

시뮬레이션을 이용한 고효율 분산 브래그 반사경 최적화 설계 및 특성

Design Optimization for High Efficiency Distributed Bragg Reflectors through Simulation Methodology

김 관 도*★

Kwan-Do Kim*★

Abstract

This study focused on the development of simulation methodology and design optimization for the DBR(Distributed Bragg Reflectors) structures, which are commonly used in manufacturing optical films and the key components of LED chip and LCD inspection equipments. From the multi-layer simulation, the following results are obtained. First, the wavelength(nm) vs. reflectance(%) can be calculated in the DBR structures that TiO₂ and SiO₂ thin films are stacked alternately. As a results, it is suggested that highly efficient DBR structures can be designed and manufactured using simulation methodology.

요 약

본 연구에서는 LED칩 및 LCD 검사장비의 핵심부품인 광학 필름제조에 많이 사용되고 있는 DBR(Distributed Bragg Reflectors) 구조에 대한 시뮬레이션 방법을 개발하고 이러한 다층박막 특성 시뮬레이션을 통하여 최적의 DBR 구조를 제시하였다. 고굴절률 유전체인 TiO₂와 저굴절률 유전체인 SiO₂ 박막을 교대로 적층한 다층박막 구조에서 TiO₂와 SiO₂의 refractive index 값을 사용하여 박막의 배치 및 조합에 따른 wavelength(nm) vs. reflectance(%) 스펙트럼을 계산하였고 이 결과로 시뮬레이션을 통한 고효율 분산 브래그 반사경 최적화 설계 및 공정에 활용하여 DBR 구조 제작에 사용할 수 있었다.

Key words : DBR, Refractive index, Simulation, Transmittance, Reflectance

1. 서론

DBR(Distributed Bragg Reflectors)은 5~50 주기의 다른 굴절률을 가지는 두 개의 물질로 구성된 다층 반사경이다. 굴절률의 차이에 기인하여 각각의 계면에서 프레넬(Fresnel) 반사가 발생하게 되는데 두 개 물질의 굴절률 차이는 작아서 한 계면에서의 프레넬 정도는 매우 작다. 그러나

수많은 DBR 구조는 많은 계면들로 구성되고 반사된 모든 빛이 보강간섭을 할 수 있도록 두 물질의 두께를 선택한다. 이러한 조건은 수직 입사에 대해 두 개 물질의 두께가 빛의 1/4 파장일 때 만족됨을 알 수 있다. 수직입사의 경우 식(1)과 같다.

$$T_{l,h} = \lambda_{l,h} / 4 = \lambda_0 / 4n_{l,h} \quad (1)$$

* Dept. of Convergence Software, Pyeongtaek University,

★ Corresponding author

E-mail:kdkim@ptu.ac.kr, Tel:+82-31-659-8369

Manuscript received Mar. 4, 2018; revised Mar.14, 2018 ; accepted Mar.19, 2018

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

여기서 λ_{lh} 는 빛의 진공 브래그 파장, T_{lh} 는 저굴절률(l, low-index)와 고굴절률(h, high-index) 물질의 두께, n_{lh} 는 저굴절률과 고굴절률 물질의 굴절률이다. 저굴절률과 고굴절률이 주기적으로 쌓여진 다층박막구조에서 높은 반사율을 얻기 위해 각 층의 두께가 파장의 1/4이 되고 굴절률이 크고 작은 n_H 와 n_L 을 교대로 사용한다[1].

II. 시뮬레이션 방법

비전도성 다층박막의 함수원리는 여러 개의 절연체 바탕 면에 의해 반사될 때 나타나는 다양한 간섭효과에 의해 나오게 된다. 비전도성 다층박막의 수학적 원리는 광선이 여러 절연체 바탕에 의해 반사될 때 나타나는 다양한 간섭효과에 기인함을 알 수 있다. 대표적 특징은 단일박막과 다층박막을 비교하여 그림 1에서 보여주고 있다. 입사된 빛은 굴절률이 각기 다른 소재의 두 바탕 면에 반사된 광선 사이에서 반사된다.

