

COVID-19의 UV 살균을 위한 비주기 다중층막 광학필터 구조의 설계

여종빈[†]

서영대학교 생명화공과

Design of Aperiodic Multilayer Optical Filter Structure using COVID-19 UV Sterilization

Jong-Bin Yeo[†]

Department of Biological and Chemical Engineering, Seoyeong University, 1 Seogang-ro, Buk-gu, Gwangju 61268, Korea

(Received March 21, 2022: Corrected March 26, 2022: Accepted March 28, 2022)

초 록: 본 연구는 최근 유행하고 있는 코로나 바이러스(SARS-CoV-2) UV 살균을 위한 1차원 광자 준결정 구조 개념의 광학 필터를 설계하고 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이터는 수치해석 프로그램으로 사용되는 MATLAB 프로그램과 직접 코딩한 연산수식을 사용하였다. 비주기(복합구조) 다중층 구조 모델을 설계한 후, 특성 계산을 위하여 다중층 구조 모델의 물성치를 천이 행렬법(TMM, Transfer Matrix Method)으로 설정하였다. 설계된 복합 다중층 구조의 MATLAB을 활용한 전산모사법을 통하여 얻은 행렬값으로부터 반사도와 투과도를 계산하였다. 이 연구의 결과로 인체에 무해하면서 코로나 바이러스 UV 살균이 가능한 253.7 nm 파장만을 투과하는 광학 필터의 제작 및 응용 가능성을 증명하였다.

Abstract: In the present work, we have designed to optimize the optical filter structures of the 1-dimensional photonic quasicrystals (1D PQC)s characteristic for the COVID-19 UV sterilization. The simulator using MATLAB program and ourselves manufacturing calculation codes. After making the aperiodic (and complexed) multi-layer structure model, we establish the transfer matrix method (TMM) for model by the operator conversion. By the using the MATLAB, we derive a matrix for the designed complexed multi-layer structure by applying the equations to the model by obtaining the reflectance and transmittance from the matrix. We also prove the possibility of application in optical filter for UV sterilization.

Keywords: COVID-19 UV sterilization, Photonic Quasicrystal, 1D PQC, Aperiodic multilayer, Optical filter

1. 서 론

COVID-19의 확산으로 2020년 3월 12일 세계보건기구(WHO)의 “팬데믹” 선언 후 현재까지 확산이 지속되어 전세계 코로나 확진 및 사망자수의 증가가 이루어지고 있다. 또한 변이 바이러스로 인하여 확산이 가속되고 있는 상황에서 마스크 등의 개인 방역 지침과 함께 실내 활동 중 감염을 막기 위한 살균 등의 방역 조치가 필요한 상황이다.

특히 결핵, 수두, 사스(중증급성호흡기증후군), 수족구병과 같은 법정 감염병 등 사회적 이슈와 함께 COVID-19 등의 대부분 감염병의 전파는 일반적으로 폐쇄된 실내 공간에서 전파가 많이 발생하기 때문에 환기와 실내 살균의 중요성이 대두되었다. 미국의 전염병.면역학 교

수인 에드워드 나텔은 실내공기를 다수의 사람이 공유하는 일이 위험요소를 높이는 것이라고 강조했고, 이러한 위험요소를 줄이기 위하여 일상생활 중 실내 살균 등의 방역 수단이 꼭 필요한 시점이다.

기존의 UV-Lamp를 활용한 살균의 문제점은 피부암의 유발가능성이 있는 자외선의 실내 사용 적절성이다. 특히 UV-A, UV-B의 파장에 따른 위험성 때문에 인체 유해성이 있다고 알려져있어서 UV-C 만을 활용하여 인체에 무해하며 공기중의 박테리아나 곰팡이의 DNA 나 바이러스의 RNA 등 병원체 유전물질의 재생산을 방해하는 방식으로 실내 살균을 수행하는 연구가 진행되고 있다.

2021년 Scientific reports지에 UV-C의 COVID-19 바이러스(SARS-CoV-2) 비활성화를 통한 살균 능력이 보고되었다. SARS-CoV-2 바이러스 RNA는 개인 용품, 실내 표

[†]Corresponding author

E-mail: jbyeo@seoyeong.ac.kr

© 2022, The Korean Microelectronics and Packaging Society

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.

