절률 제어(1.7 ~ 2.42)가 가능하기 때문이다.

2. 굴절률 분포에 따른 반사율

2.1 반사방지막의 구조 및 굴절률 분포

일반적인 태양전지의 기관위의 코팅구조는 아래의 그림 1과 같이 3개의 영역으로 이루진다. 만약 빛이 수직으로 입사한다고 가정하면 영역 1은 공기($n_0 = 1$)이고, 반사방지막(영역 2)의 굴절률은 n_i 이고 두께가 t 이며, 기관(영역 3)의 굴절률이 n_s 이다.



[그림 1] 반사방지막의 구조
[Fig. 1] The structure of antireflection coating

본 연구에서는 기존의 Southwell의 논문[4]에서 제안한 1차, 3차, 5차 굴절률 분포 및 새로 제안하는 구배형

굴절률 분포를 영역 2의 반사방지막에 적용하여 반사율을 계산하고 비교하고자 한다. 먼저 계산을 단순화하기 위하여 다음을 가정한다. 반사방지막의 두께 $t = 1 \mu\text{m}$ 로 가정하고, 기관의 굴절률 $n_s = 2.4$ 이고 반사방지막 표면의 굴절률 $n_i = 1.6$ 이라고 가정한다. 이때 굴절률은 기관 쪽으로 갈수록 1차, 3차, 5차 및 구배형 분포를 갖으며 증가한다고 가정한다. 이때 적용된 굴절률 분포 중 1차 분포는

$$n(t) = n_i + (n_s - n_i)t, 0 \leq t \leq 1 (\mu\text{m}) \quad (1)$$

이고,

3차 분포는

$$n(t) = n_i + (n_s - n_i)(3t^2 - 2t^3), 0 \leq t \leq 1 (\mu\text{m}) \quad (2)$$

이고,

5차 분포는

$$n(t) = n_i + (n_s - n_i)(10t^3 - 15t^4 + 6t^5), 0 \leq t \leq 1 (\mu\text{m}) \quad (3)$$

이다.

또한, 제안하는 구배형 분포식은 구배형 광섬유(graded index optical fiber)의 코어와 클래딩의 굴절률 분포를 따른다. 일반적인 구배형 광섬유의 코어와 클래딩사이의 굴절률 분포의 식[5]은

$$n(r) = n_1 \sqrt{1 + 2(r/a)^\alpha \Delta}, \quad r \leq a \quad (4)$$

$$n(r) = n_2, \quad r > a \quad (5)$$

으로 주어지고, 여기에서 $n(r)$ 은 구배형 광섬유의 굴절률 분포이고, n_1 은 광섬유 중심축($r = 0$)의 굴절률이고, n_2 는 클래딩의 굴절률이다. 또한 a 는 코어의 반경이며, α 는 구배곡선의 기울기를 결정하는 파라미터이고, $\Delta = (n_1 - n_2)/n_1$ 로 주어지는 스케일 인자(scale factor) 이다. 구배형 굴절률 분포를 반사방지막에 적용하기 위하여 적용한 분포식은

$$n(t) = n_i \sqrt{1 + 2(t/x)^K ((n_s - n_i)/n_s)}, 0 \leq t \leq 1 (\mu\text{m}) \quad (6)$$

이고, 구배곡선의 기울기를 결정하는 K 의 값을 2 와 3

일 때를 고려하였다. 이때 (6)식은 $t=0$ 일 때(즉, 반사방지막 표면에서) 굴절률 $n(0) = n_i$ 이고, $t=1$ 일 때 $n(1) = n_s$ 을 만족하여야 한다. 따라서 $K=2$ 및 $K=3$ 일 때 식 (6)이 위의 두 조건을 만족하기 위한 x 값을 구하면 각각 $x=0.7303$ 과 $x=0.8110$ 이 된다. 그러므로 반사방지막에 적용하고자 하는 구배형 굴절률 분포식은 다음과 같이 된다.

