

구배형 굴절률 반사방지막 연구

김창봉

공주대학교 정보통신공학부 전자전공

The Study on the Graded Index Antireflection(AR) Coating

Chang-Bong Kim

Division of Radio-wave Engineering, Kongju National University

요약 우수한 반사방지막을 얻기 위하여 코팅 층의 구조를 나노입자구조로 만들어 코팅 층에 입사하는 빛을 분산시키거나, 코팅 층의 매질을 다양하게 선택하여 굴절률을 제어하여 반사율을 낮추는 기술이 제안되고 있다. 본 논문에서는 코팅 층의 굴절률 분포를 변화시켜 우수한 반사방지막을 얻는 방법 중 기존논문에서 제시되었던 5차 함수의 굴절률 분포와 제안하는 구배형 굴절률 분포의 반사방지막 특성을 비교하였다. 분석에 사용된 반사방지막 구조는 각각 3, 6, 9층 구조로서 총 두께 180 nm 이고, 입사파의 파장 범위는 300 nm ~ 1100 nm 이다. 각 각 서로 다른 층수에서 반사율을 비교하기 위하여 단층인 경우의 전달매트릭스를 구하고 3, 6, 9층의 구조에서의 반사율을 구하였다. 그 결과 3층의 구조 일 때 제안하는 구배형 굴절률 분포가 약 600 nm ~ 1100 nm 파장 범위에서 5차 함수의 굴절률 분포보다 더 낮은 반사율을 보였다. 향후 이 결과는 가시광선(적색)과 근적외선 영역에 사용되는 광소자 및 광 필터에 응용 가능하리라 판단된다.

Abstract The various techniques proposed previously to obtain a good antireflection(AR) coating induce a scattering of incident light by nanoparticles or control the refractive index by using different materials. This paper compares a suggested graded index profile with the quintic index profile previously suggested for producing an index profile that gives good performance from an AR coating. We assume the structure of the AR coating has three, six, and nine layers with 180 nm total thickness. The wavelength of incident light ranges from 300 nm to 1100 nm. We use the transfer matrix theory for a single layer to obtain the reflectivity of three, six, and nine layers. The reflectivity of two different index profiles with three, six, and nine layers is compared. As a result, the suggested graded index profile shows lower reflectivity than the quintic index profile with three layers, especially in the wavelength range from about 600 nm to 1100 nm. Therefore, we expect that these results can be applied to optical devices and filters in the range from visible(red) to near infrared.

Keywords : Antireflection Coating, Transfer Matrix, Index Profile, Reflectivity

1. 서론

반사방지막(Antireflection(AR) coating)의 성능은 넓은 파장대에 걸쳐서 낮은 반사율의 획득 여부에 의해서 결정된다. 반사방지막의 성능을 향상시키기 위하여 다양한 방법이 제안되고 있으며 실례로서 실리콘나이트라이드 층 위에 실리콘 또는 금속 나노입자를 입혀서 입사파

가 나노입자 의해서 분산(scattering) 되는 효과를 발생시켜 낮은 반사율을 얻거나[1], 실리콘 기판위에 SiO_2 나노막대를 배열시켜 낮은 반사율을 얻는다[2]. 위의 두 기술들은 모두 코팅 층에 새로운 구조물을 성장시켜 반사율을 줄이는 방법이나, 코팅 층의 매질을 다양하게 선택하여 코팅 층의 굴절률 값을 제어하여 반사율을 변화시키는 방법도 제안되고 있다[3]. 코팅 층의 굴절률을 제

본 논문은 2016년 공주대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 연구되었음.

*Corresponding Author : Chang-Bong Kim(Kongju National University)

Tel: +82-41-521-9193 email: aggie@kongju.ac.kr

Received January 31, 2017

Revised (1st March 10, 2017, 2nd May 10, 2017)

