

구배형 및 5차 함수 굴절률 분포의 반사방지막 구현과 비교

김 창 봉*

Realization and Comparison of the Antireflection(AR) Coating in Graded and Quintic Index Profile

Chang-Bong Kim*

요 약

본 논문에서는 제안하는 구배형과 기존의 5차 함수 굴절률 분포의 반사방지막의 반사율을 조사하였다. 이를 위하여 구배형 및 5차함수 굴절률 분포를 갖는 3층 구조의 서로 다른 매질로 이루어진 반사방지막을 원자층증착법(Atomic layer deposition)을 사용하여 구현하였다. 구현된 5차 함수와 구배형 굴절률 분포의 반사방지막의 반사율을 측정하고 결과를 비교하였다. 그 결과로서 시뮬레이션에서 얻은 앞선 결과와 동일하게 약 600 nm ~ 1100 nm 범위에서 구배형이 5차 함수 보다 더 낮은 반사율을 보였다. 향후 이 결과는 약 600 nm ~ 1100 nm 영역에 사용되는 광소자 및 광필터 등에 적용되는 반사방지막 기술에 응용 가능하리라 판단된다.

Abstract

We investigated the reflectance of antireflection (AR) coating with quintic and proposed graded index profile. The antireflection coating consisting of 3 layers with 3 different materials is realized by using atomic layer deposition (ALD) for investigation. We measured and compared the reflectance of each index profile case. As the results the suggested graded index profile shows the lower reflectance than quintic index profile case about from 600 nm to 1100 nm wavelength range, same as we obtained from earlier simulation results. We hope that those results could be used for the antireflection coating applying for optical devices and optical filters, etc about from 600 nm to 1100 nm wavelength range.

Keywords

antireflection coating, graded index profile, atomic layer deposition, reflectance

* 공주대학교 공과대학 스마트정보기술공학 교수
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7495-4574>

• Received: Sep. 23, 2021, Revised: Oct. 15, 2021, Accepted: Oct. 18, 2021
• Corresponding Author: Chang-Bong Kim
Dept. of Smart Information Technology Engineering, Cheonan-si, Chungnam 31080, Korea,
Tel.: +82-41-521-9193, Email: aggie@kongju.ac.kr

1. 서 론

광소자 및 태양광 전지 등의 광전소자에서의 우수한 반사방지막(Antireflection(AR) coating) 성능은 대단히 중요하게 평가되고 또한 관련하여 많은 연구가 진행되고 발표되고 있다.

반사방지막을 구현하기 위하여 단층(Single layer) 또는 다층의 구조가 제안되고 층을 만드는 재질의 굴절률 또한 중요한 요인이 되고 있다.

우수한 반사방지막의 성능은 원하는 파장대에서의 낮은 반사율 또는 높은 투과율을 얻는 것이 중요하고 또는 소자의 특성에 따라 보다 넓은 파장 범위에서 낮은 반사율을 얻는 등의 특성도 중요하다.

반사방지막의 성능을 높이기 위하여 여러 가지 방법이 발표되고 있다. 실례로서 태양전지 입사층에 나노격자 구조의 반사방지막을 만들어 반사율을 낮추어 입사하는 빛의 흡수율을 높여서 즉, 반사율을 낮추어서 광전효율을 높이는 연구가[1][2] 있었고 최근에는 실리콘 나노 입자를 합성 폴리머 물질에 섞어서 입사 빛의 흡수율을 높이는 방식의 반사방지막 기술을[3] 구현하였다. 그리고, 다층구조를 갖는 반사방지막을 태양광전지에 적용하여 태양광전지의 효율을 높이는 연구도[4] 있었다. 또 다른 방법으로는 코팅 층의 매질을 다양하게 구성하여 코팅 층의 굴절률 값을 조절하여 반사율을 변화시키는 방법도 오래전부터 제안되고 있다[5].