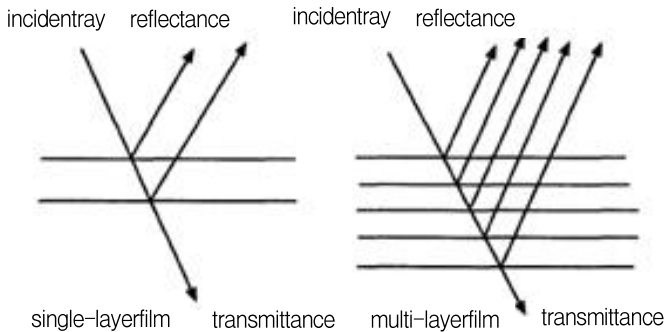


Fig. 1. The reflectance and transmittance in single- and multi-layer films.

그림 1 단일박막 및 다층박막에서의 반사 및 투과

단일박막에서 반사된 빛은 공기층과 기저층의 표면에서 반사된 두 빛의 간섭의 결과이고, 다층 필름에 대한 반사된 빛은 각각의 여러 바탕 면에서 반사된 여러 빛들이 간섭 결과이다. 다층 필름 층의 다른 접촉면에서 반사, 투과되는 빛의 간섭을 묘사하기 위해서 특성 매트릭스로 계산하기 위해 그림 2와 같은 구조를 예로 들면 다음과 같다.

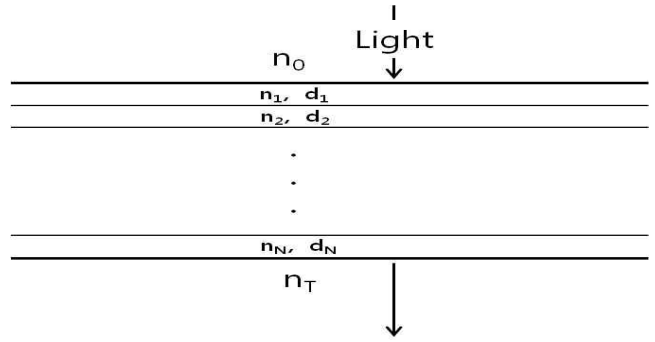


Fig. 2. The calculation of reflectance and transmittance in the multi-layer film of refractive index n_i , thickness d_i .

그림 2 굴절률 n_i , 두께 d_i 인 다층 박막 구조에서의 반사율과 투과율 계산

굴절률 n_i , 두께 d_i 인 유전체의 특성 매트릭스 M_i 는 식(2)와 같다.

$$M_i = \begin{bmatrix} \cos \frac{2\pi n_i}{\lambda} d_i & -\frac{i}{n_i} \sin \frac{2\pi n_i}{\lambda} d_i \\ -i n_i \sin \frac{2\pi n_i}{\lambda} d_i & \cos \frac{2\pi n_i}{\lambda} d_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

N개의 유전체 박막을 가지는 다층박막의 특성 매트릭스는 식(3)과 같다.

$$M = M_1 M_2 M_3 \cdots M_N = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\text{반사율}(R) = \left| \frac{A n_0 + B n_T n_0 - C - D n_T}{A n_0 + B n_T n_0 + C + D n_T} \right|^2 \quad (4)$$

$$\text{투과율}(T) = \left| \frac{2 n_0}{A n_0 + B n_T n_0 + C + D n_T} \right|^2 \quad (5)$$

와 같이 계산되어 식(4)와 식(5)에 의해 반사율(R)과 투과율(T) 값을 얻을 수 있다[2-5].