Accepted May 12, 2017

Published May 31, 2017

어하기 위해서 굴절률 분포를 변화시키는 방법이 있는데, 굴절률 분포를 1차, 3차, 5차 함수의 분포를 갖도록 하여 반사율을 변화시키는 방법으로, 특히 5차 함수 굴절률 분포가 1차 및 3차 함수 굴절률 분포에 비해서 우수한 반사특성을 보였다[4]. 또한 기존의 우수한 반사율 특성을 보이는 5차 함수 굴절률 분포와 비교되는 구배형 굴절률 분포가 제안되었고 그 결과로 구배형 굴절률 분포가 700 nm ~ 800 nm 에서 5차 함수 굴절률 분포 보다 더 낮은 반사율 분포를 갖는다는 결과를 보였다[5]. 본 논문에서는 코팅 층의 구조를 3층, 6층, 9층으로 가정하고 입사파의 파장 범위를 300 nm ~ 1100 nm 로 확장하여 5차 함수 굴절률 분포와 구배형 굴절률 분포 일 때의 반사율을 시뮬레이션을 통하여 비교 및 분석하였다.

2. 반사율 비교

2.1 반사방지막의 구조 및 굴절률 분포

일반적인 기관 위의 코팅구조는 아래의 그림 1과 같이 3개의 영역으로 이루어진다. 영역 1은 공기 이며 굴절률 n_0 이고, 영역 2는 반사방지막으로 굴절률 n_c 이고 단층 또는 다층으로 구성 되고 총 두께가 t 이며, 영역 3은 기관이고 굴절률 n_s 이다. 이때 입사파는 반사방지막 층에 수직으로 입사한다고 가정한다.

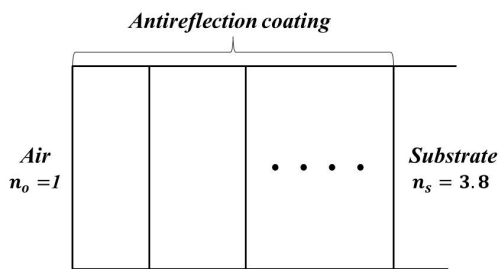


Fig. 1. Schematic of AR coating layer

본 연구에서는 기존의 연구에서 우수한 반사율 특성을 보인 5차 함수 굴절률 분포와 구배형 굴절률 분포에서의 반사율을 분석하고 비교하고자 한다. 기존의 5차 함수 굴절률 분포 $n_5(d)$ 는

$$n_5(d) = n_i + (n_f - n_i)(10d^3 - 15d^4 + 6d^5), \quad 0 \leq d \leq 1 \quad (1)$$

로 주어지고 반사방지막 표면, 즉 $d=0$ 일 때 굴절률 $n_5(0) = n_i = 1.6$ 이고 $d=1$ 일 때 $n_5(1) = n_f = 2.4$ 이다. 즉, n_i 는 첫 번째 층의 굴절률을 나타내고 n_f 는 마지막 층의 굴절률을 나타내므로 각 코팅 층의 굴절률 크기는 기관 쪽으로 갈수록 증가한다고 가정한다.

제안된 구배형 굴절률 분포는 보편적인 구배형 광섬유(graded index optical fiber)의 코어와 클래딩의 굴절률 분포를 따른다. 구배형 광섬유에서 코어와 클래딩 사이의 굴절률 분포의 식은

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

$$n(r) = n_2, \quad r > a \quad (3)$$

으로 주어지고[6] 여기에서 $n(r)$ 은 구배형 광섬유의 굴절률 분포이고, r 은 광섬유의 직경, n_1 은 광섬유 중심축($r=0$)의 굴절률이며, n_2 는 클래딩의 굴절률이다. 또한 a 는 코어의 반경, α 는 굴절률분포변화인자(parameter describing refractive index profile variation) 이고, $\Delta = (n_1^2 - n_2^2)/2n_1^2$ 는 스케일변화인자(parameter describing the scale of the profile change) 이다. 구배형 광섬유 굴절률 분포를 반사방지막 굴절률에 적용하기 위하여 제안된 식은

$$n_{grad}(d) = n_i \sqrt{1 - 2(d)^K \{(n_i^2 - n_f^2)/2n_i^2\}}, \quad 0 \leq d \leq 1 \quad (4)$$

이다. 이때 K 는 굴절률분포 변화인자이고, d 는 $0 \leq d \leq 1$ 의 범위에서 $(m-1) \Delta d$ 값으로 주어지고, $m=1, 2, \dots$ #의 코팅 층수이고, $\Delta d = 1/(\#의 코팅 층수-1)$ 이다. 만약 3층의 구조이면 d 는 0, 0.5, 1의 값을 갖는다. 또한 구배형 굴절률 분포도 5차 함수 굴절률 분포와 마찬가지로 $d=0$ 일 때 $n_{grad}(0) = n_i = 1.6$ 이고, $d=1$ 일 때 $n_{grad}(1) = n_f = 2.4$ 이다.

