


NIR 협대역 투과 필터 응용을 위한 LED 실리콘 봉지재 위에 직접 E-beam으로 증착된 SiO₂/TiO₂ 다층 박막 설계 및 제작

김동표¹, 김경섭¹, 김구철², 정중채³ 

¹ 여주대학교 반도체시스템과

² (주)IVU테크 기술연구소

³ 전남테크노파크 정책기획단

Design and Fabrication of SiO₂/TiO₂ Multi Layer Thin Films on Silicon Encapsulation of LED Deposited by E-beam Evaporation for NIR Narrow Band Pass Filter Application

Dong Pyo Kim¹, Kyung-Seob Kim¹, Goo-Cheol Kim², and Jung-Chae Jeong³

¹ Department of Semiconductor System, Yeosu Institute of Technology, Yeosu 12652, Korea

² R&D Center, IVU Tech, Incheon 22827 Korea

³ Industrial Policy Planning Department, Jeonnam Technopark, Suncheon 58034, Korea

(Received November 10, 2021; Revised November 17, 2021; Accepted November 19, 2021)

Abstract: The SiO₂/TiO₂ multilayer thin films used for narrow band pass filter were fabricated using E-beam evaporation method. The narrow band pass filter was used to enhance the resolution of spectroscopy and sensor applications with near infrared (NIR) light source. The narrow band pass filter with multilayer thin films were designed with Essential Macleod program. The multilayers of SiO₂/TiO₂ with 32 layers were deposited on the silicon encapsulation of IR with peak wavelength (λ_p) of 660 nm and NIR LEDs with λ_p of 830 nm, 880 nm, and 955 nm. After NIR light passed through the narrow band pass filter, the full width of half maximum of 33.4~48.6 nm became narrow to 20~24 nm owing to the absorption of photons with short or long wavelength of designed band of 20 nm. The SiO₂/TiO₂ band pass filter fabricated in this study can be used for sensor, optoelectronics, and NIR spectroscopy applications.

Keywords: SiO₂/TiO₂, Multi layers, E-beam evaporation, NIR LED, Narrow band pass filter

1. 서론

최근 약 700~1,000 nm 범위의 근적외선(near infrared, NIR)은 피부 조직에 손상 없이 표피 아래의 생체 조직 깊

은 곳에 침투할 수 있으며, 물, 메라닌과 헤모글로빈에 대한 흡수도가 낮기 때문에, 상대적으로 근적외선이 많이 투과할 수 있는 광학창(optical window)을 가지고 있어 광역학 치료의 다양한 분야에 활용되고 있다 [1-3]. 피부를 투과한 근적외선은 세포 조직 내의 광 수용기와 반응하여 생화학적 활성도를 향상시켜, 세포의 재생 및 신진대사를 증가시킨다. 이와 같은 특성을 활용하여 통증 완화, 알레르기 비염 치료, 욕창치료, 뇌 손상 치료, 및 CT 등 다양한 분야에 응용되고 있다 [4-9]. 또한 근적외선 LED 치료기

✉ Jung-Chae Jeong; jeongjc@jntp.or.kr

Copyright ©2022 KIEEME. All rights reserved.

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.

기는 NIR 레이저 치료기기 보다 광 출력이 낮기 때문에 생체 세포에 대한 손상이 거의 없으며, 넓은 면적을 조사할 수 있으므로 다양한 형태의 가정용 치료기기로 상용화되고 있다 [10,11]. 또한 근적외선에 반응하는 나노 물질을 이용하여 형광 이미지를 얻거나 혈관을 비파괴적으로 관찰하는 근적외선 분광 분석기(NIR spectroscopy)에도 활용이 되고 있다 [12,13].

특히 근적외선 분광 분석기의 NIR LED 발광원 또는 근적외선을 센싱하는 수광부에서 높은 해상도를 얻기 위하여 발광 또는 수광되는 광의 반치폭이 좁아야 한다. 그러므로 발광부 또는 수광부 전면에 대역 투과 필터가 설치되어 있다. 대역 투과 필터는 특정 파장 영역 대역보다 짧거나 긴 파장을 가지는 광자를 흡수 또는 반사시켜 일정 파장 대역내의 광을 투과시킨다. 광학 대역 투과 필터는 저 굴절율

박막과 고 굴절율 박막을 교대로 적층하여 제작되며, 다층 박막으로 입사되는 광은 여러 박막 경계면에서 반사할 때 다중 반사 빛이 다양한 간섭 현상을 이용한다. 현재까지 NIR 대역 투과 필터는 석영 유리(quartz glass) 위에 스퍼터링과 E-beam 증착법으로 제작되었으나 [14,15], LED의 실리콘 봉지재 위에 직접 대역 투과 필터를 제작한 연구는 없었다.