III. 분산 브래그 반사경 최적화 설계를 위한 시뮬레이션 및 특성분석

유전체 박막을 교대로 적층하여 DBR 구조를 제작할 수 있었으며 이 때 입력 조건으로 저굴절률(n_L) 및 고굴절률(n_H) 박막의 refractive index 값, 각 층 pair의 종류 및 갯수, 각 층의 두께에 대한 정보가 포함되어 들어가게 된다. 입사광의 파장에 대한 반사율(R) 값과 투과율(T) 값의 계산이 가능하며 본 시뮬레이션에서는 반사율이 시뮬레이션을 통해 계산되면 $R+T=100\%$ 의 관계로

부터 투과율은 자동적으로 구할 수가 있다. 입사광의 파장은 $\lambda=300\sim 600\text{nm}$ 에서 1nm 간격으로 각 파장대에서 시뮬레이션을 진행하여 wavelength(nm) vs. reflectance(%) 스펙트럼 및 wavelength(nm) vs. transmittance(%) 스펙트럼 결과를 얻을 수 있었다.

DBR 구조 제작 시 외부 surrounding은 공기의 굴절률인 $n=1$ 의 값을 사용하였고 저굴절률과 고굴절률이 주기적으로 쌓여진 다층 유전체 박막구조에서 높은 반사율을 얻기 위해 각 층의 두께가 파장의 1/4이 되고 굴절률이 상대적으로 크고 작은 즉, 고굴절률 (n_H)와 저굴절률(n_L) 유전체를 교대로 증착하여 DBR 구조 제작 및 시뮬레이션을 진행하였으며 빛이 보장 간섭할 수 있도록 수직 입사에 대해 두 물질의 두께가 빛의 1/4 파장일 때 만족되는 두 물질의 두께를 선택하였다.

그림 3은 $\lambda=300\text{nm}$ 파장대에서 반사율이 peak치를 갖도록 상부에 TiO_2 29nm, 하부에 SiO_2 51 nm 두께를 적층하여 1 pair에서부터 5 pair까지 갯수를 증가시키며 시뮬레이션한 결과이다. 그림 4와 같이 pair의 갯수가 증가할수록 reflectance 값이 커지는 것을 알 수 있으며 5 pair를 적층하였을 때 실제 실험 조건에서와 같이 박막 층의 갯수를 최소화하면서 효율이 좋은 DBR 구조 제작 조건으로 사용할 수 있음을 알 수 있다.

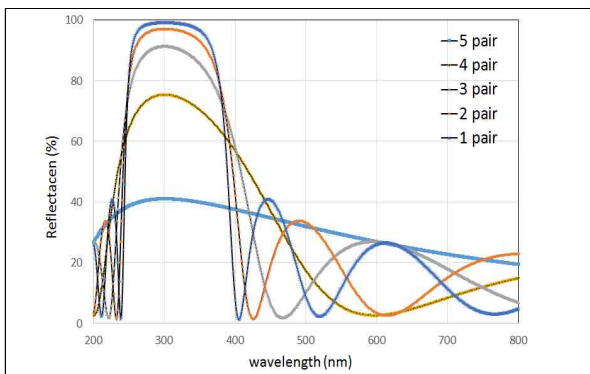


Fig. 3. The reflectance spectrum by the number of pair(1pair~5pair) of $\text{SiO}_2(51\text{nm})/\text{TiO}_2(29\text{nm})$.

그림 3 $\text{SiO}_2(51\text{nm})/\text{TiO}_2(29\text{nm})$ 의 pair 갯수(1pair~5pair)에 따른 reflectance 스펙트럼

그림 4는 $\lambda=500\text{nm}$ 파장대에서 반사율이 peak치를 갖도록 상부에 TiO_2 48nm, 하부에 SiO_2 85 nm의 두께로 적층하여 1pair(총 2층)에서부터 5 pair(총 10층)까지 pair의 갯수가 증가되는 배치를 가지는 구조에 대해 시뮬레이션한 결과이다.

1 pair(총 2층) 적층하였을 때 $\lambda=500\text{nm}$ 파장대에서 낮은 반사율을 보이지만 유전체 박막층의 갯수가 많아질수록 반사율이 순차적으로 증가하여 5 pair에서 반사율이 100%에 근접하는 것을 볼 수 있다.

