

펄스형 Nd:YAG 레이저를 이용한 대면적 디퓨저에 흡착된 폴리머의 세정

윤태림¹, 이영복¹, 안성준^{2*}

¹선문대학교 디스플레이반도체공학과, ²선문대학교 스마트정보통신공학과

Novel Cleaning of the Polymer Adhered to the Large-Area Diffuser Using the Pulsed Nd:YAG Laser

Tae Rym Yoon¹, Young Bok Lee¹, Seong Joon Ahn^{2*}

¹Department of Display Semiconductor Engineering, Sun Moon University

²Department of Smart Information and Communication Engineering, Sun Moon University

요약 반도체 및 디스플레이 소자들의 제작에 사용되는 박막증착 장비들은 주기적으로 챔버 내부에 축적된 폴리머를 제거하는 세정작업을 받아야 한다. 기존의 샌드 블래스트 세정방법은 복잡하고 시간과 비용이 많이 필요할 뿐 아니라 환경오염의 우려가 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 본 연구에서는 적외선 펄스레이저를 이용한 새로운 세정방법을 개발하고, 이를 박막증착 장비 내의 대면적 디퓨저(diffuser)에 흡착되어 있는 ALF 박막을 제거하는데 적용함으로써 그 성능을 평가하였다. 그 결과, 디퓨저의 표면에 잔류하는 불소의 농도는 기존 세정방법보다 50% 정도로 낮아졌고, 또한 세정 후 표면의 거칠기도 50% 이하로 줄어들어 세정과정이 표면에 주는 물리적 손상도 훨씬 작다는 점을 알 수 있었다.

Abstract As one of the important maintenance works, we should remove the polymer film accumulated in the chamber surfaces of the vapor deposition equipment that are used for fabrication of semiconductor and display devices. The sand blast method, that is the conventional method, needs lots of time and cost, not alone with the environmental concerns. To overcome these shortcomings, we have developed a novel cleaning method where the infrared pulsed laser is used as the cleaning tool. When we carried out this new cleaning process to remove the ALF film attached to the surface of the large-area diffuser, the concentration of the remaining fluorine was found to be 50% compared with the value we have got with the conventional method. In addition, the roughness of the diffuser surface has also been reduced by more than half, which demonstrates that the new method imposes much less physical damage to the diffuser surface through the cleaning process.

Keywords : Cleaning Process, Diffuser, EDS, Polymer, Pulsed Nd:YAG Laser, Surface Roughness Tester

1. 서론

디스플레이 패널(panel)과 반도체 소자의 제작을 위하여 많은 공정이 필요하지만, 그중에서도 박막을 증착하는 공정은 디스플레이 패널의 제작에 있어서 매우 중요하다. 박막을 증착하는 장비에는 고진공, 고온을 유지

하여 일정한 두께의 박막을 증착할 수 있는 챔버가 부착되어 있다. 균일한 특성과 두께의 박막을 얻기 위해서는 여러 가지 증착 변수의 최적화가 필요하며 그것들을 원활하게 제어하기 위해서는 챔버를 형성하고 있는 부품들의 품질을 확보하는 것이 가장 우선되어야 한다. 박막을 증착하는 챔버를 구성하고 있는 부품들 중에서 공정 진

본 연구는 2023년도 중소벤처기업부의 기술개발사업 지원에 의한 연구임. [RS-2023-00225634]

*Corresponding Author : Seong Joon Ahn(SunMoon University)

email: sjahn0@gmail.com

Received October 4, 2023

Accepted November 3, 2023

Revised November 1, 2023

Published November 30, 2023

행 시 챔버 내부에 있는 대면적의 부품(디퓨저, 히터, 프레임 등)[1,2] 표면에 폴리머(polymer)가 형성이 되는데 장비의 가동 시간이 증가함에 따라 폴리머가 누적되어 박막 증착의 공정 중에 파티클(particle)을 유발함으로써 불량률을 초래하게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 일정 시간 이상 공정을 진행하면 챔버 내의 부품을 탈거하여 정기적으로 점검하고 보수하는 작업을 한다.