본 연구에서는 중심 피크 파장(peak wavelength: λ_p)이 650 nm인 적외선 LED와 근적외선($\lambda_p = 830 \text{ nm}, 850 \text{ nm}, 955 \text{ nm}$) LED를 사용하였다. Essential Macleod Program을 이용하여 반치폭(full width at half maximum, FWHM)은 20 nm이고, 투과율이 99%를 가지는 2 공진층 패브리-페로 필터(2-cavity fabro-perot filter)를 설계하였다. 다층 박막 투과 필터는 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 가 교대로 증착하여 다층 박막을 형성하였고, 최종 박막 층수는 32층이다. 다층 박막 대역 투과 필터는 IR LED와 NIR LED의 실리콘 봉지재 위에 E-beam 진공 증착기를 이용하여 제작되었다. 다층 박막 대역 필터 증착 전과 후의 IR LED와 NIR LED에서 나오는 광을 측정하여 중심 피장 파장의 이동 정도와 반치폭의 변화를 고찰하였다.

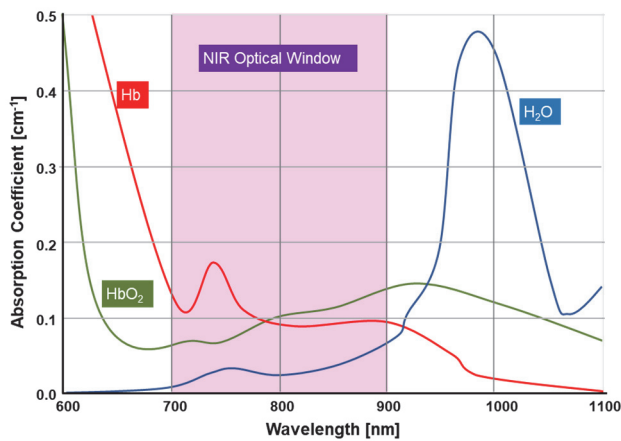


Fig. 1. Absorption spectrum and optical window of water and hemoglobin.

2. 실험 방법

2.1 20 nm 협대역 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 다층 박막 투과 필터 설계

그림 2는 Essential Macleod Program을 이용하여 계산한 TiO_2 와 SiO_2 의 물리적 두께를 나타내고 있다. 그림 2와 같이 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 는 32층으로 구성되어 있으며, IR LED ($\lambda_p=830 \text{ nm}$) 전체 다층 박막의 두께는 3347.16 nm이고,

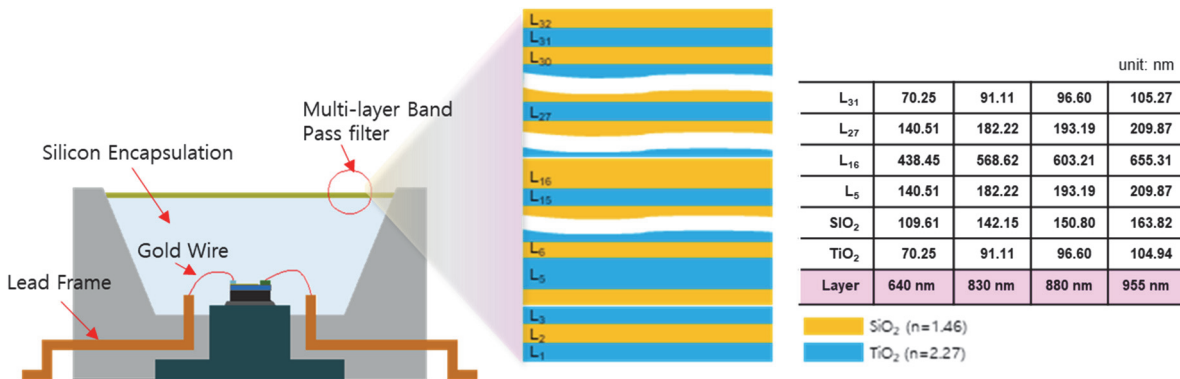


Fig. 2. Structures of narrow multi-layers band pass filter.

NIR LED의 다층 박막 두께는 $\lambda_p=830$ nm, 880 nm와 955 nm일때, 4340.89 nm, 4604.01 nm, 5001.93 nm이었다.