면 및 화장실을 포함한 모든 환경, 공기 및 환기를 위한 창틀까지 감염성 바이러스가 검출되어 오염된 환경에서 바이러스가 전파될 위험이 높다고 보고되었다. 또한 다양한 물질에서의 SARS-CoV-2 바이러스의 반감기가 보고되었는데 에어로졸의 경우 약 1.1시간, 스테인리스강의 경우 5.6시간, 플라스틱의 경우 6.8시간이 소요될 수 있다고 보고되었다. 이러한 결과로 SARS-CoV-2 전파 위험을 줄이기 위한 표면 및 환경 살균의 중요성이 강조되고 있다.

UV-C는 SARS-CoV-2 바이러스 뿐만 아니라 다양한 바이러스 비활성화의 여러 메커니즘이 보고되고 있다. 예를 들어 UV-C는 feline calici바이러스 및 박테리아 파지 MS2의 바이러스 감염성 감소와 연관된 바이러스 단백질 산화를 유발한다. 또한 murine norovirus(MNV-1) 캡시드 단백질을 파괴하고, polio바이러스에서는 단백질-게놈 교차결합이 이루어지고, 인플루엔자 바이러스의 게놈을 손상시키는 등의 메커니즘으로 바이러스를 비활성화시키는 것으로 보고되고 있다. 문헌에 의하면 SARS-CoV-2 바이러스의 경우 UV-C 조사를 통하여 바이러스 게놈 손상의 유도를 통하여 비활성화 한다는 결론을 내린 보고가 있다.

본 연구에서는 비주기 다중층 막 구조를 복잡한 1차원 광자 결정 구조로써 설계하여 UV-Lamp에서 인체에 유해한 UV-A와 UV-B 파장대를 제거하고 살균에 효과적인 UV-C 파장만을 조사하기 위한 광학 필터로써의 구조를 평가하여 보았다. 이는 SARS-CoV-2 바이러스 뿐만 아니라 다양한 바이러스 전파 차단을 위한 실내 방역의 기반 기술이 되는데 목적이 있다.

2. 실험

소자 설계에 사용될 물질의 물성은 UV 파장 영역에서의 n , k 값을 고려하여 광학소자에 널리 쓰이는 SiO_2 와 Al_2O_3 를 선택하였고, 기판은 Quartz를 선택하였다. 설계에 사용된 물질은 문헌을 참고하여 각 파장에 해당하는 광학물성 값으로 활용하여 Fig. 1과 같은 구조로 설계하였고 광 입사각은 수직으로 지정하였다.

Fig. 1에서 설계된 구조는 입사각이 수직일때 목표 파장을 인체유해 파장인 UV-A와 UV-B를 반사시키고 UV-C 파장대를 투과시키는 영역으로 설정하여 필터를 설계하였다. Fig. 1의 회색 물질은 Al_2O_3 , 흰색 물질은 SiO_2 , 검은 물질은 캐비티로써 Al_2O_3 를 사용하였다. 각 단일층의 두께는 목표 파장영역 및 필터링 파장에 따라 다르게 설정하였다.

Fig. 1(a)는 UV-C 파장 영역대 중에서 SARS-CoV-2 바이러스 살균 특성을 확인하기 위하여 Scientific report에서 사용된 253.7 nm 파장을 선택적으로 투과할 수 있는 필터의 설계된 구조이다. Al_2O_3 와 SiO_2 물질의 교번층 구조로 광자결정의 개념으로 해석되고 사이에 Cavity 층을

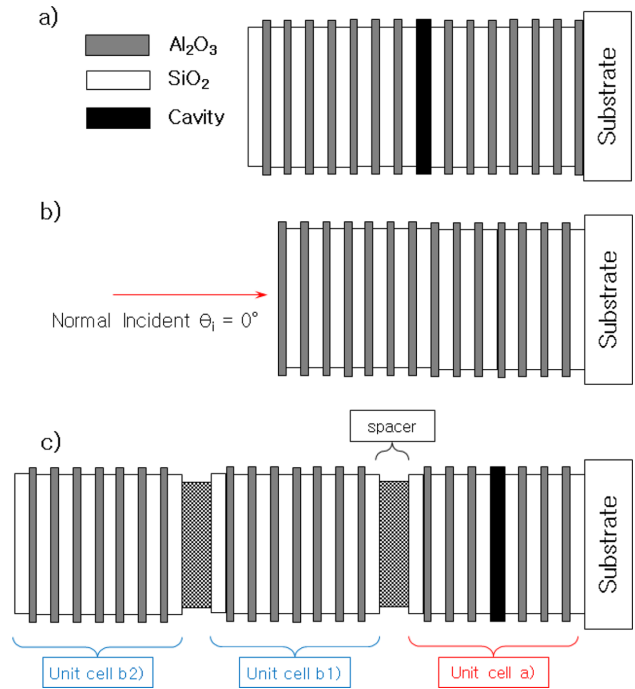


Fig. 1. Schematic of designed filter structure for UV sterilization. (a) 253.7 nm pass filter structure, (b) UV-A, UV-B band reflecting structure, (c) combined unperiodic multi-layer.