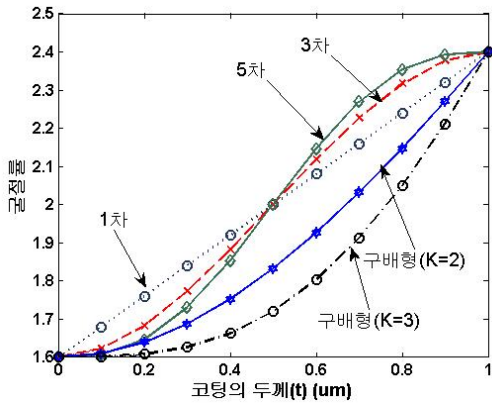
$K=2$ 일 때 (7)

$$n(t) = n_i \sqrt{1 + 2(t/0.7303)^2((n_s - n_i)/n_s)}, \quad 0 \leq t \leq 1 (\mu\text{m})$$

$K=3$ 일 때 (8)

$$n(t) = n_i \sqrt{1 + 2(t/0.8110)^3((n_s - n_i)/n_s)}, \quad 0 \leq t \leq 1 (\mu\text{m})$$

아래의 그림 2는 위에 언급된 1차, 2차, 3차 및 구배형 굴절률 분포의 그림을 나타낸다.



[그림 2] 굴절률 분포
[Fig. 2] Index profile

2.2 굴절률 분포에 따른 반사율 특성

2.2.1 단층 및 다층구조의 반사율

2.1 절에서 제시된 1차, 3차, 5차 및 구배형 굴절률 분포를 두께 180 nm의 반사방지막에 적용하고 넓은 파장대에 걸쳐서 효율적인 반사방지막을 형성하기 위하여 6층의 다층구조를 가정한다. 각층의 두께는 30 nm로 동일하고 반사방지막 표면으로부터 기판으로 갈수록 굴절률이 주어진 분포 특성을 갖으며 증가한다. 이때 다층의 구

조에 따른 반사율을 계산하기 위하여 단층 코팅매질에서의 반사율을 결정하는 전달매트릭스(transfer matrix)에 대한 이론이 필요하다. 즉, 단층 코팅매질에서의 전달 매트릭스 M은 다음과 같이 주어진다[6].

$$M = \begin{pmatrix} \cos kn_c d & \frac{i}{n} \sin kn_c d \\ i n \sin kn_c d & \cos kn_c d \end{pmatrix} \quad (9)$$

여기에서 n_c 은 코팅매질의 굴절률이고, $k=2\pi/\lambda$ 이고, d 는 코팅의 두께이다. 만약 코팅이 다층의 구조를 갖는다면,

$$M_1 M_2 M_3 \cdots M_N = M = \begin{pmatrix} A & iB \\ iC & D \end{pmatrix} \quad (10)$$

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

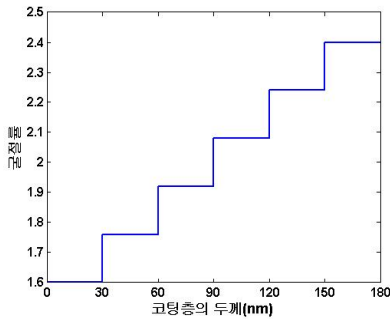
$$R = \frac{(A - n_s D)^2 + (n_s B - C)^2}{(A + n_s D)^2 + (n_s B + C)^2} \quad (11)$$