2.2 E-beam 증착 공정

그림 3은 다층 박막 증착 공정에 이용된 E-beam 장치 외형과 내부 이미지이다. LED가 실장된 리드프레임을 지그에 장착한 후 E-beam 진공 증착기의 기판 홀더에 고정하였다. E-beam 증착 온도는 할로겐 램프를 이용하여 270°C로 올린 후 45분간 안정화시켰으며 박막의 균일도를 유지하기 위하여 기판 바스켓은 15 RPM으로 공전과 자전 하였다. TiO₂ 박막 증착을 위한 타겟은 TiO 타겟을 사용하였고, 증착 시에는 2×10^{-5} Torr까지 진공을 낮춘 후 진공도 1.2×10^{-4} Torr로 유지하도록 O₂를 공급하였고, TiO₂의 증착 속도는 3.7 Å/sec이었다. SiO₂ 박막 증착을 위한 타겟은 SiO 타겟을 사용하였고, 별도의 O₂ gas를 공급하지 않고 2×10^{-5} Torr에서 8 Å/sec로 증착 하였다.



Fig. 3. E-beam deposition system.

Table 1. Optical measurement conditions.

Peak wavelength	I _s [mA]	V _f [V]	Measure method
640 nm	20	1.90	Luminous intensity
830 nm	50	1.50	Radiant intensity
880 nm	50	1.50	Radiant intensity
956 nm	50	1.50	Radiant intensity

2.3 광학 특성 측정

표 1은 다층박막은 IR LED와 NIR LED의 광출력을 측정하기 위한 조건을 나타내고 있다. 본 논문에서는 밴드 패스의 투과율을 직접 측정할 수 없기 때문에 OPI-100 LEOS(광전자정밀)의 측정 장비를 사용하여 IR과 NIR LED에 SiO₂/TiO₂ 다층 박막을 증착 전과 후의 광 출력(광도와 복사광도)을 측정하여 비교하였다. IR과 NIR LED 광출력 측정을 위하여, IR LED에는 20 mA의 전류와 1.90 V의 전압을 공급하였고, NIR LED에는 50 mA 전류와 1.5 V 전압을 공급하였다. 실제 IR LED에 걸리는 전압은 약 ± 0.05 V와 NIR LED에 걸리는 전압은 ± 0.07 의 편차를 가지고 있었다. 이는 IR과 LED 칩 자체의 편차 때문으로 사료된다.

3. 결과 및 고찰

3.1 20 nm 대역 SiO₂/TiO₂ 다층 박막 투과 필터 설계 결과

그림 4는 Essential Macleod Program을 이용하여 시뮬레이션 한 결과 그래프이다. 그림 2에 나타난 바와 같이 IR LED ($\lambda_p=640$ nm)의 TiO₂와 SiO₂ 각 층의 표준 두께는 70.26 nm와 109.61 nm이다. NIR LED의 TiO₂와 SiO₂의 표준 두께는 91.11 nm/142.15 nm ($\lambda_p=830$ nm), 96.60 nm/150.80 nm ($\lambda_p=880$ nm)와 163.82 nm/ 104.94 nm ($\lambda_p=955$ nm)이다. IR LED와 NIR LED ($\lambda_p=830$ nm와 880 nm)는 L₅, L₁₆, L₂₇ 두께를 다르게 증착 하였다, NIR LED ($\lambda_p=830$ nm)는 L₅, L₁₆, L₂₇, L₃₁의 두께를 다르게 증착 하였다. TiO₂의 굴절율은 2.27, SiO₂의 굴절율은 1.46으로 설정하였고, 기판 소재인 실리콘 봉지재의 굴절율인 1.52는 고려하지 않았다. 시뮬레이션 결과 밴드 패스 필터의 반치폭은 20 nm이고, 투과율은 99%이었다.

3.2 IR & NIR LED의 USB 현미경 표면 이미지

그림 5는 USB microscope를 이용하여 관찰한 IR과 NIR LED 표면 이미지이다. E-beam으로 SiO₂/TiO₂ 다층 박막이 증착 후 실리콘 봉지재 위의 투명 창이 다양한 색을 띄고 있다. 이는 표면에 증착 두께 차이와 다층 박막 사이의 광의 간섭 현상에 의한 것으로 사료된다.