코팅 층의 굴절률을 조절하기 위해서 1, 3, 5차 함수(Quintic)의 분포를 만들어서 반사율을 제어하였는데 제안된 굴절률 분포 중 5차 함수가 1차 및 3차 함수에 비해서 우수한 반사특성을 보였다[6]. 5차 함수 굴절률 분포와 다른 구배형(Graded) 굴절률 분포가 고려되었고 시뮬레이션에서 구배형 굴절률 분포가 특정 파장 범위에서 5차 함수 굴절률 분포와 비교할 때 더 적은 반사율을 보이는 연구결과가 있었다[7]. 이 결과에서 코팅 층이 단층인 경우 보다 2층 이상의 다층의 구조가 더 넓은 파장범위에서 더 낮은 반사율을 나타내는 우수한 반사방지막 특성을 보였다. 다층의 구조에서 구배형 굴절률과 5차 함수 굴절률 분포의 반사율 비교에 대한 시뮬레이션 연구에서 3층 구조에서 약 600nm ~ 1100nm

파장범위에서 제안하는 구배형 굴절률 분포가 더욱 낮은 반사율을 보였다. 또한 이러한 이론적인 결과는 코팅재질의 굴절률 값을 정밀하게 제어 할 수 있는 원자층증착법(ALD)[8]을 이용하면 구현이 가능하다고 제안하였다.

본 논문에서는 원자층증착법을 이용하여 3층 구조의 코팅 층을 구배형 및 5차 함수 굴절률 분포를 갖도록 구현하고 각각의 경우의 반사율을 측정하여 이론적인 결과와 비교하였다.

II. 반사율 시뮬레이션

2.1 반사방지막의 구조 및 굴절률 분포

그림 1은 전형적인 기판 위의 코팅구조를 보여주는데 그 구조를 단순화하면 크게 세 영역으로 분리된다. 영역 1은 공기 이며 굴절률 n_0 이고, 영역 2는 반사방지막으로 굴절률 n_c 이고 단층 또는 다층으로 구성 되고, 영역 3은 기판이고 굴절률 n_s 이다. 이때 입사파는 반사방지막 층에 수직으로 입사한다고 가정한다. 이때 반사방지막의 첫 번째 층의 굴절률은 n_i 이고 마지막 층의 굴절률은 n_f 라고 가정한다.

본 연구에서는 그림 1에서 반사방지막 코팅 층의 굴절률 n_c 가 기존의 논문에서 반사율이 낮은 특성을 보인 5차 함수 굴절률 분포와 구배형 굴절률 분포의 코팅매질을 구현하고 반사율을 분석하고 서로 비교하고자 한다.

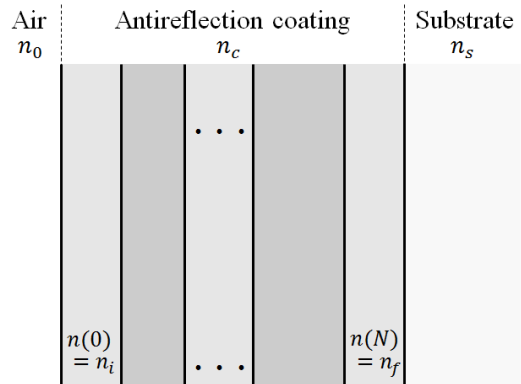


그림 1. 반사방지막 구성도
Fig. 1. Antireflection coating layer

기존의 5차 함수 굴절률 분포[6] $n_Q(d)$ 는

$$n_Q(d) = n_i + (n_f - n_i)(10d^3 - 15d^4 + 6d^5) \quad (1)$$

$$0 \leq d \leq 1$$

로 주어지고 d 는 코팅의 층수에 따라 결정되는 상수로서, $0 \leq d \leq 1$ 의 범위에서 3층의 구조이면 d 는 0, 0.5, 그리고 1의 값을 갖는다. 반사방지막 표면, 즉 $d=0$ 일 때 굴절률 $n_Q(0) = n_i = 1.6$ 이고 $d=1$ 일 때 $n_Q(1) = n_f = 2.4$ 이다. 즉, n_i 는 처음 층의 굴절률을 의미하고 n_f 는 맨 끝 층의 굴절률이라고 정의한다. 그리고 다층구조에서 코팅 매질의 굴절률 값은 기관 쪽으로 향할수록 커진다고 가정한다.