박막을 증착하는 챔버 내부의 대면적 부품들에 누적된 폴리머를 제거하는 일반적인 유지보수(maintenance) 작업은 알갱이(grain)가 작은 모래(bead) 따위를 고압의 공기와 더불어 노즐에서 고속으로 분사하여 부품의 표면에 충돌시켜서 표면을 세정한 다음, 습식 방식으로 잔존 물질들을 제거하고 있다. 샌드 블라스트(모래 분사, sand blast) 방법[3]을 사용할 경우 설비에 대한 투자비용이 높고 유지비용이 지속적으로 발생할 뿐만 아니라 환경오염에 대한 문제점을 내포하고 있기 때문에 대체할 수 있는 차세대 세정공정의 필요성이 강력히 요구되고 있다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하고 보다 친환경적인 세정공정을 실현하기 위하여 폴리머와 반응성이 밀접한 적외선 영역의 펄스형 레이저를 이용한 새로운 방식의 세정공정 기술을 개발하였다. Fig. 1은 레이저에 의한 세정공정의 개념을 도해한 그림이다.

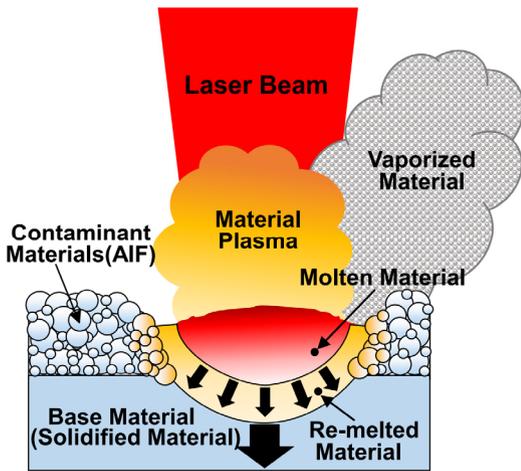


Fig. 1. Schematic of the pulsed-laser cleaning process (melting and vaporization).

2. 실험 방법

2.1 펄스형 Nd:YAG 레이저의 특성

박막증착 챔버 내부의 대면적 부품들에 대한 유지보수

작업의 개선은 친환경적인 산업을 지향해야 하는 4차 산업 시대를 맞이하면서 새로운 공정의 개발을 가속화시키고 있다. 레이저를 이용하여 박막이나 소재를 가공할 경우 기존의 다른 공정을 이용하는 방법에 비해서 공정의 자동화가 용이하고, 가공 시간이 짧아서 단단하고 열에 의한 변형이 쉬운 물질을 쉽게 가공할 수 있는 장점이 있다. 뿐만 아니라 펄스형 레이저를 사용할 경우 열원(heat source)의 펄스폭이 짧아서 열에 민감한 요소(element)를 보호할 수 있으며 가공할 때 레이저 빔을 국소적으로 집속시키기 때문에 에너지가 전달되는 부분이 매우 작아져서 가공 물질의 왜곡(distortion)이나 수축(shrink)을 방지할 수 있는 등 많은 장점을 가지고 있다. 이와 같은 레이저를 이용한 폴리머 세정기술[4]은 기존의 샌드 블라스트 방식보다 훨씬 간편하고 설비에 대한 투자비용이 낮고 단순할 뿐만 아니라 친환경적이다.

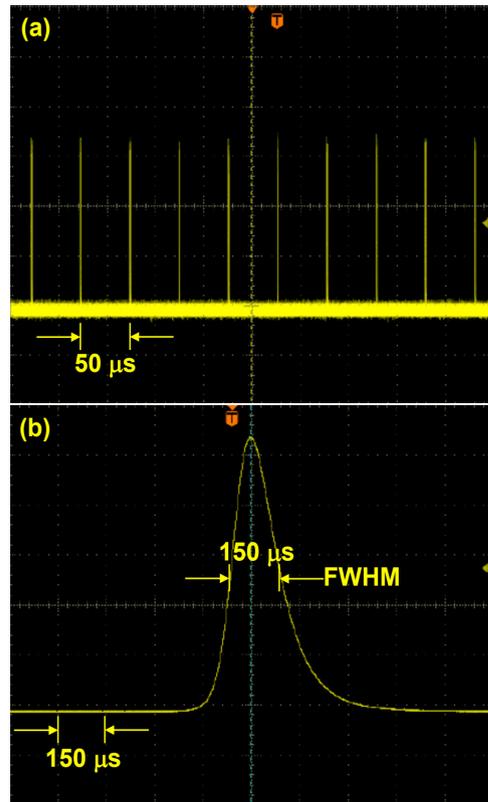


Fig. 2. The waveform of the Nd:YAG laser pulse that was used for the cleaning process. The image was captured by Tektronix storage oscilloscope. (a) pulse repetition rate : 20 kHz (b) FWHM : ~150 μ s.