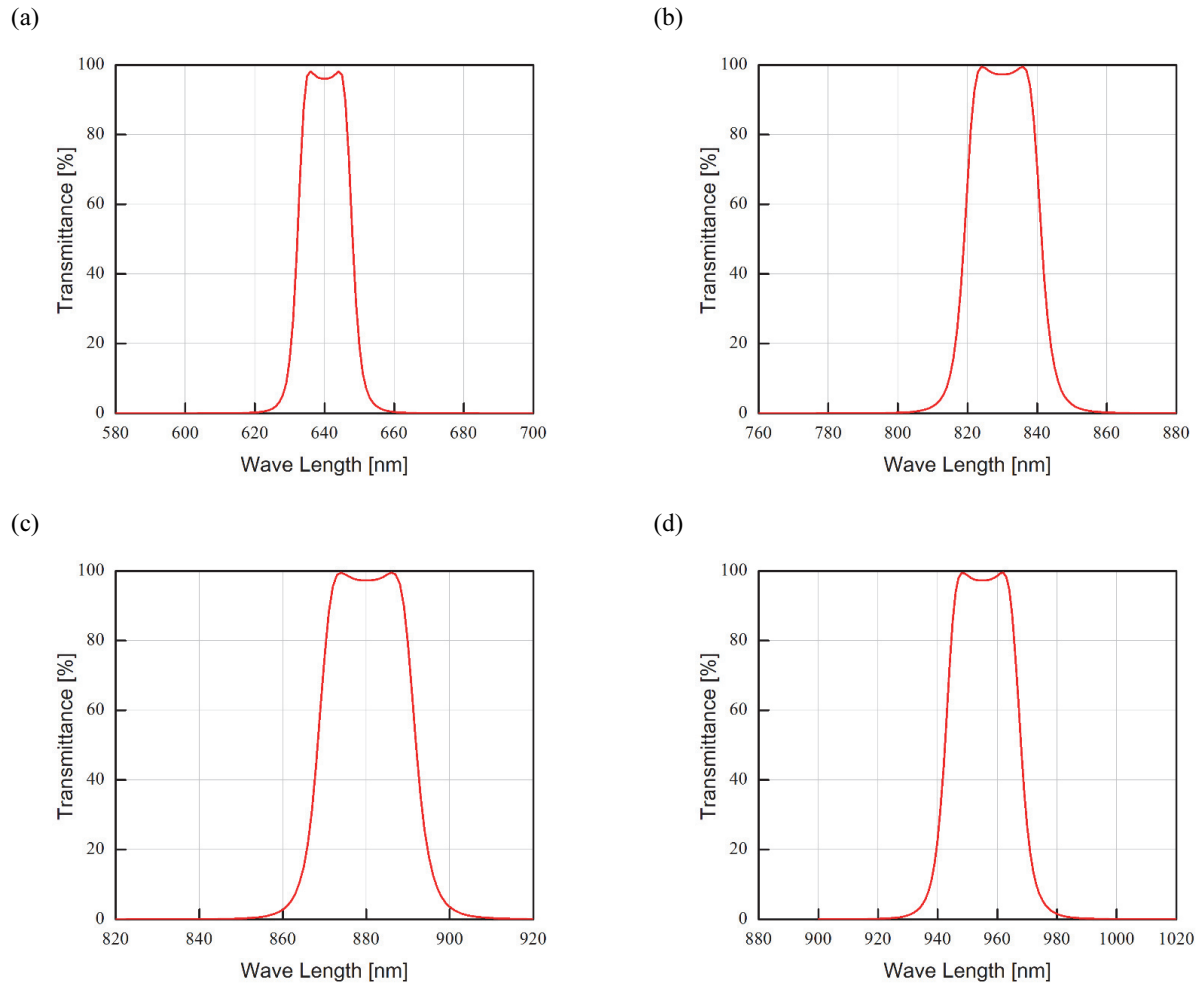


Fig. 4. The simulation data for the transmittance of SiO₂/TiO₂ multilayers narrow band pass filter. (a) $\lambda_p=640$ nm, (b) $\lambda_p=830$ nm, (c) $\lambda_p=880$ nm, and (d) $\lambda_p=956$ nm.