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

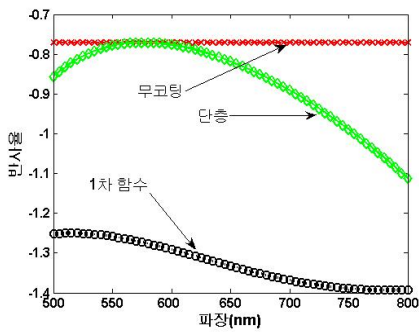
2.2.2 굴절률 분포에 따른 반사율

1) 1차 함수 분포

1차 함수의 굴절률 분포는 앞 절의 식 (1)을 따르며 그림 3은 두께 180 nm의 6층으로 이루어지며 1차 함수의 굴절률 분포를 갖는 반사방지막 구조를 나타낸다. 이때 1차 함수 굴절률 분포에 따른 반사율을 계산한 것이 그림 4에 나타나 있다. 그림 4에서 단층이라고 표시된 것은 반사방지막이 단층으로 굴절률이 $n_i = 1.6$ 이고 두께 180 nm를 갖는 경우의 반사율을 나타낸다. 무코팅이라고 표시된 것은 반사방지막이 없는 경우의 반사율, 1차 함수는 1차 함수의 굴절률 분포(그림 3의 분포)를 갖는 경우의 반사율을 각각 나타낸다. 이때 반사율은 적은 수치의 반사율의 차이를 쉽게 비교하기 위하여 로그함수를 취하였다. 그림 4를 보면 반사방지막이 없는 경우와 단층의 반사방지막을 갖는 경우에 비해서 1차 함수의 굴절률 분포를 갖는 6층의 구조가 더 낮은 반사율을 보이고 있다는 것을 알 수 있다.



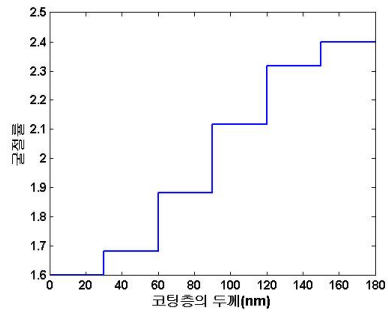
[그림 3] 1차 함수 굴절률 분포
[Fig. 3] Linear index profile



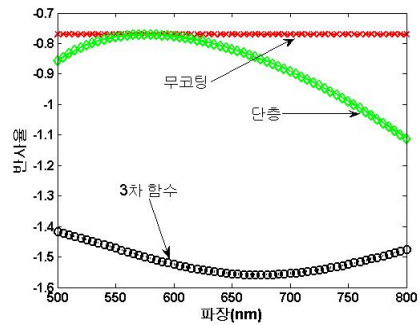
[그림 4] 1차 함수 굴절률 분포에 따른 반사율
[Fig. 4] Reflectivity of linear index profile

2) 3차 함수 분포

3차 함수의 굴절률 분포는 앞 절의 식 (2)를 따르며 그림 5는 두께 180 nm의 6층으로 이루어진 3차 함수의 굴절률 분포를 갖는 반사방지막 구조를 나타낸다. 이때 3차 함수 굴절률 분포에 따른 반사율을 계산한 것이 그림 6에 나타나 있다. 그림 4의 1차 함수 경우의 반사율과 그림 6의 3차 함수 경우의 반사율을 비교 해보면 3차 함수인 경우 670 nm 에서 최저의 반사율 -1.5585(로그값)으로 반사율은 약 0.698 이고, 1차 함수의 경우 최저치는 약 800 nm 에서 -1.3933(로그값)으로 반사율은 약 0.725 이다. 따라서 3차 함수 분포인 경우 1차 함수 분포인 경우보다 더 낮은 반사율을 나타내어 보다 좋은 반사방지막을 형성한다는 것을 알 수 있다.