제안하는 구배형 굴절률 분포는 일반적인 GRIN (Graded Index) 광섬유의 코어-클래딩 굴절률 분포를 이용한다. GRIN 광섬유의 굴절률은

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

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

으로 정의되고[9] 이 식에서 $n(r)$ 은 GRIN 광섬유의 굴절률, r 은 광섬유 직경 크기, n_1 은 광섬유 중심축(즉, $r=0$)에서의 굴절률 값이며, n_2 는 클래딩의 굴절률 값이다. 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 스케일 변화인자(Parameter describing the scale of the profile change) 이다. 위의 정의 식을 응용한 제안하는 구배형 굴절률 분포 $n_G(d)$ 는

$$n_G(d) = n_i \sqrt{1 - 2(d)^K \left\{ (n_i^2 - n_f^2)/2n_i^2 \right\}}, \quad (4)$$

$$0 \leq d \leq 1$$

이다. 이때 K 는 굴절률분포변화인자이고, 본 연구에서는 앞에 정의한 5차함수와 같은 방식으로 구배형 분포에서도 $d=0$ 일 때 $n_G(0) = n_i = 1.6$ 이고, $d=1$ 일 때 $n_G(1) = n_f = 2.4$ 라고 가정한다.

2.2 전달 매트릭스

코팅의 반사율을 구하기 위한 전달 매트릭스 (Transfer matrix)의 이론은 널리 알려진 이론으로서 [10] 코팅 층의 두 경계면에서의 경계조건을 고려한 전계와 자계의 크기를 각각 E_a, E_b , 그리고 B_a, B_b 라고 하면 아래의 매트릭스 형태

$$\begin{bmatrix} E_a \\ B_a \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} E_b \\ B_b \end{bmatrix} \quad (5)$$

로 정리되고

$$M = \begin{pmatrix} \cos k_0 n_c t & \frac{i}{n_c} \sin k_0 n_c t \\ i n_c \sin k_0 n_c t & \cos k_0 n_c t \end{pmatrix} \quad (6)$$

으로 주어지며 이를 전달 매트릭스라고 정의한다. 여기에서 t 는 코팅 층의 두께, k_0 는 진공에서의 전파상수, n_c 는 코팅 층의 굴절률이다. 만약 코팅 층의 굴절률 n_c 가 5차 함수 굴절률 분포를 갖는다면 식 (1)의 n_Q 가 되고, 구배형 굴절률 분포를 갖는다면 식 (4)의 n_G 가 된다. 또한 코팅이 N 개 층인 경우 전달 매트릭스 M_T 는

$$M_T = M_1 M_2 M_3 \cdots M_N = \begin{pmatrix} A & iB \\ iC & D \end{pmatrix} \quad (7)$$

으로 주어지고, $M_1, M_2, M_3 \cdots, M_N$ 은 코팅 층수가 N 개일 때 각 층에 대한 전달 매트릭스를 나타낸다. 이때 반사율 R [8]은

$$R = \frac{(A - n_s D)^2 + (n_s B - C)^2}{(A + n_s D)^2 + (n_s B + C)^2} \quad (8)$$

로 주어진다. 여기에서 식(7)과 (8)에서 A, B, C , 그리고 D 는 전달 매트릭스의 성분(Element)을 나타낸다. n_s 는 기관의 굴절률로서 실리콘 재질이며 굴절률 값은 3.8이라고 가정한다.

2.3 기존 시뮬레이션 결과

앞선 연구결과[7]에서 다층 구조에서 제안하는 구배형 분포와 기존연구에서 우수한 반사방지막 특성을 나타낸 5차 함수 분포의 반사율을 시뮬레이션을 통하여 비교하고 분석하였다. 그 결과로서 3층 구조에서 제안하는 구배형 분포($K=1.7$ 일 때)가 5차 함수 분포보다 약 600nm ~1100nm 파장대에서 반사율이 더 적다는 것을 그림 2에서 보여준다. 또한 반사방지막 코팅이 없는 경우(No coating)와 단층인 경우의 반사율도 같이 비교하여 보여주었다.

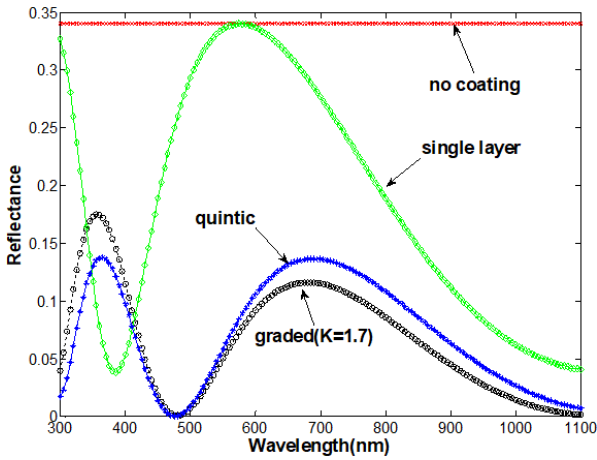


그림 2. 무코팅, 단층 및 3층 반사방지막 구조에서 반사율 비교[7]