대부분의 폴리머는 적외선 영역($1.0\sim 1.5\ \mu\text{m}$)의 파장에 적절하게 반응하기 때문에 세정공정의 광원으로 적외선 파장의 레이저를 선택하는 것이 합리적이다[5,6]. 본 연구에서는 최대 출력(power)이 80 W, 반복률(repetition rate)이 20 kHz, 반치폭(FWHM : Full Width Half Maximum)이 $150\ \mu\text{s}$, 파장이 $1.064\ \mu\text{m}$ 인 펄스형 Nd:YAG 레이저[7,8]를 선택하였으며 레이저 빔의 공간적 가공 인자를 원활하게 하기 위하여 로봇 이송기와 광섬유 광 가이드 시스템을 채택하였다. Fig. 2는 세정공정의 광원으로 사용한 Nd:YAG 레이저 펄스를 Tektronix사의 스토리지 오실로스코프로 측정된 파형으로 반치폭이 $150\ \mu\text{s}$ 임을 알 수 있다.

2.2 대면적 디퓨저의 폴리머 세정

레이저 빔을 공간적으로 원활하게 제어하기 위하여 갈바노미터 주사(scanning) 방식[9]과 로봇 이송기(로봇

이송 속도 : $3\ \text{mm/s}$, 로봇 피치 : $100\ \text{mm}$)에 레이저를 탑재하였다. 그리고 AIF 박막(폴리머)이 흡착된 $100\times 100\ \text{mm}^2$ 의 디퓨저(Fig. 3 참조)를 Fig. 4와 같이 여러 개의 블록으로 분할한 다음, 각각의 블록을 line으로 주사하는 방식으로 세정공정을 실시하였다.

세정공정의 진행 후, 시료의 잔류 불순물 함량은 펄스형 Nd:YAG 레이저가 새로운 세정기로서의 가능성과 효능성을 결정하는 중요한 지표가 된다. 따라서, 본 연구에서는 $100\ \text{mm/s}$ 의 레이저 주사 속도로 $100\times 100\ \text{mm}^2$ 크기의 디퓨저에 흡착된 AIF 박막을 제거한 후 EDS(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)[10,11]를 이용하여 시료의 불순물(F : fluorine) 함량을 정량적으로 분석하여 레이저 세정기의 세정능력을 평가하였다.

그리고 세정공정에서 발생하는 물리적 손상의 정도를 평가하기 위하여 샌드 블라스트 공정과 레이저 세정공정으로 시료의 AIF 박막을 제거한 다음, 각각의 공정에 따른 시료의 표면 SEM과 표면거칠기를 분석하여 공정별 시료의 표면거칠기를 정량적으로 비교하고 평가하였다.

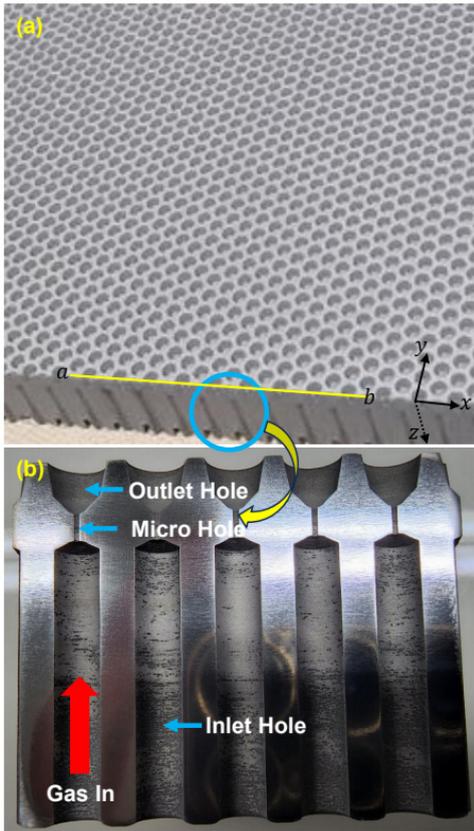


Fig. 3. (a) The large-area diffuser. (b) The cross section view of the diffuser when it was cut from a to b along the z direction (The symbols a , b and z are shown in Fig. 3(a)).