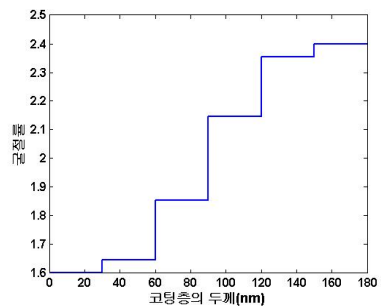
[그림 5] 3차 함수 굴절률 분포
[Fig. 5] Cubic index profile



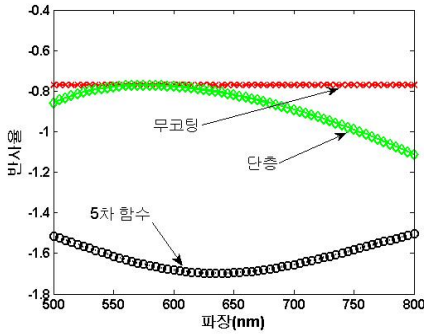
[그림 6] 3차 함수 굴절률 분포에 따른 반사율
[Fig. 6] Reflectivity of cubic index profile

3) 5차 함수 분포

5차 함수의 굴절률 분포는 앞 절의 식 (3)을 따르며 그림 7은 두께 180 nm의 6층으로 이루어진 5차 함수의 굴절률 분포를 갖는 반사방지막 구조를 나타낸다. 이때 5차 함수 굴절률 분포에 따른 반사율을 계산한 것이 그림 8에 나타나 있다. 그림 8을 보면 최소 반사율이 약 630 nm에서 -1.6980(로그값)으로서 앞의 3차 함수의 경우 최소값 -1.5585(로그값) 보다 더 적은 반사율을 얻을 수 있다. 따라서 5차 함수 분포가 1차 및 3차 함수 분포보다 전반적으로 더 적은 반사율을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.



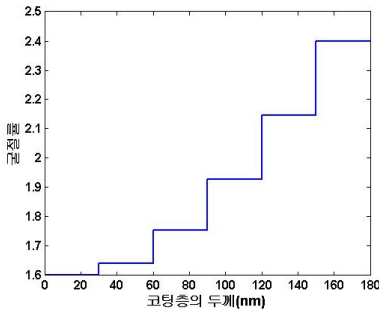
[그림 7] 5차 함수 굴절률 분포
[Fig. 7] Quintic index profile



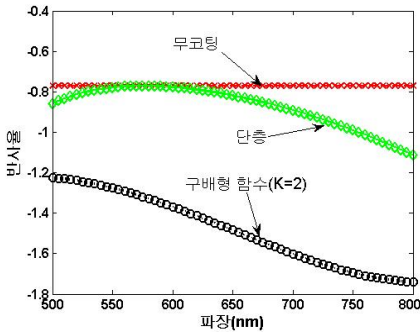
[그림 8] 5차 함수 굴절률 분포에 따른 반사율
[Fig. 8] Reflectivity of quintic index profile

4) 구배형($K=2$) 분포

구배형 함수의 굴절률 분포는 앞 절의 식 (7) 및 식 (8) 을 따르며 그림 9는 두께 180 nm의 6층으로 이루어진 구배형($K=2$) 함수의 굴절률 분포를 갖는 반사방지막 구조를 나타낸다. 이때 구배형 함수 굴절률 분포에 따른 반사율을 계산한 것이 그림 10에 나타나 있다.



[그림 9] 구배형 함수($K=2$) 굴절률 분포
[Fig. 9] Graded index($K=2$) profile

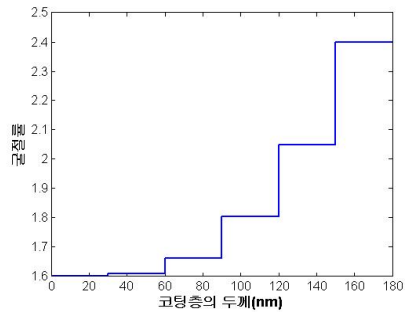


[그림 10] 구배형($K=2$) 함수의 반사율
[Fig. 10] Reflectivity of graded index profile($K=2$)