Fig. 2. Comparing of reflectance of no, single, and three layer antireflection coating on the substrate

III. 구배형 및 5차 함수 분포 반사방지막 구현

구배형 굴절률 분포(3층 구조에서 $K=1.7$ 일 때)의 굴절률 값은 식 (1) 과 (4)에 의하여 1.6, 1.89, 2.4 이고, 5차 함수 분포는 1.6, 2.0, 2.4 이다. 이러한 굴절률 분포를 갖는 코팅매질을 원자층증착법을 이용하여 구현 하였다. 표 1에 구배형 및 5차 함수 분포의 굴절률 값을 요약하였고, 3층 구조의 구배형 및 5차 함수 분포를 갖는 코팅 층의 두께 및 굴절률 값은 그림 3에 나타냈다. 원자층증착법을 이용하여 3층 구조의 5차 함수 굴절률 분포를 만들기 위하여 사용된 코팅 매질의 종류 및 두께, 증착방법 및 환경 등에 대한 내용은 표 2에 구배형 굴절률 분포에 대한 내용은 표 3에 요약하였다.

표 1. 3층 구조 반사방지막의 구배형 및 5차 함수 굴절률
Table 1. Index of refraction in graded and quintic with three-layer AR coating

# of layers	Refractive index	
	Graded	Quintic
1	1.60	1.60
2	1.89	2.00
3	2.40	2.40

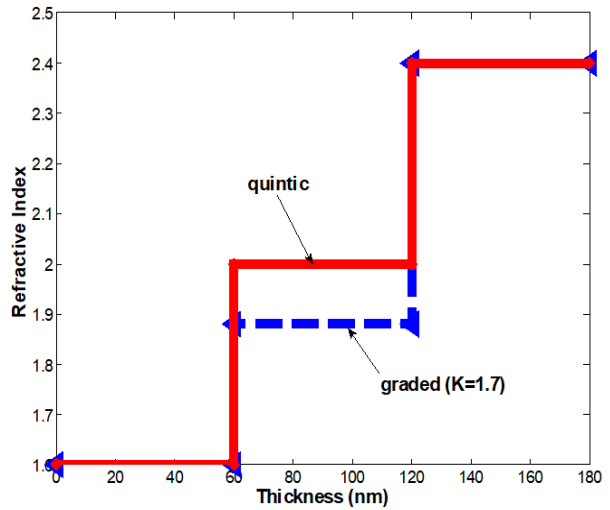


그림 3. 5차 및 구배형 분포의 3층 반사방지막 두께 및 굴절률

Fig. 3. Thickness and index of refraction in three-layer antireflection coating on the substrate with graded (when $K=1.7$) and quintic index profile

표 2. 5차 함수 굴절률분포의 반사방지막 코팅

Table 2. AR coating of quintic index profile

Refractive index	Coating material	Thickness [um]	Deposition	Deposition temperature [°C]	Deposition time [hrs]
1.6	Al ₂ O ₃	60	ALD	150	3.5
2.0	ZnO	60	ALD	200	2.16
2.4	TiO ₂	60	ALD	150	4.5

표 3. 구배형 굴절률분포의 반사방지막 코팅

Table 3. AR coating of graded index profile

Refractive index	Coating material	Thickness [um]	Deposition	Deposition temperature [°C]	Deposition time [hrs]
1.6	Al ₂ O ₃	60	ALD	150	3.5
1.89	GZO	60	RFMS	24	0.0208
2.4	TiO ₂	60	ALD	150	4.5

*RFMS : RF-magnetron sputter

IV. 측정 결과

원자층증착법을 이용하여 3층 구조의 5차 함수와 구배형 굴절률 분포의 반사방지막을 구현 한 후 각각의 경우 반사율을 측정하고 시뮬레이션 계산 값과 비교하였다. 그림 4는 5차 함수 굴절률 분포일 때의 반사율을 측정값과 계산값을 비교한 것을 보여준다. 500nm 이상에서는 두 값의 결과가 비슷하나, 500nm 이하에서는 차이를 보이는 결과가 나왔다. 마찬가지로 그림 5도 비슷한 결과를 보인다.