2층 이상의 구조에서 반사율을 구하기 위해서는 먼저 단층인 경우의 전달 매트릭스 M 을 구해야 한다[7].

$$M = \begin{pmatrix} \cos kn_c t & \frac{i}{n_c} \sin kn_c t \\ i n_c \sin kn_c t & \cos kn_c t \end{pmatrix} \quad (5)$$

여기에서 n_c 는 코팅매질의 굴절률, $k = 2\pi/\lambda$ 이고, λ 는 코팅 매질내의 파장, t 는 코팅의 두께이다. 만약 코팅이 N 개 층인 경우 전달 매트릭스 M_T 는

$$M_T = M_1 M_2 M_3 \cdots M_N = \begin{pmatrix} A & iB \\ iC & D \end{pmatrix} \quad (6)$$

으로 주어지고, $M_1, M_2, M_3 \cdots M_N$ 은 각각의 N 개 코팅 층에 대한 전달 매트릭스이다. 이때 반사율 R [7]은

$$R = \frac{(A - n_s D)^2 + (n_s B - C)^2}{(A + n_s D)^2 + (n_s B + C)^2} \quad (7)$$

로 주어진다.

2.2 9층 반사방지막 구조에서 반사율 비교

반사방지막을 9층의 구조로 구성하고 총 두께는 180 nm 이고, 각층의 두께는 같다고 가정한다. 이때 반사방지막으로 입사하는 파장의 범위는 300 nm ~ 1100 nm 이고 반사방지막이 5차 와 구배형 굴절률 분포일 때의 반사율을 각각 비교하였다. 구배형 굴절률 분포의 반사율을 변화시키기 위하여 굴절률 분포 변화인자 K 의 값을 $0 < K \leq 10$ 범위 내에서 변화시키면서 반사율 특성을 분석 및 조사하였다. 그림 2는 무코팅, 단층, 5차, 구배형 굴절률 분포일 때 반사율을 보여준다. 그림 2에서 단층인 경우는 1개의 층으로 구성되며 총 두께는 180 nm 이고, 구배형 굴절률 분포는 K 의 값이 1.2 일 때를 나타낸다. 각각의 경우 반사율을 비교해보면 무코팅 과 단층의 구조에 비해서 5차 및 구배형 굴절률 분포의 반사율이 적다는 것을 알 수 있다. 또한 K 의 값을 0 에서 1.2 까지 변화를 시켜도 구배형 굴절률 분포의 반사율은 5차 함수 굴절률 분포 보다 커서 반사방지막 특성이 다소 떨어짐을 확인하였다. 따라서 9층 구조에서 5차 함수 굴절률 분포 보다 향상된 반사율 특성의 존재를 확인하기 위하여 K 의 값을 1.2 보다 크게 변화시키면서 반사율 특성을 조사하였다. 그림 3은 K 의 값이 1.7 일 때, 그림 4는 K 의 값이 5 일 때를 나타낸다. 그림 2, 3, 4의 결과를 비교 및 분석해보면 9층 구조에서는 K 의 값을 변화시켜도 5차 함수 굴절률 분포가 구배형 굴절률 분포 보다 500 nm ~ 1100 nm 파장범위에서 더 좋은 반사방지막 특성을 보인다는 것을 알 수 있다. 다만, 9층 구조

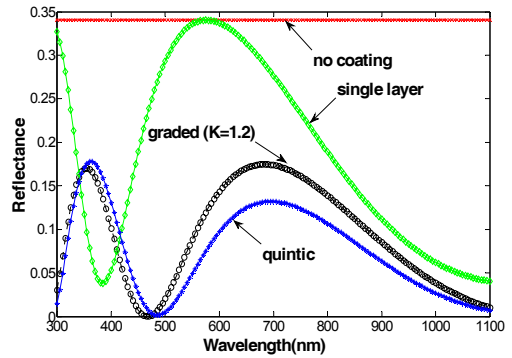


Fig. 2. Reflectance of nine-layer antireflection coating on the substrate (when $K=1.2$)