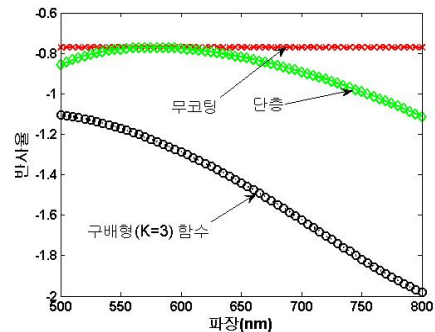
그림 10에서 최소 반사율은 -1.7400(로그값)으로서 앞 절의 1차, 3차 및 5차 함수인 경우보다 더 낮은 반사율을 보이고 있다는 것을 알 수 있어서 기존의 Southwell의 논문에서 제시한 1차, 3차 및 5차 함수의 굴절률 분포보다 본 논문에서 제시한 구배형 굴절률 분포의 경우 더 좋은 반사방지막을 형성 할 수 있다는 것을 보여준다.

5) 구배형($K=3$) 분포

구배형 함수의 굴절률 분포에서 구배형 분포의 기울기를 제어하는 K 의 값을 3으로 증가시키면서 그때의 반사율의 변화를 조사하였다. 그림 11은 두께 180 nm의 6층으로 이루어진 구배형($K=3$) 함수의 굴절률 분포를 갖는 반사방지막 구조를 나타낸다. 이때 구배형 함수 굴절률 분포에 따른 반사율을 계산한 것이 그림 12에 나타나 있다.



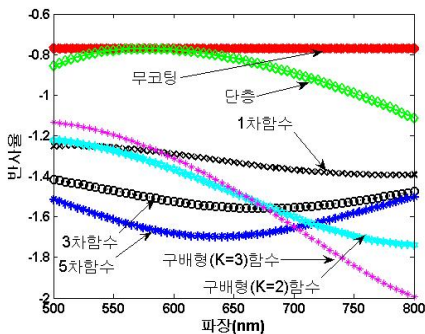
[그림 11] 구배형 함수($K=3$) 굴절률 분포
[Fig. 11] Graded index($K=3$) profile



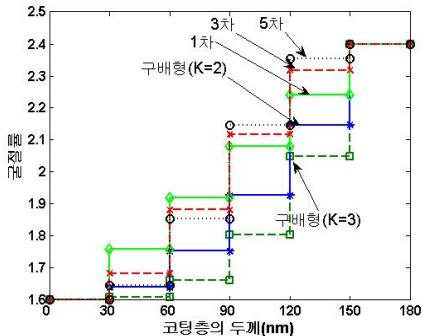
[그림 12] 구배형($K=3$) 함수의 반사율
[Fig. 12] Reflectivity of graded index profile($K=3$)

그림 12의 $K=3$ 인 구배형 함수의 반사율의 최소값은 -1.9801(로그값)으로서 $K=2$ 인 구배형 함수보다 더 낮은 최소값을 갖는다는 것을 알 수 있다. 따라서 구배형

함수는 K 의 값이 클수록 더 낮은 반사율을 얻을 수 있어 더 좋은 반사방지막을 형성 한다는 것을 알 수 있다. 그러나, 파장 영역이 짧은 500 nm 대에서는 $K=2$ 인 구배형 함수 보다 $K=3$ 인 경우가 더 높은 반사율을 보인다. 따라서 구배형 굴절률 분포에서는 긴 파장대(약 670 nm 이상)에서는 K 값이 큰 구배형 함수가, 짧은 파장대(약 670 nm 이하)에서는 K 값이 적은 구배형 함수가 더 좋은 반사방지막이 된다는 것을 알 수 있다. 또한 구배형 굴절률 분포와 기존의 1차, 3차, 5차 함수의 반사율을 비교해보면 700 nm 이상 ~ 800 nm 인 긴 파장대에서는 1차, 3차 및 5차 함수인 경우보다 더 낮은 반사율을 보여 더 좋은 반사방지막이 된다는 것을 알 수 있다. 아래의 그림 13은 굴절률 분포 함수에 따른 반사율을 요약하여 보여주고, 그림 14는 1차, 3차, 5차 및 구배형 굴절률 분포를 갖는 반사방지막 구조를 요약하여 보여준다. 그리고 표 1은 지금까지의 굴절률 분포에 따른 반사율 값을 요약하여 보여준다.