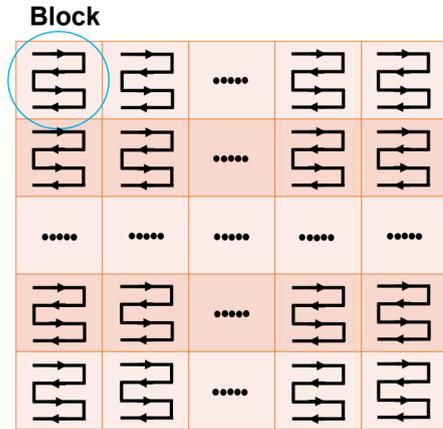


Fig. 4. The scanning schematic diagram of the robot conveyor and galvanometer for the cleaning process.

3. 결과 및 토의

반도체나 디스플레이 제조 장비의 챔버 내에 있는 부품은 일정 사용 시간이 경과 됨에 따라 각 부품의 표면에는 사용된 가스 반응물(폴리머)이 흡착되기 때문에 사용 시간이 지나면 파티클 유발의 원인이 된다. 파티클은 반도체 소자나 디스플레이 패널 제조 공정에서 불량률 초래하기 때문에 적절한 예방 주기를 설정하고 부품을 탈

착하여 유지보수 작업 과정을 거쳐 재사용하게 된다. 유지보수 작업은 건식(blast)과 습식(chemical) 방식으로 진행하지만, 일반적으로 사용하고 있는 방식의 공정에서는 여러 가지 환경 오염의 문제점과 한계점이 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 새로운 방식의 공정인 레이저 세정방식을 채택할 경우, 장비와 부품의 사용 수명이 개선될 뿐만 아니라 생산 효율 또한 증가된다.

대면적 디퓨저에 흡착되어있는 AlF 박막을 제거하기 위하여 레이저의 power를 80 W로 고정시킨 다음 이송용 로봇에 탑재하였다. 시료에 대한 주사와 세정의 효율성(생산성)을 최적화시키기 위하여 로봇의 이송속도와 피치 간격을 3 mm/s와 100 mm로 설정하고 레이저 주사 속도를 100 mm/s로 유지하였다. 세정공정을 실시한 후, EDS로 디퓨저 표면의 잔류 불소(F)를 측정된 결과 3.4~3.7 wt%였다. Fig. 5는 레이저 펄스의 반복률이 1 kHz와 3 kHz일 때 EDS로 측정된 잔류 불소의 농도이다. 이는 기존의 샌드 블래스트 방식으로 세정공정을 진행한 경우의 6.5~7.0 wt% 보다 상당히 개선된 결과로써 펄스형 Nd:YAG 레이저가 새로운 세정공정을 실현할 수 있는 세정기로서의 가능성과 효능성을 입증하는 중요한 지표일 뿐 아니라 세정능력을 검증하는 척도임을 보여주고 있다.

펄스형 레이저를 이용한 세정공정이나 미세 가공을 하기 위해서는 여러 가지의 물리적인 인자들을 고려해야 하겠지만, 그중에서도 가장 중요한 인자 중의 하나가 레이저의 펄스폭과 에너지이다. 레이저 빔과 폴리머, 실리콘, 그리고 금속 등과 같은 물질들 사이의 상호작용에 있어서 레이저 빔의 강도가 $\sim 5.0 \times 10^{10}$ W/cm² 정도 이상이 되면 레이저 빔은 폴리머, 실리콘, 그리고 금속 등과 같은 물질을 녹이기보다 물질의 표면에 플라즈마를 형성하여 물질을 기화시키는 현상이 주된 현상으로 일어나게 된다[12].