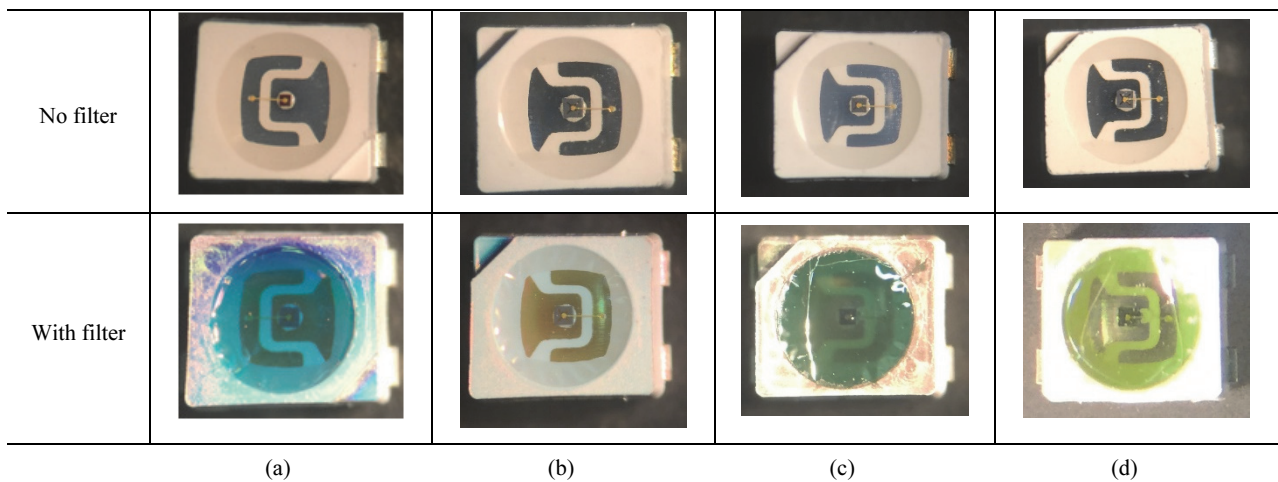


Fig. 5. The USB microscope images for surfaces of IR and NIR LEDs without and with SiO₂/TiO₂ multilayers narrow band pass filter. (a) 640 nm, (b) 830 nm, (c) 880 nm, and (d) 956 nm.

3.3 광학 특성

3.3.1 640 nm IR LED

그림 6은 SiO₂/TiO₂ 다층 박막 투과 필터 형성하기 전과 후의 640 nm IR LED의 광도 그래프이다. 다층 박막 필터 증착 전 640 nm IR LED의 평균 중심 파장은 641.29 nm이고, 반치폭은 15.40~16.30 nm이었고, 다층 투과 필터 증착 후 평균 중심 파장은 641.73 nm이고, 반치폭은 15.80~16.30 nm이었다. 640 nm IR LED는 중심 파장과 반치폭의 변화는 거의 없었다. 또한 640 nm IR LED의 반치폭이 설계 값인 20 nm보다 작기 때문에 TiO₂/SiO₂ 협대역 투과 필터에서 광자가 흡수되지 않았다고 사료된다.

3.3.2 830 nm NIR LED

그림 7은 SiO₂/TiO₂ 다층 박막 투과 필터 형성하기 전과 후의 830 nm NIR LED의 복사광도 세기 그래프이다. 증착 전 830 nm IR LED의 평균 중심 파장은 830.73 nm이고, 반치폭은 33.4~37.3 nm이었다. 다층 박막 투과 필터 증착 후 평균 중심 파장은 817.23 nm이고, 반치폭은 21.9~24.0 nm이었다. 다층 박막 증착 후 중심 피크 파장이 13.5 nm 짧은 파장으로 이동을 하였는데, 이는 다층 박막 필터에서 중심 파장 보다 긴 장파장의 광자들이 흡수되었기 때문이다. 이는 반치폭은 설계 값인 20 nm보다 약 4 nm 크다.

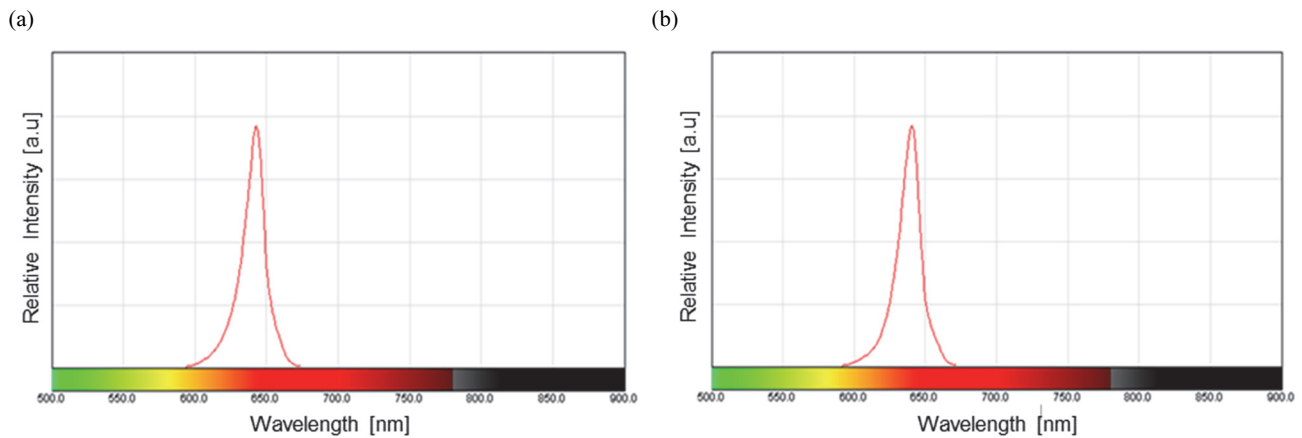


Fig. 6. Luminous intensity of 640 nm IR LED without and with e-beam deposited SiO₂/TiO₂ multi-layers narrow band pass filter. (a) No filter and (b) with filter.