삽입하여 줌으로써 목표파장인 253.7 nm 파장을 선택적으로 투과시킬 수 있는 구조로 설계되었다. 각 층의 두께는 $\text{Al}_2\text{O}_3 = 30$ nm, $\text{SiO}_2 = 50$ nm로 설계하였고, cavity는 Al_2O_3 물질로 57 nm로 설계된 구조이다. Fig. 1(b)는 UV-A와 UV-B 영역의 파장을 반사시켜서 투과되지 않게 설계된 주기구조로 각 단일층의 교번층으로 설계하였다. 각 층의 두께는 $\text{Al}_2\text{O}_3 = 30$ nm, $\text{SiO}_2 = 65$ nm인 주기구조와 $\text{Al}_2\text{O}_3 = 35$ nm, $\text{SiO}_2 = 75$ nm인 주기구조를 각각 20 pair로 설계하였다. Fig. 1(c)는 (a)와 (b) 구조를 결합하여 UV-Lamp에서 유해 파장을 제거하고 살균에 사용하고자 하는 목표파장인 253.7 nm 파장만을 선택적으로 투과하는 필터의 비주기 다중층막 통합구조의 설계도이다. 각 Unit cell의 분리를 위하여 spacer로 Quartz를 1000 nm 두께로 삽입하였다.

본 논문에서는 화공 수치해석에 널리 쓰이는 MATLAB 프로그램을 이용하여 프레넬 수식과 맥스웰 방정식, 스텔의 법칙 등에서 이끌어낸 광학 소자와 광의 특성 행렬을 이용하여 TMM (transfer matrix method) 방법으로 수리적 계산을 하였고 이를 통해 200~280 nm 파장인 UV-C 영역 중에서 문헌에 보고된 253.7 nm의 파장만을 선택적으로 투과시키는 필터에 응용가능한 소자를 설계하였다. Fig. 1의 구조를 전산모사법으로 수리적 계산을 통하여 투과도 및 반사도, 입사각에 대한 특성을 예측하였다. 또한 투과 밴드 중심 파장의 입사각도 의존성을 계산하여 고찰 하였다.

3. 결과 및 고찰

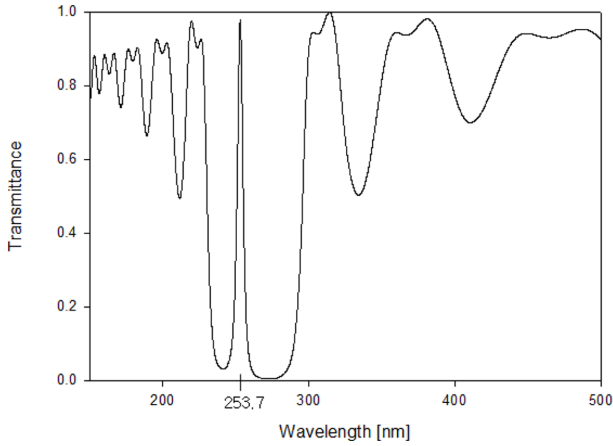


Fig. 2. Calculated transmittance of 1D PQC's filter.

Fig. 2는 앞서 설계한 Fig. 1(a) 구조의 전산 모사법에 의해 계산된 광자 준결정 필터 특성을 나타낸다. 문헌에 보고된 253.7 nm 파장을 투과시키기 위하여 cavity 구조로 설계된 소자로써 시뮬레이션 결과 해당파장만 선택적으로 투과하는 필터 역할을 수행할 수 있음을 확인하였다.

Fig. 3(a), (b)는 각각 설계된 Fig. 1(b) 구조의 $Al_2O_3 = 30$ nm와 $SiO_2 = 65$ nm, $Al_2O_3 = 35$ nm와 $SiO_2 = 75$ nm로 설계했을 때 소자의 광학 물성을 계산한 값이다. 각각 목표한 UV-B, UV-A 파장 영역을 반사시켜서 투과하지 않는 광학 특성을 확인할 수 있었다. Fig. 3(c)는 두 구조를 spacer로 연결하여 투과도를 계산한 값으로 인체에 유해한 UV-A, UV-B 영역의 파장을 투과시키지 않는 밴드갭 특성을 보였다.