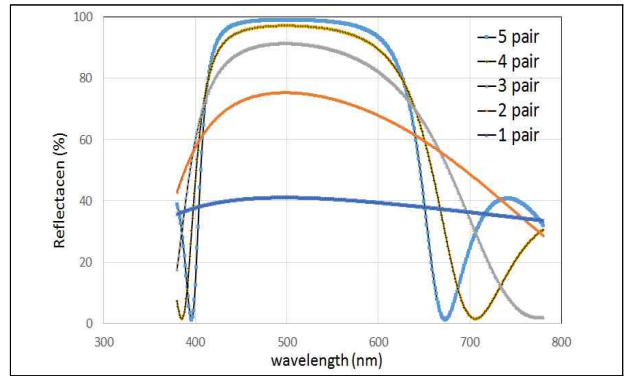


Fig. 4. The reflectance spectrum by the number of pair(1pair~5pair) of $\text{SiO}_2(85\text{nm})/\text{TiO}_2(48\text{nm})$.

그림 4 $\text{SiO}_2(85\text{nm})/\text{TiO}_2(48\text{nm})$ 의 pair 개수 (1pair~5pair)에 따른 reflectance 스펙트럼

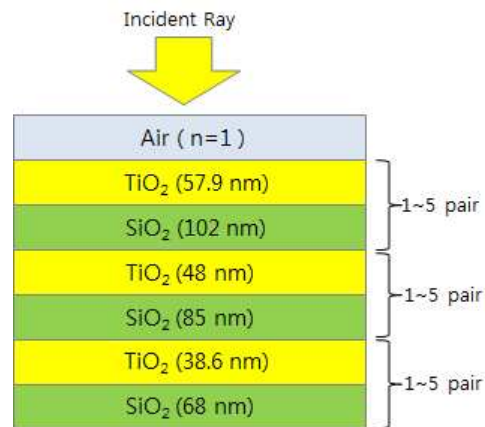


Fig. 5. $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ multi-layer film structure.

그림 5 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 다층 박막 구조

단파장대에서 반사율이 peak치를 가지는 reflectance 스펙트럼의 폭이 좁으며 장파장대에서 반사율이 peak치를 가지는 reflectance 스펙트럼의 폭이 넓어짐을 볼 수 있다.

이와 같은 시뮬레이션 결과를 바탕으로 $\lambda=400\text{nm}$ 파장대에서 반사율이 peak치를 가지도록 설정한 TiO_2 38.6nm, SiO_2 68nm 조합과 $\lambda=500\text{nm}$ 파장대에서 반사율이 peak치를 가지는 TiO_2 48nm, SiO_2 85nm와 $\lambda=600\text{nm}$ 파장대에서 반사율이 peak치를 가지도록 TiO_2 57.9 nm, SiO_2 102 nm를 적층 두께로 각각 설정하여 가시광 파장 영역대인 $\lambda=400\text{nm}$, 500nm, 600nm 파장에서

평평한 reflectance 값을 가지도록 각각 5 pair씩 쌓아 총 30층을 가지는 DBR 구조를 시뮬레이션을 통해 제작하였다 (그림 5).

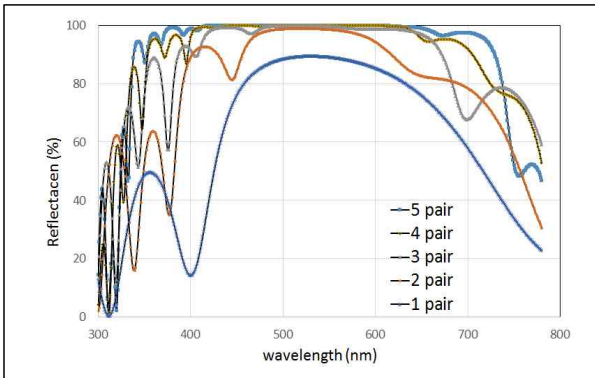


Fig. 6. The reflectance spectrum by the number of pair(1pair~5pair) of $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$.