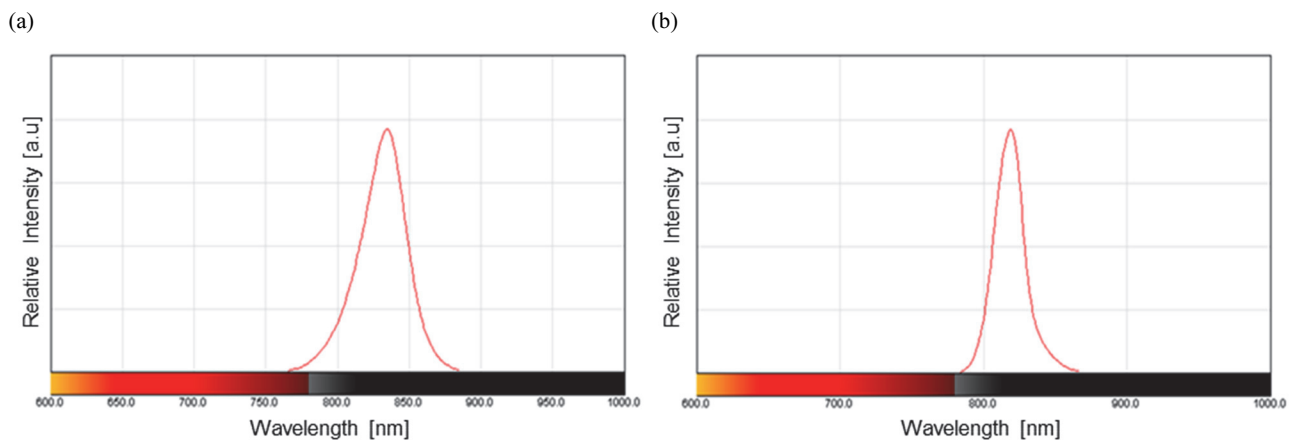


Fig. 7. Radiant intensity of 830 nm NIR LED without and with e-beam deposited SiO₂/TiO₂ multi-layers narrow band pass filter. (a) No filter and (b) with filter.

3.3.4 880 nm NIR LED

그림 8은 SiO₂/TiO₂ 다층 박막 투과 필터 형성하기 전과 후의 880 nm NIR LED의 복사광도 세기 그래프이다. 증착 전 880 nm NIR LED의 평균 중심 파장은 878.30 nm이고, 반치폭은 40.00~40.80 nm이었고, 다층 투과 필터 증착 후 평균 중심 파장은 880.06 nm이고, 반치폭은 20.30~21.90 nm이었다. 다층 박막 증착 후 중심 피크 파장이 1.76 nm 긴 파장으로 이동을 하였는데, 이는 다층 박막 필터에서 중심 파장 보다 긴 장파장의 광자들이 효과적으로 흡수되었기 때문이다. 반치폭은 설계 값인 20 nm보다 약 1.90 nm 크다.

3.3.5 955 nm NIR LED

그림 9는 SiO₂/TiO₂ 다층 박막 투과 필터 형성하기 전과 후의 955 nm NIR LED의 복사광도 세기 그래프이다. 증착 전 NIR LED의 평균 중심 파장은 956.34 nm이고, 반치폭은 48.30~48.60 nm이었다. 다층 투과 필터 증착 후 NIR LED의 평균 중심 파장은 954.15 nm이고, 반치폭은 22.20~23.70 nm이었다. 다층 박막 증착 후 중심 피크 파장이 약 2.19 nm 짧은 파장으로 이동을 하였지만, 반치폭은 24.9 nm 감소하였다. 이는 중심 파장 보다 약 11.35 nm 긴 파장과 짧은 파장을 가지는 광자들이 다층박막 필터에서 효과적으로 흡수되었기 때문으로 사료된다. 반치폭은 설계 값인 20 nm보다 약 4.9 nm 크다.