Fig. 3(c)의 구조를 응용하여 UV 파장대역의 완전반사를 위한 다양한 소자의 응용이 가능할 것으로 판단되며 특히 SARS-CoV-2 바이러스 외의 다른 바이러스 살균에 효율적인 파장만을 선택적으로 투과할 수 있는 pass filter로의 응용 가능성을 확인할 수 있었다.

Fig. 4는 Fig. 1(c)로 설계된 구조의 광학 물성값을 계산한 값이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 SARS-CoV-2 바이러스 살균을 위한 목표파장인 253.7 nm 파장의 선택적인 투과와 인체 유해 파장인 UV-A, UV-B 등의 파장 영역이 제한되어 살균에 인체에 무해하며 연속적인 살균으로 방역을 위한 소자에 적용가능성이 높게 설계되었음을 확인할 수 있었다.

이상과 같이 복잡한 구조인 1차원 광자(준)결정 구조를 응용한 소자의 설계를 통하여 원하는 파장대에서 국지적으로 좁은 영역의 투과 특성을 갖는 소자를 설계할 수 있었다. 이러한 복잡한 설계를 변형함으로써 다양한 파장에서 여러 가지 특성을 갖도록 설계하여 원하는 빛의 제어 가능할 수 있음으로써 다양한 바이러스에 대응할 수 있는 방역 소자 개발이 가능 할 것이다.

현재 본 연구진은 화학기상증착과 스퍼터링 방법등을 이용하여 복잡한 다중층 막을 제작하여 설계한 특성과 비교하는 실험을 진행 중에 있고, 자외선 영역의 우수한 투

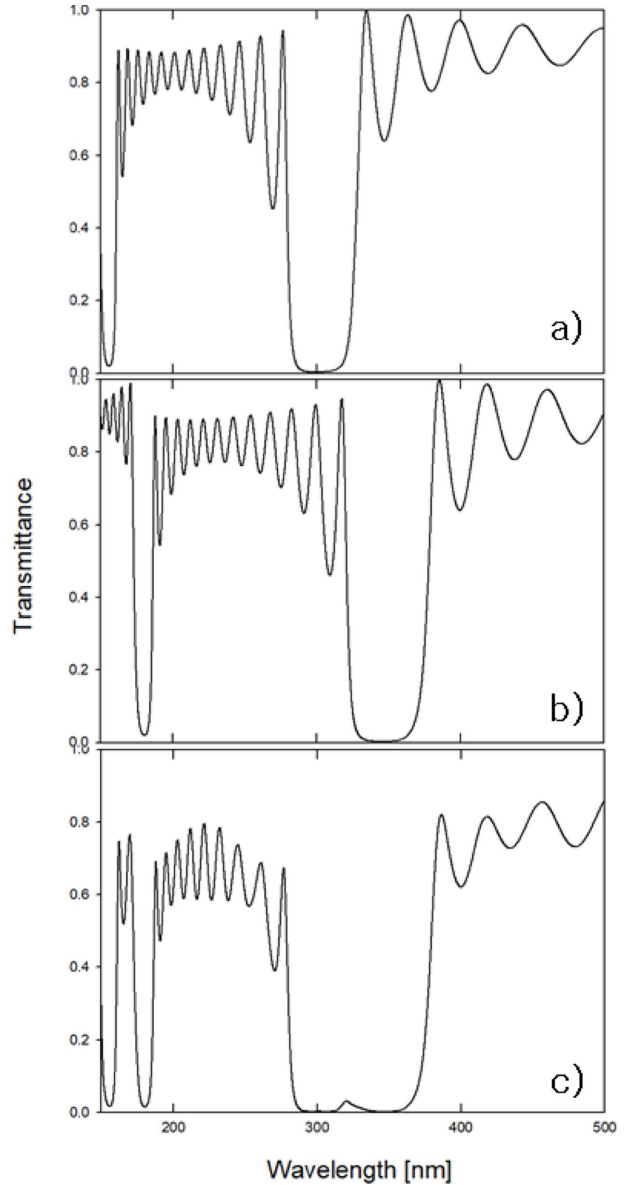


Fig. 3. Calculated transmittance of 1D PCs reflector. (a) UV-B band reflector, (b) UV-A reflector, (c) UV-A and UV-B band complexed reflector.