[그림 13] 굴절률 분포에 따른 반사율
[Fig. 13] Reflectivity according to the various index profile



[그림 14] 다양한 굴절률 분포
[Fig. 14] Various index profile

[표 1] 굴절률 분포에 따른 반사율 값

[Table 1] Reflectivity according to the various index profile

굴절률 분포	최소 반사율 (로그값)	최대 반사율 (로그값)
1차 함수	-1.3933	-1.2501
3차 함수	-1.5585	-1.4165
5차 함수	-1.6980	-1.5016
구배형($K=2$)	-1.7400	-1.2245
구배형($K=3$)	-1.9801	-1.1053

3. 결론

박막태양전지는 여러 장점으로 인하여 시장 점유율이 매년 증가하고 있지만, 변환효율이 낮다는 단점이 있다. 이러한 단점을 개선하기 위하여 반사방지막을 이용한 광 포획 기술은 중요한 기술로 대두되고 있다. 광 포획에서 중요한 기술 중 하나는 입사광의 반사율을 최대 줄여 태양전지의 광 흡수율을 최대 높일 수 있는 반사방지막 설계 기술이다. 본 논문에서는 기존의 논문에서 제안한 1차, 3차 및 5차 함수의 굴절률 분포를 6층 구조의 두께 180 nm 반사방지막에 적용하고 각각의 경우에 대한 반사율을 계산하고 비교하였다. 또한 향후 태양전지에 적용여부를 알고자 새로운 구배형 굴절률 분포를 제안하고 1차, 3차 및 5차 함수의 굴절률 분포인 경우와 반사율을 비교하였다. 그 결과로서 굴절률 분포가 고차함수(1차->3차->5차)로 갈수록 반사율이 전 파장대에 걸쳐서 대체적으로 감소하는 것을 알 수 있었다. 또한 본 논문에서 제안한 구배형 굴절률 분포의 경우는 긴 파장대(700 nm 이상 ~ 800 nm)에서는 1차, 3차 및 5차 함수인 경우보다 더 낮은 반사율을 보여 성능이 우수한 반사방지막으로서의 가능성을 보여주었다. 그러나, 짧은 파장대(500 nm ~ 700 nm 이하)에서는 기존의 1차, 3차 및 5차 함수인 경우보다 반사율이 높아서 반사방지막의 특성이 떨어진다는 것을 알 수 있었다. 따라서 구배형 굴절률 분포의 경우는 긴 적색 가시광선에서 적외선 영역에 적용되는 광소자 및 광필터에 적용 가능하리라 판단된다.

References

[1] 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.
- [2] M. Kuo, D. J. Poxson, et al., "Realization of a Near-perfect Antireflection Coating for Silicon Solar Energy Utilization", *Optics Letters*, vol. 33, no. 21, pp.2527-2529, Nov., 2008.
- [3] J. Q. Xi, Jong Kyu Kim, E. F. Schubert, Dexian Ye, T. M. Lu, and Sha주-Yu Lin, "Very Low-refractive-index Optical Thin Films Consisting of an Array of SiO₂ Nanorod", *Optics Letters*, vol. 31, no. 5, pp.601-603, March, 2006.
- [4] W.H. Southwell, "Gradient-index Antireflection Coatings", *Optics Letters*, vol. 8, no. 11, Nov., 1983.
- [5] Joseph C. Palais, "Fiber Optic Communications", pp.125-126, Prentice Hall, 5th edition, 2002.
- [6] Grant R. Fowler, "Introduction to Modern Optics", pp.96-101, Dover Publication, INC., 2nd edition, 1992.
-

김 창 봉(Chang-Bong Kim)

[정회원]



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

<관심분야>

광소자, 광센서, 태양전지 반사막 설계기술