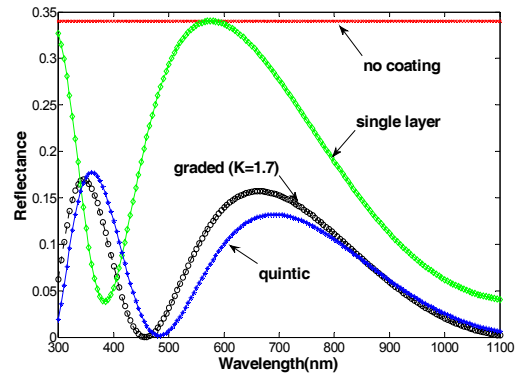


Fig. 3. Reflectance of nine-layer antireflection coating on the substrate (when $K=1.7$)

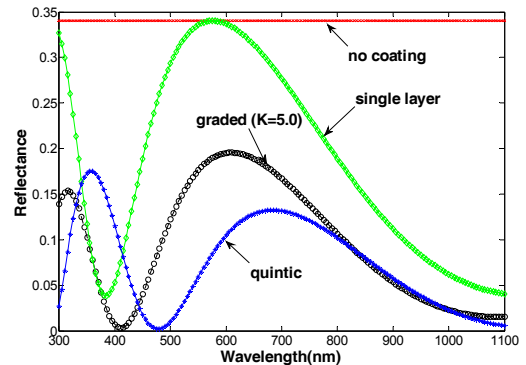


Fig. 4. Reflectance of nine-layer antireflection coating on the substrate (when $K=5.0$)

에서 약 800 nm ~ 1100 nm 파장범위에서는 K 의 값이 1.7 일 때 5차 함수 분포와 거의 비슷한 반사율 특성을 보이나, K 의 값이 1.7 보다 증가하면 그림 4에서 보듯이 500 nm ~ 800 nm 파장범위에서 반사율의 크기가 점차 커지는 현상을 볼 수 있다. 즉, 9층 구조에서 K 의

값이 1.7에 가까워질 때 약 500 nm ~ 1100 nm 파장범위에서 구배형 굴절률 분포의 반사율이 감소하다가 K 의 값을 1.7에서 10까지 변화시키면 구배형 굴절률 분포의 반사율이 점차적으로 커져서 5차 함수 굴절률 분포에 비해서 반사방지막 특성이 나빠지는 것을 확인 할 수 있었다.

2.3 6층 반사방지막 구조에서 반사율 비교

반사방지막을 6층의 구조로 구성하고 앞 절의 9층의 경우와 마찬가지로 총 두께는 180 nm 이고, 각층의 두께는 같다고 가정한다. 구배형 굴절률 분포의 반사율을 변화시키기 위하여 굴절률 분포 변화인자 K 의 값을 $0 < K \leq 10$ 범위 내에서 변화시키면서 반사율 특성을 분석 및 조사하였다. 그림 5는 무코팅, 단층, 5차, 구배형 분포일 때 반사율을 보여준다. 이때 단층인 경우는 1개의 층으로 구성되며 총 두께는 180 nm 이고, 구배형 굴절률 분포는 K 의 값이 1.2 일 때를 나타낸다. 무코팅과 단층의 구조에 비해서 5차 및 구배형 굴절률 분포에서 반사율이 9층의 경우와 마찬가지로 적다는 것을 알 수 있다. 6층 구조에서 5차 함수 굴절률 분포 보다 향상된 반사율 특성의 존재를 확인하기 위하여 K 의 값을 1.2 보다 크게 변화시키면서 반사율 특성을 조사하였다. 그림 6은 K 의 값이 1.7 일 때, 그림 7은 K 의 값이 10 일 때를 나타낸다. 그림 5, 6, 7의 결과를 비교 및 분석해보면 9층의 경우와 마찬가지로 6층 구조에서도 K 의 값을 변화시켜도 5차 함수 굴절률 분포가 구배형 굴절률 분포보다 500 nm ~ 1100 nm 파장범위에서 더 좋은 반사방지막 특성을 보인다는 것을 알 수 있다. 다만, 6층 구조에서는 약 800 nm ~ 1100 nm 파장범위에서는 K 의 값이 1.7 일 때 5차 함수 분포와 거의 비슷한 반사율 특성을 보이나, K 의 값이 1.7 보다 큰 10으로 증가하면 그림 6에서 보듯이 500 nm ~ 800 nm 파장범위에서 반사율의 크기가 점차 커지는 현상을 볼 수 있다. 또한 9층의 경우와 마찬가지로 6층 구조에서 K 의 값이 1.7 보다 커지면 500 nm ~ 1100 nm 파장범위에서 구배형 굴절률 분포가 5차 함수 굴절률 분포의 경우보다 높은 반사율을 보여 반사방지막 특성이 나빠지는 것을 그림 7에서 확인 할 수 있었다. K 의 값이 1.7일 경우 9층과 6층 경우의 5차 함수 및 구배형 굴절률 분포 반사율을 각각 비교해 보면 500 nm ~ 800 nm 범위에서 두 분포 모두 6층의 경우가 9층의 경우 보다 더 낮은 반사율을 보여