본 실험에서 사용한 레이저 빔의 스팟(spot) 크기를 1 μ m 이하로 집속할 경우 파워밀도 영역은 $2.0 \times 10^{12} \sim 2.0 \times 10^{13}$ W/cm²이다. 실리콘의 기화(vaporization) 잠열(1.8×10^6 J/kg)[13,14]을 고려해 볼 때, 실험에서 사용한 파워밀도 영역에서는 시료의 표면이 용융(melting)보다 기화 현상이 주된 상호작용으로 작용하게 됨을 알 수 있다. 레이저를 이용하여 세정공정을 진행할 경우, 고려해야 할 또 하나의 인자는 공정 진행 후 시료의 물리적 손상이다. 물리적 손상은 파티클의 근원이 될 뿐만 아니라 부품들의 수명과 유지보수 작업의 주기를 단축시켜서 장비의 가동율을 저하시키게 된다. 따라서 레이저의 공정 여지(margin)를 용융보다 기화 현상이 주된 상호작용으로 작용할 수 있도록 설정하는 것이 바람직하다.

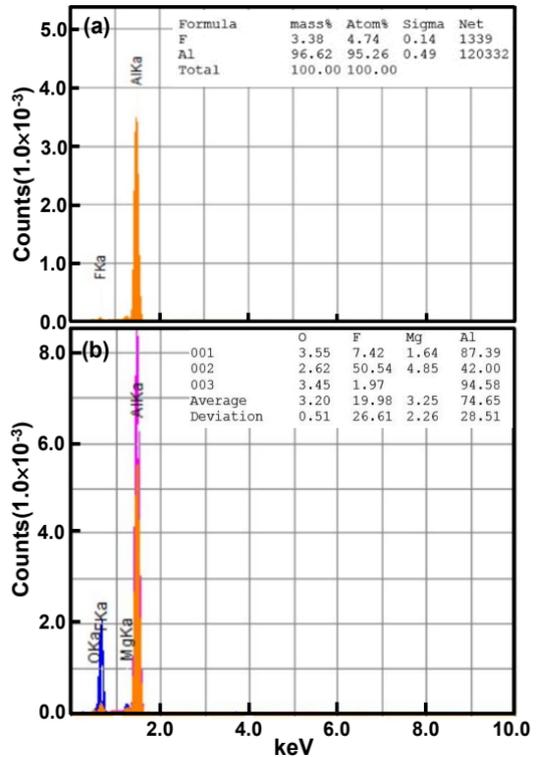


Fig. 5. The concentration of the remaining fluorine after (a) laser cleaning process and (b) sand blast.

본 연구에서는 샌드 블래스트 공정과 레이저 세정공정으로 시료에 흡착된 AlF 박막을 제거한 다음, 각각의 공정에 따른 시료의 표면 SEM과 표면거칠기[15]를 측정하였다. 표면거칠기를 측정하면 시료 표면의 물리적 손상 정도를 알 수 있으며 측정을 위해 Accretech사의 Surfcom 1400G Flatness를 이용하였다(Fig. 6 참조). 표면거칠기는 최고값 거칠기 R_{max} , 제곱평균값을 나타내는 제곱평균 거칠기 R_{rms} , 산술평균값을 표시하는 중심선 거칠기 R_a 등 대부분 세 가지로 표시되는데 본 연구에서는 중심선 거칠기 R_a 를 측정하였다.

샌드 블래스트 공정 후 표면거칠기 값은 5.6 μ m이고 레이저 세정공정을 진행한 다음 측정된 표면거칠기 값은 2.6 μ m로 기존 방식인 샌드 블래스트보다 표면거칠기가 상당히 개선되었음을 알 수 있으며 레이저 세정공정이 샌드 블래스트 공정보다 표면거칠기 관점에서 더 우수하다고 평가할 수 있다.