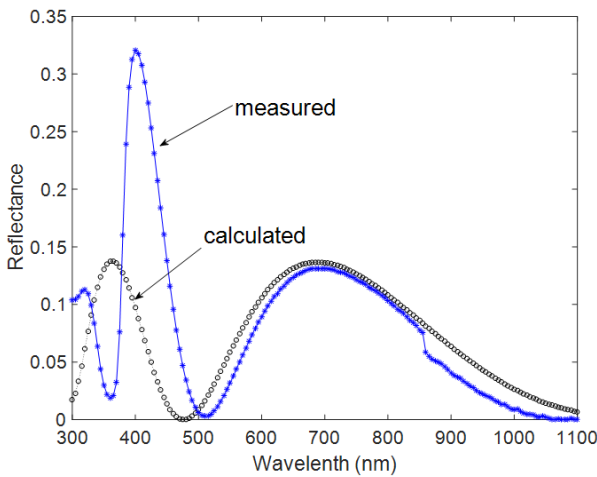


그림 4. 3층 반사방지막 구조에서 5차 함수 분포 일 때 반사율의 측정값과 계산값

Fig. 4. Measured and calculated reflectance of three-layer AR coating on the substrate with quintic index profile

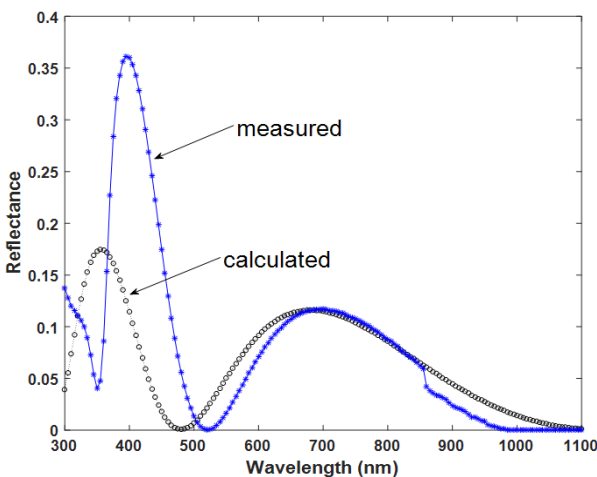


그림 5. 3층 반사방지막 구조에서 구배형(K=1.7) 분포 일 때 반사율의 측정값과 계산값

Fig. 5. Measured and calculated reflectance of three-layer AR coating on the substrate with graded index profile(when K=1.7)

그림 6은 본 연구의 중요한 결과인 5차 함수와 제안하는 구배형 굴절률 분포의 반사율 측정값을 보여준다. 즉, 약 600nm ~ 1100nm 파장대에서 구배형이 5차 함수보다 더 낮은 반사율을 보였던 시뮬레이션 결과와 같음을 알 수 있다. 이와 같이 낮은 반사율의 원인으로는 구배형 굴절률 분포를 갖는 GRIN 광섬유와 예를 들어 단위계단형 굴절률 분포의 광섬유의 빛의 경로 특성을 비교할때 GRIN 광섬유의 경우 코어 내의 빛의 경로가 보다 완만하게 변화하는 반사특성을 갖기 때문이라고 판단된다.

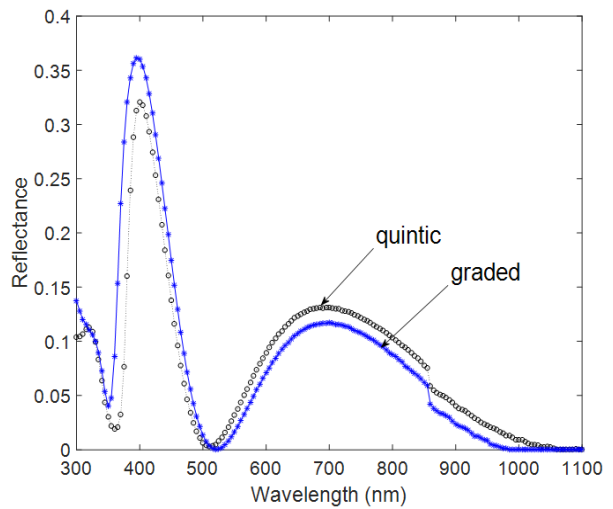


그림 6. 3층 반사방지막 구조에서 5차 함수와 구배형 분포일 때 반사율 측정값 비교

Fig. 6. Measured reflectance of three-layer AR coating on the substrate with quintic and graded index profile