그림 6 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ pair 개수(1pair~5pair)에 따른 reflectance 스펙트럼

그림 6과 같이 박막 pair 갯수가 증가할수록 reflectance 절대값도 커지며 $\lambda=400\sim 600\text{nm}$ 파장대 영역도 확대되어 넓어지는 것을 알 수 있으며, 5 pair로 적층하였을 때 가시광 영역 파장대에서 reflectance 값이 100%에 근접하는 cut-off 특성을 가지는 것을 알 수 있다.

$\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 1pair~5pair를 사용하여 총 15 pair (총 30층)을 적층하였을 때 가시광 영역 파장대에서 reflectance 값이 100%에 근접하는 특성을 확보할 수 있었다. 이 때 두께가 얇은 유전체 박막을 하부 즉 기판 쪽에 위치시키고 상대적으로 두꺼운 박막을 위쪽으로 배치시켜 적층하는 조합을 가지는 DBR 구조의 반사율 스펙트럼 특성이 좋을 수 있다. 다양한 조합에 대한 DBR 구조를 시뮬레이션하여 유전체 박막의 두께가 아래쪽에서부터 순차적으로 증가하도록 배치하는 것이 가장 좋은 조합임을 확인할 수 있었다. 이와 같이 시뮬레이션 방법을 이용하여 DBR 구조 제작 조건 및 layer structure에 따른 파장 vs. reflectance 스펙트럼을 계산하여 실제 구조 제작 및 최적의 실험 조건을 제시하는데 활용할 수 있음을 알 수 있었다.

IV. 결론

본 연구에서는 LED 칩 및 LCD 검사장비의 핵심부품인 광학 필름 제조에 많이 사용되고 있는 DBR 구조에 대한 광학적 특성 시뮬레이션 방법

을 개발하고 이러한 광학 시뮬레이션을 통하여 최적의 DBR 구조를 제시하고자 하였다. 시뮬레이션 결과를 통하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다. TiO_2 와 SiO_2 박막을 교대로 적층한 다층 박막 구조에서 TiO_2 와 SiO_2 의 refractive index 값을 사용하여 입사광의 파장에 따른 반사율과 투과율을 계산하여 비교 분석하고 이 결과로서 시뮬레이션을 통한 고효율 분산 브래그 반사경 설계 최적화 및 공정에 활용하여 DBR 구조 제작에 사용할 수 있었다.

References

- [1] R. Jambunathan and J. Singh, "Design Studies for Distributed Bragg Reflectors for Short-Cavity Edge-Emitting Lasers," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. 33, No. 7, pp. 1180-1189, 1997. DOI: 10.1109/3.594882
- [2] H. Y. Lin, K. J. Chen, S. W. Wang, C. C. Lin, K. Y. Wang, J. R. Li, P. T. Lee, M. H. Shih, X. Li, H. M. Chen and H. C. Kuo, "Improvement of light quality by DBR structure in white LED," *Optics Express*, Vol. 23, No. 3, 2015. DOI:10.1364/OE.23.000A27.
- [3] D. X. Wang, I. T. Ferguson, J. A. Buck and D. Nicol, "Optical design and simulation for nanoscale Distributed Bragg Reflector (DBR) for high-brightness LED," Proc. SPIE 6327, Nanoengineering: Fabrication, Properties, Optics, and Devices III, 63270Q, 2006.
- [4] A. Chen, Q. Yuan and K. Zhu, "ZnO/a-Si distributed Bragg reflectors for light trapping in thin film solar cells from visible to infrared range," *Applied Surface Science*, pp. 693-697, 2016. DOI: 10.1016/j.apsusc.2015.11.047
- [5] J. Kischkat et al. "Mid-infrared optical properties of thin films of aluminum oxide, titanium dioxide, silicon dioxide, aluminum nitride, and silicon nitride," *Applied Optics*, pp. 6789-6798, 2012. DOI:10.1364/AO.51.006789