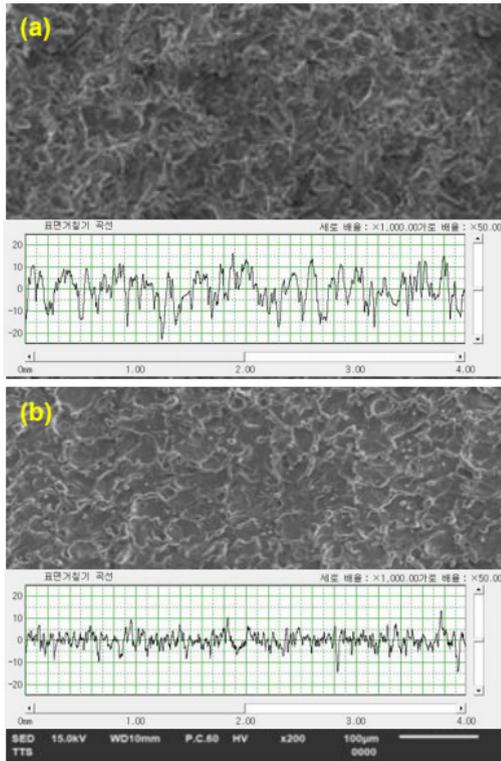


Fig. 6. The surface roughness of the diffuser when it has been cleaned by (a) the conventional sand blast method and (b) the novel pulsed laser cleaning method. The measurements were carried out by the Surfcom 1400G Flatness of Accretech.

4. 결론

디퓨저와 같은 대면적 부품에 대한 기존의 유지보수 방식인 샌드 블래스트 방법은 장비의 투자비용과 유지비용이 높고 환경오염에 대한 문제가 있기 때문에 본 연구에서는 샌드 블래스트 방법을 대체할 수 있는 펄스형 레이저를 이용한 새로운 세정공정 기술을 개발하여 대면적 디퓨저에 적용하여 공정능력을 평가하였다.

- 레이저의 출력을 80 W, 레이저 주사 속도를 100 mm/s로 세정공정을 진행한 결과 디퓨저의 표면 잔류 불소의 농도는 3.4~3.7 wt%로 기존 샌드 블래스트 방식의 6.5~7.0 wt% 보다 현저히 우수하였다.
- 세정공정 진행에서 발생하는 물리적 손상은 부품의 수명과 공정수율에 많은 영향을 주기 때문에 표면 거칠기를 측정하여 세정공정에서 발생하는 물리적

손상의 정도를 평가하였다. 샌드 블래스트 공정의 경우 표면거칠기 값은 5.6 μm 이고 레이저 세정공정을 진행한 다음 측정된 표면거칠기는 2.6 μm 로 샌드 블래스트 세정방식보다 표면거칠기가 상당히 개선되었으며 레이저 세정공정이 샌드 블래스트 공정보다 세정능력이 더 우수하다고 평가할 수 있다.

- 레이저 세정기는 새로운 세정공정을 실현할 수 있는 가능성과 효능성을 입증하였다.

감사의 글

본 연구는 2023년도 중소벤처기업부의 기술개발사업 지원에 의한 연구임 [RS-2023-00225634]

References

- K. H. Kim, K. S. Kim, Y. J. Ji, J. E. Kang, G. Y. Yeom, "Silicon nitride deposited by assisted plasma enhanced chemical vapor deposition for next generation organic electronic devices", *Applied Surface Science*, Vol.541, 148313, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.148313>
- P. Braganca, K. Sodjavi, A. Meslem, I. Nastase, "Passive control strategy for mixing ventilation in heating mode using lobed inserts", *Energy and Buildings*, Vol.133, pp.512-528, Oct. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.023>
- E. Oranli, N. Gungoren, A. H. Astaraee, E. Maleki, S. Bagherifard, M. Guagliano, "Numerical and experimental analysis of sand blasting on polymeric substrates", *Forces in Mechanics*, Vol.12, 100208, June 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.finmec.2023.100208>
- H. Beyer, W. Ross, R. Rudolph, A. Michaelis, J. Uhlenbusch, W. Viöl, "Interaction of CO₂ laser pulses of microsecond duration with Al₂O₃ ceramic substrates", *Journal of Applied Physics*, Vol.70, No.1, pp.75-81, 1991. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.350246>
- S. H. Yu, H. Jeon, H. Ko, J. H. Cha, S. Jeon, M. Jae, G. H. Nam, K. Kim, Y. Gil, K. Lee, D. S. Chung, "Polymer-based semiconductor wafer cleaning: The roles of organic acid, processing solvent, and polymer hydrophobicity", *Chemical Engineering Journal*, Vol.470, 144102, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144102>
- J. Pola, "Thermal reactive modifications of polymer surfaces by infrared laser radiation", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Vol.169, 105819, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2022.105819>