반사방지막 특성이 더 우수함을 알 수 있었다. 따라서 반사율 특성을 개선하기 위하여 반사방지막의 층수를 더 줄여서 분석할 필요가 있다고 판단된다.

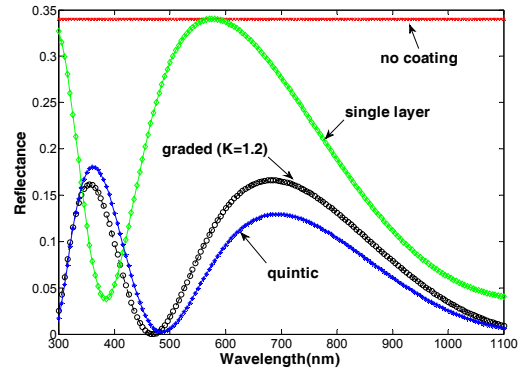


Fig. 5. Reflectance of six-layer antireflection coating on the substrate (when $K=1.2$)

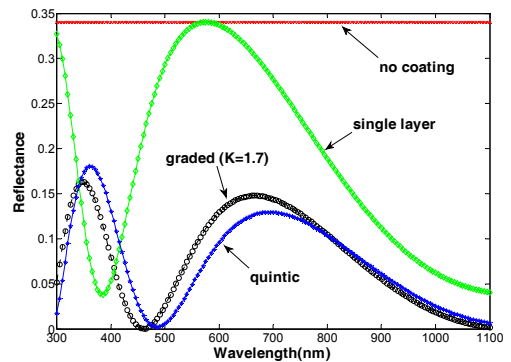


Fig. 6. Reflectance of six-layer antireflection coating on the substrate (when $K=1.7$)

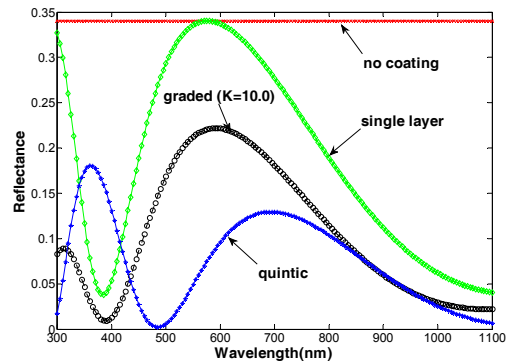


Fig. 7. Reflectance of six-layer antireflection coating on the substrate (when $K=10.0$)