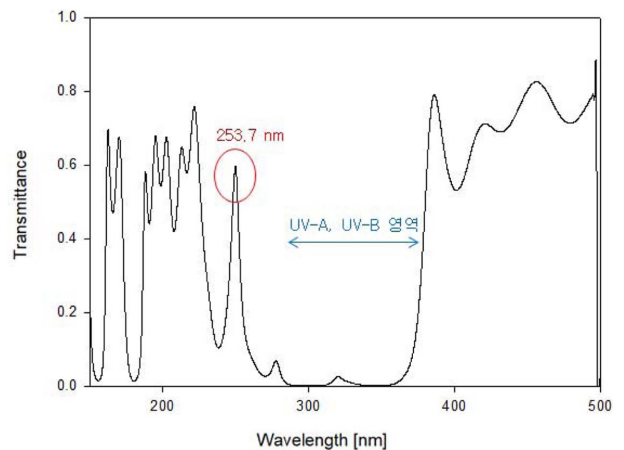


Fig. 4. Calculated transmittance of designed filter structure for UV sterilization.

과 특성과 흡수가 적은 물성의 후보군을 이용한 다중층 막의 설계에 대한 연구를 실시하고 있다.

4. 결 론

바이러스 살균과 동시에 인체 무해한 파장을 사용하기 위하여 빛을 제어하기 위한 준주기 구조인 복잡한 다중층 막의 설계를 통하여 얻은 구조를 전산모사법으로 특성 평가를 하였다. 특히 SARS-CoV-2 바이러스 살균 특성을 보고한 문헌에서 제시된 253.7 nm 파장대 만을 투과하고 인체에 유해하다고 알려진 UV-A, UV-B 파장 영역의 차단 특성을 갖는 필터 소자를 설계하였고, 그 결과 목표 파장 영역에서 선택적 투과 특성을 갖는 구조를 얻을 수 있었다. 본 연구진에서 설계한 구조에서 목표파장 영역은 60% 투과 특성을 얻을 수 있었고, 인체 유해파장은 3% 이하의 투과 특성을 얻을 수 있었다. 후속 연구로는 완벽한 파장 금지 영역을 위하여 설계 구조의 수정 및 보완을 통하여 소자를 설계하고, 설계된 구조의 소자 제작 후 입사각 의존성 및 실소자의 투과 특성을 확인할 계획이다.

감사의 글

This research was supported by Basic Science Research Capacity Enhancement Project through Korea Basic Science Institute (National research Facilities and Equipment Center)

grant funded by the Ministry of Education. (grant No. 2019R1A6C1010024).

참고문헌

1. E. Yablonovitch, "Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics", *Phys. Rev. Lett.* Vol. 58, No. 20, p. 2059, 1987.
2. C. W. Lo, R. Matsuura, K. Imura, S. Wada, A. Shinjo, Y. Benno, M. Nakagawa, M. Takei, Y. Aida, "UVC disinfects SARS-CoV-2 by induction of viral genome damage without apparent effects on viral morphology and proteins", *Sci. Rep.*, Vol. 11, p. 13804, 2021.
3. R. Lu, et al., "Genomic characterisation and epidemiology of 2019 novel coronavirus: implications for virus origins and receptor binding.", *The Lancet.*, Vol 399, No. 10224, p. 565, 2020.
4. T. Tanaka, O. Nogariya, N. Shionoiri, Y. Maeda, A. Arakaki, "Integrated molecular analysis of the inactivation of a non-enveloped virus, feline calicivirus, by UV-V radiation.", *J. Biosci. Bioeng.*, Vol. 126, Issue. 1, p. 63, 2018.
5. H. Kong, J. B. Yeo, H. Y. Lee, "Tellurite suboxide based near-infrared reflector and filter", *Opt. Mater.*, Vol. 83, p. 157, 2018.
6. J. B. Yeo, H. Y. Lee, S. D. Yun, H. Y. Yang, "Design of one-dimensional photonic quasi-crystal arrays for the flat-band pass filters", *Int. J. Mod. Phys. B*, Vol. 23, No. 06n07, p. 1670, 2009.
7. H. Kong, J. B. Yeo, H. Y. Lee, "Optical Properties of TeO₂(x<3)/SiO₂ One-dimensional Photonic Crystals", *J. Korean Ins. Electr. Electron. Mater. Eng.*, Vol. 27, No. 12, p. 831-836, 2014.