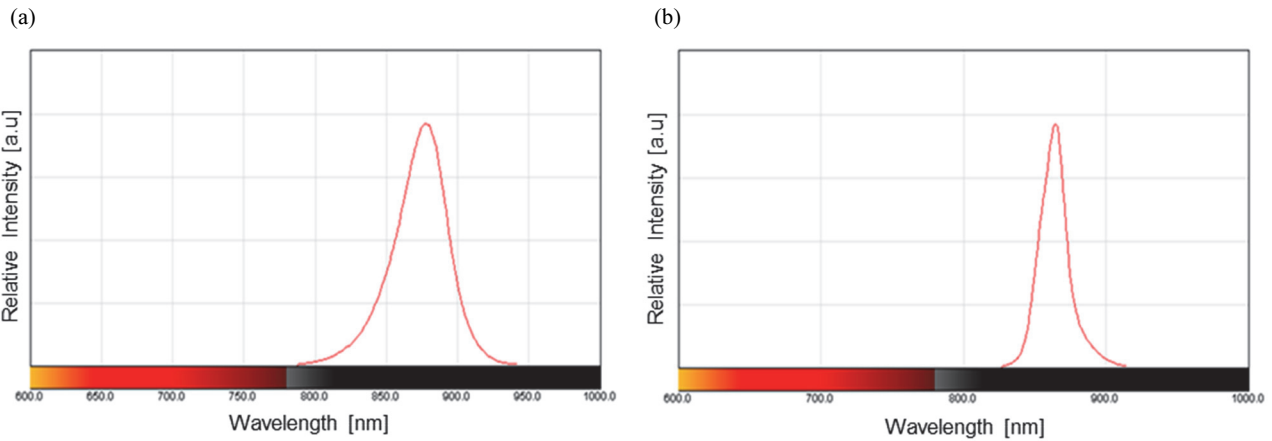


Fig. 8. Radiant intensity of 880 nm NIR LED without and with e-beam deposited SiO₂/TiO₂ multi-layers narrow band pass filter. (a) No filter and (b) with filter.

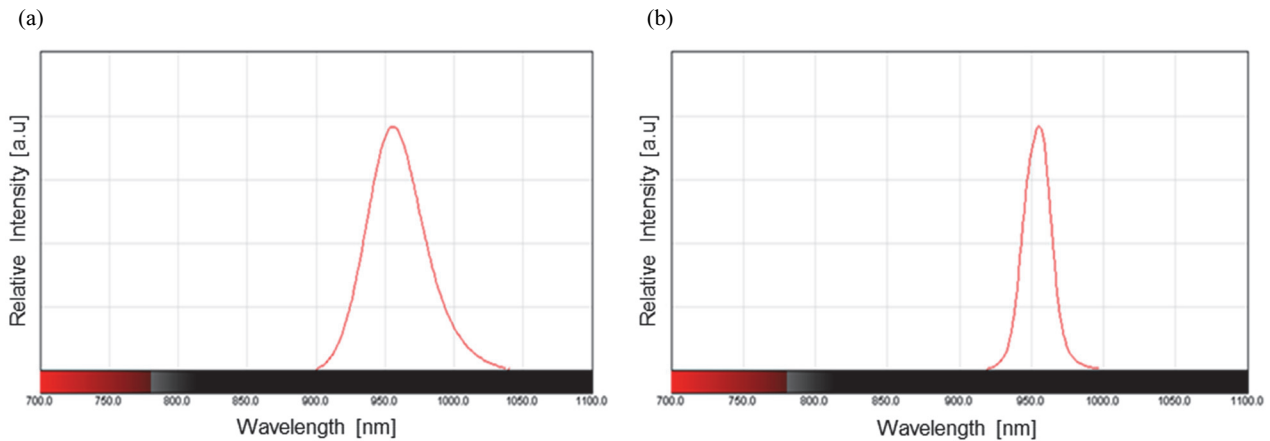


Fig. 9. Radiant intensity of 945 nm NIR LED without and with e-beam deposited SiO₂/TiO₂ multi-layers narrow band pass filter. (a) No filter and (b) with filter.