2.4 3층 반사방지막 구조에서 반사를 비교

반사방지막을 3층의 구조로 구성하고 앞 절의 6층의 경우와 마찬가지로 총 두께는 180 nm 이고, 각층의 두께는 같다고 가정한다. 구배형 굴절률 분포의 반사율을 변화시키기 위하여 굴절률 분포 변화인자 K 의 값을 $0 < K \leq 10$ 범위 내에서 변화시키면서 반사율 특성을 분석 및 조사하였다. 그림 8은 무코팅, 단층, 5차, 구배형 분포일 때 반사율을 보여준다. 이때 단층인 경우는 1개의 층으로 구성되며 총 두께는 180 nm 이고, 구배형 굴절률 분포는 K 의 값이 1.2 일 때를 나타낸다. 그림 8에서 무코팅 과 단층의 구조에 비해서 5차 및 구배형 굴절률 분포의 반사율이 6층의 경우와 마찬가지로 적다는 것을 알 수 있다. 또한 K 의 값이 1.2 일 때 5차 함수 굴절률 분포와 구배형 굴절률 분포의 경우의 반사율이 거의 일치하는 흥미로운 결과를 확인하였다. 그리고 K 의 값을 1.7 으로 증가시키면 그림 9에서 보듯이 본 연구에서 제안하는 구배형 굴절률 분포의 반사율이 약 600 nm ~ 1100 nm 에서 기존의 5차 함수 굴절률 분포의 반사율 보다 낮은 반사율을 보인다는 사실을 확인하였다. 그림 10은 K 의 값이 5 일 때, 그림 11은 K 의 값이 10일 때를 나타낸다. 그림 10과 11에서 얻은 중요한 결과는 K 의 값이 5에서 10으로 증가하면 약 600 nm ~ 1100 nm 에서 더 낮은 반사율을 보이나, K 의 값을 10 이상으로 증가시켜도 더 이상 반사율이 낮아지지 않고 오히려 300 nm ~ 500 nm 파장대의 반사율이 커진다는 사실을 확인하였다. 즉, 3층 구조에서는 K 의 값이 1.2 에서 5 사이에서는 가시광선과 근적외선 영역(약 600 nm ~ 1100 nm) 에서 5차 함수 굴절률 분포인 경우보다 구배형 굴절률 분포가 더 낮은 반사율을 보였다. 그리고 K 의 값을 5 이상 10 까지 증가시켜도 가시광선(적색)과 근적외선 영역에서의 반사율 특성은 거의 변화하지 않고 오히려 300 nm ~ 500 nm 파장대의 반사율이 커져서 반사방지막의 성능이 떨어진다는 것을 알 수 있었다.

약 600 nm ~ 1100 nm 에서 우수한 반사방지특성을 보이는 구배형 굴절률 분포는 3층 구조에서 $K=1.7$ 일 때 굴절률 값이 각각 1.6, 1.8828, 2.4 이다. 이러한 값들은 코팅 매질의 굴절률 값 차이를 최소 약 0.04 까지 제어 할 수 있는 원자층증착법(atomic layer deposition) 을 이용하면 구현이 가능하다고 판단된다[7].

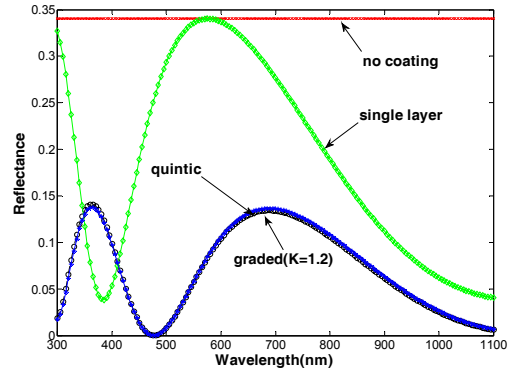


Fig. 8. Reflectance of three-layer antireflection coating on the substrate(when $K=1.2$)

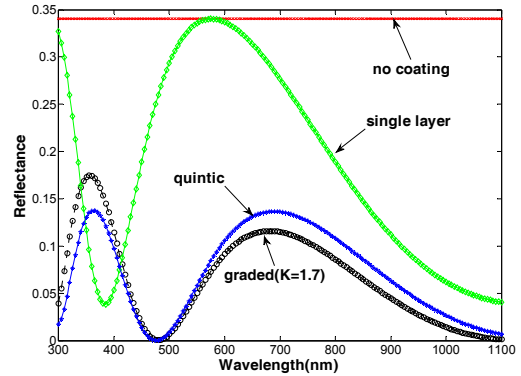


Fig. 9. Reflectance of three-layer antireflection coating on the substrate(when $K=1.7$)