V. 결론 및 향후 과제

본 연구에서는 원자층증착법을 이용하여 3층 구조의 5차 함수와 구배형 굴절률 분포의 반사방지막을 구현하였다. 구현된 반사방지막의 반사율을 측정하여 기존의 수행되었던 시뮬레이션 결과와 비교 및 분석하였다. 시뮬레이션 및 측정된 반사율 값이 약 500nm 에서 1100nm 범위에서는 비슷했으나, 500 nm 이하에서는 다소 차이를 보였다. 본 연구의 중요한 결과로서 약 600 nm ~ 1100 nm 파장대에서 제안하는 구배형 굴절률 분포가 기존의 5차 함수 굴절률 분포 보다 더 낮은 반사율을 보인다는 선행 시뮬레이션 연구 결과를 재확인 할 수 있었다.

따라서 이번 결과는 제안하는 구배형 굴절률 분포를 가시광선(적색)과 근적외선 영역에서 사용되는 광소자 및 광필터 등에 사용되는 반사방지막 코팅에 적용하여 응용 가능하리라 판단된다. 또한 향후 과제로는 구배형 굴절률 분포에서 코팅의 층수, 두께, 굴절률분포변화인자에 따른 반사율을 조사하고 최적의 조건을 도출하여 원하는 파장대에서 보다 낮은 반사율을 얻는 연구가 필요하다고 판단된다.

References

- [1] N. Shelat, N. Das, M. M. K. Khan, and S. Islam, "Nano-structured Photovoltaic Cell Design for High Conversion Efficiency by Optimizing Various Parameters", 2019 29th Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Nadi, Fiji, pp. 1-6, Nov. 2019. <https://doi.org/10.1109/AUPEC48547.2019.211859>.
- [2] N. Das, K. Charoenpitaks, and S. Islam, "Analysis of incident light angles on nano-grating structure for minimizing reflection losses in GaAs solar cells", 2013 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Hobart, TAS, Australia, pp. 1-6, Oct. 2013. <https://doi.org/10.1109/AUPEC.2013.6725384>.
- [3] J. Soeda, Y. Kawada, H. satozono, H. Takahashi, M. Chokai, and Y. Ikeda, "Broadband Anti-Reflection coating for THz waves developed with Si nanoparticle-polymer composite material", 2020 45th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), Buffalo, NY, USA, pp. 212, Nov. 2020. <https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz46771.2020.9370466>.
- [4] M. S. Sarker, M. F. Khatun, S. R. A. Ahmed, and J. Hossain, "Optimization of multilayer antireflection coatings for improving performance of silicon solar cells", International Conference on Computer, Communication, Chemical, Materials and Electronic Engineering(IC4ME2), Rajshahi, Bangladesh, pp. 1-4, Jul. 2019. <https://doi.org/10.1109/IC4ME247184.2019.9036677>.
- [5] 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. <https://doi.org/10.1364/OL.33.002527>.
- [6] W. H. Southwell, "Gradient-index Antireflection Coatings", Optics Letters, Vol. 8, No. 11, pp. 584-586, Nov. 1983. <https://doi.org/10.1364/OL.8.000584>.
- [7] C. B. Kim, "The Study on the Graded Index Antireflection(AR) Coating", Journal of The Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 18, No. 5, pp. 565-570, May 2017. <https://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.5.565>.
- [8] J. W. Lim, S. J. Yun, and 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.
- [9] Joseph C. Palais, "Fiber Optic Communications", Prentice Hall, 5th edition, pp. 125-126, May 2002.
- [10] F. L. Pedrotti and L. S. Pedrotti, "Introduction to Optics", Prentice Hall, pp. 455-467, Feb. 1987.

저자소개

김 창 봉 (Chang-Bong Kim)



1988년 6월 : Florida Institute of Technology 대학교
전기전자공학과(공학석사)

1992년 5월 : Texas A&M 대학교
전기전자공학과(공학박사)

2000년 9월 ~ 현재 : IEEE Senior Member

1993년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 스마트정보기술공학과 교수

관심분야 : AR 코팅, 광소자 해석