4. 결론

Essential Macleod Program을 이용하여 적층하여 IR LED ($\lambda_p = 640$ nm)와 NIR LED ($\lambda_p = 850$ nm, 880 nm와 955 nm)에서 20 nm 반측폭과 99%의 투과율을 가지는 2 공진층 패브리-페로 필터 설계하였다. 협 대역 투과층의 최적 조건은 32층이었다. 전체 두께는 IR LED는 3347.16 nm이고, NIR LED는 4340.89 nm ($\lambda_p = 830$ nm), 4604.01 nm ($\lambda_p = 880$ nm), 5001.93 nm ($\lambda_p = 955$ nm)이었다. 설계치를 바탕으로 하여 IR과 NIR LED의 실리콘 봉지재 위에 직접 E-beam 진공 증착 장비를 이용하여 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 다층 박막 협 대역 투과 필터를 제작하였다. IR과 NIR LED의 광도와 복사 광도를 측정하였을 때, IR LED의 경우, 협 대역 투과 필터 증착 전 반치폭이 최대 16.30 nm로 설계치 보다 작기 때문에 협 대역 투과 필터에 의한 차단 효과가 없었다. 그러나 $\lambda_p = 830$ nm인 NIR LED의 경우, 중심 피크 파장이 13.5 nm 짧은 파장으로 이동하였고, 반치폭은 21.9~24.0 nm로 좁아졌다. $\lambda_p = 880$ nm인 NIR LED의 경우, 중심 피크 파장이 17.6 nm 긴 파장으로 이동하였고, 반치폭은 20.30~21.90 nm 좁아졌다. $\lambda_p = 955$ nm인 NIR LED의 경우, 중심 피크 파장은 2.19 nm 짧은 파장으로 이동하였고, 반치폭은 22.20 ~ 23.70 nm로 좁아졌다. NIR LED 위에 협 대역 다층 박막 투과 필터를 증착 하였을 때 반치폭이 설계치인 20 nm 보다 약 1.9~4.0 nm 넓게 측정되었다. 이는 LED를 싸고 있는 봉지재인 실리콘의 굴절률인 1.52를 고려하지 않았기 때문으로 사료된다.

본 연구를 통하여 LED의 봉지재에 직접 다층 박막 필터 제작이 가능한 것을 확인하였고, NIR LED 자체에 협대역 필터를 형성함으로써 센서 또는 CT와 같은 Spectroscopy 분야의 해상도를 높이는 데 기여할 수 있을 것으로 사료된다. E-beam 증착 시 샘플의 위치에 따른 대역 투과 필터의 성능을 확인하여 양품의 협 대역 필터를 양산할 수 있는 추가적인 연구가 필요하다.

REFERENCES

- [1] A. Alabugin, *Photochem. Photobiol.*, **95**, 722 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1111/php.13068>]
- [2] D. C. Chen, V. G. Agopian, J. R. Avasino, S. M. Farely, and M. G. Stelzner, *J. Surg. Res.*, **130**, 222 (2005). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2005.11.170>]
- [3] L. Shi, L. A. Sordillo, A. Rodriguez-Contreras, and R. Alfano, *J. Biophotonics*, **9**, 38 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1002/jbio.201500192>]
- [4] J. T. Kim, S. B. Bae, and D. H. Yoon, *Electron. Telecom. Trends*, **25**, 59 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.22648/ETRI.2010.J.250506>]
- [5] E. W. Park, *J. Biomed. Eng. Res.*, **40**, 125 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.9718/JBER.2019.40.4.125>]
- [6] S. E. Jo, H. Lee, S. J. Hong and J. H. Kang, *J. Acupunct. Res.*, **32**, 211 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.13045/acupunct.2015053>]
- [7] K. G. Lee, J. H. Shin, K. J. Lee, S. H. Sun, C. H. Han, and I. S. Jang, *J. Int. Korean Med.*, **35**, 546 (2014).
- [8] E. Sato, A. Yoshida, T. Someya, Y. Oda, S. Yoshida, K. Yoshioka, Y. Sato, H. Moriyama, and M. Watanabe, *Physics Open*, **2**, 100010 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physo.2019.100010>]
- [9] D. P. Kim and K. S. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **34**, 44 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2021.34.1.44>]
- [10] K. M. Yoo, J. H. Son, H. M. Jo, S. H. Kang, S. S. Kang, and S. J. Park, *J. Korean Soc. Ind. Conv.*, **23**, 701 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.21289/KSIC.2020.23.4.701>]
- [11] H. W. Park and C. H. Oh, *J. Korean Photodyn. Assoc.*, **4**, 36 (2007).
- [12] H. Yuan, C. Liu, H. Wang, L. Wang, and L. Dai, *Spectrochim. Acta, Part A: Mol. Biomol. Spectrosc.*, **264**, 120251 (2022). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2021.120251>]
- [13] H. M. Lee, H. R. Kim, W. B. Yoon, Y. J. Kim, K. G. Kim, S. K. Kim, H. Yoo, S. H. Lee, M. S. Shin, and K. C. Kwon, *Korean J. Opt. Photon.*, **26**, 23 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.3807/KJOP.2015.26.1.023>]
- [14] M. C. Park, G. C. Go, and H. J. Lee, *J. Korean Oph. Opt. Soc.*, **16**, 357 (2011).
- [15] Y. G. Chung and H. S. Park, *J. Korean Acad.-Ind. Coop. Soc.*, **16**, 4121 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.6.4121>]

ORCID

Jung-Chae Jeong

<https://orcid.org/0000-0001-7557-2853>