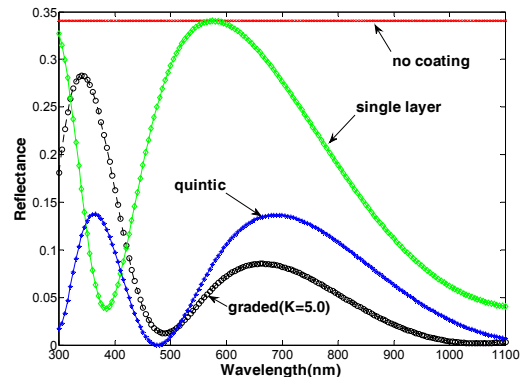


Fig. 10. Reflectance of three-layer antireflection coating on the substrate(when $K=5.0$)

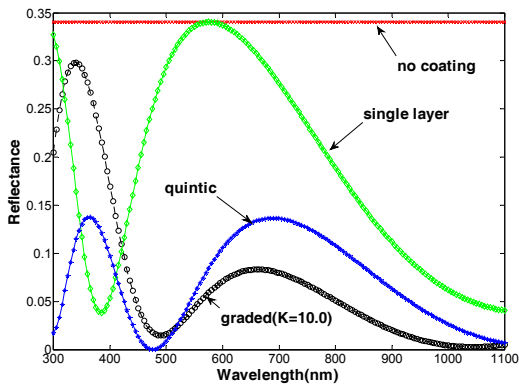


Fig. 11. Reflectance of three-layer antireflection coating on the substrate(when K=10.0)

3. 결론

우수한 반사방지막을 얻기 위하여 다양한 기술이 제안되고 있는데 실례로서 빛의 분산효과를 주기 위하여 코팅의 외형적인 모양을 변형시키거나, 코팅 층의 굴절률을 제어하는 방법 등이 적용되고 있다. 본 논문에서는 코팅 층의 굴절률을 제어하기 위한 방법 중 구배형 광섬유를 응용한 구배형 굴절률 분포를 제안하였고, 3, 6, 9층의 다층의 구조에서 기존의 우수한 특성을 갖는 5차 함수 굴절률 분포 경우와 반사율을 비교 및 분석하였다. 그 결과로서 제안하는 구배형 굴절률 분포가 3층의 구조에서 기존의 5차 함수 굴절률 분포보다 약 600 nm ~ 1100 nm 에서 더 낮은 반사율을 보이는 결과를 얻었다. 따라서 향후 이 결과는 가시광선(적색)과 근적외선 영역에서 사용되는 광소자 및 광 필터에 적용 가능하리라 판단된다.

References

[1] M. Beye, A. S. Maiga, F. Ndiaye, "The Effect of the SiN Optical Constants on the Performances of a New Antireflection Coating Concept", 2013 IEEE Conference on Clean Energy and Technology(CEAT), pp. 373-378, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.1109/CEAT.2013.6775659>

[2] J. Q. Xi, Jong Kyu Kim, E. F. Schubert, Dexian Ye, T. M. Lu, and Sha-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,

Mar. 2006.
DOI: <https://doi.org/10.1364/OL.31.000601>

[3] 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.
DOI: <https://doi.org/10.1364/OL.8.000584>

[4] W.H. Southwell, "Gradient-index Antireflection Coatings", Optics Letters, vol. 8, no. 11, Nov. 1983.
DOI: <https://doi.org/10.1364/OL.8.000584>

[5] C. B. Kim, "The Study on the Antireflection Coating Design Scheme According to the Index Profile in the Thin-Film Silicon Solar Cell", Journal of The Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol. 13, no. 9, pp. 4139-4145, Sep. 2012.
DOI: <http://doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.9.4139>

[6] Joseph C. Palais, "Fiber Optic Communications", pp. 125-126, Prentice Hall, 5th edition, 2002.

[7] 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.
DOI: <https://doi.org/10.1143/JJAP.47.6934>

김 창 봉(Chang-Bong Kim)

[정회원]



- 1988년 6월 : Florida Institute of Technology 전기전자공학 (공학석사)
- 1992년 5월 : Texas A&M Univ. 전기전자공학 (공학박사)
- 2000년 9월 ~ 현재 : 국제전기전자 공학회(IEEE)Senior member
- 1993년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 전파전공 정교수

<관심분야>

광소자, 광센서, 태양전지 반사막 설계기술