[7] D. E. Ghoochani, F. R. Biglari, H. Pazokian, "Pulsed laser micro-machining of polymer for micro-channel fabrication: Theory and experiment", *Infrared Physics & Technology*, Vol.102, 103068, Oct. 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2019.103068>

[8] M. D. Siena, S. Genna, P. Moretti, G. S. Ponticelli, S. Venettacci, P. Russo, "Study of the laser-material interaction for innovative hybrid structures: Thermo-mechanical characterization of polyethylene-based polymers", *Polymer Testing*, Vol.120, 107947, Feb. 2023.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.107947>

[9] X. Li, B. Liu, X. Mei, W. Wang, X. Wang, X. Li, "Development of an In-Situ Laser Maching System Using a Three-Dimensional Galvanometer Scanner", *Engineering*, Vol.6, pp.68-76, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.07.024>

[10] M. Xue, C. S. Li, "Synthesis and Characterization of Novel ALF₃ Cubes", *Nano*, Vol.10, No.5, 1550071, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1142/S179329201550071X>

[11] S. Shalini, G. L. Samuel, "Ultrafast pulse laser inscription and surface quality characterization of micro-structured silicon wafer", *Journal of Manufacturing Processes*, Vol.62, pp.323-336, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.12.034>

[12] X. Liu, D. Du, G. Mourou, "Laser Ablation and Micromachining with Ultrashort Laser Pulses", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol.33, No.10, pp.1706-1716, Oct. 1997.
DOI: <https://doi.org/10.1109/3.631270>

[13] A. K. Ray, D. Rakshit, K. R. Kumar, H. Gurgenci, "Silicon as high-temperature phase change medium for latent heat storage: A thermo-hydraulic study", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol.46, 101249, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101249>

[14] B. Ren, J. Yang, Y. Li, X. Liu, M. Wang, "Study on release rate of latent heat in Czochralski silicon growth", *Rare Metals*, Vol.25, No.6, pp.51-54, 2006.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S1001-0521\(08\)60051-0](https://doi.org/10.1016/S1001-0521(08)60051-0)

[15] D. Yang, J. Zou, "Precision Analysis of Flatness Measurement Using Laser Tracker", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol.23, No.7, pp.721-732, 2022.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12541-022-00660-z>

윤 태 림(Tae Rym Yoon)

[정회원]



- 2011년 2월 : 호서대학교 생물공학과 (이학사)
- 2016년 8월 : 호서대학교 나노바이오트로닉스공학과 (이학석사)
- 2022년 8월 : 선문대학교 나노과학과 (이학박사)

- 2017년 4월 ~ 2018년 2월 : 한국전자통신연구원 ICT 소재 부품 연구소 위촉연구원
- 2022년 9월 ~ 현재 : 선문대학교 계약제교수

<관심분야>

반도체 공정, 발광체 방열판, 탄소나노튜브 분산 및 소자기술, 탄소나노튜브, X-ray gun

이 영 복(Young-Bok Lee)

[정회원]



- 2011년 2월 : 선문대학교 정보디스플레이학과 (이학사)
- 2014년 2월 : 선문대학교 나노과학과 (이학석사)
- 2023년 8월 : 선문대학교 나노과학과 (이학박사)
- 2023년 10월 ~ 현재 : 선문대학교 차세대반도체기술연구소 연구교수

<관심분야>

반도체, 전자빔, 광학 기술

안 성 준(Seong Joon Ahn)

[정회원]



- 1987년 2월 : 서울대학교 물리학과 (이학사)
- 1989년 2월 : 한국과학기술원 물리학과 (이학석사)
- 1992년 8월 : 한국과학기술원 물리학과 (이학박사)

- 1992년 9월 : 삼성전자 반도체연구소 선임연구원
- 1996년 5월 : 한전전력연구원 선임연구원
- 2002년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 공과대학 스마트정보통신공학과 교수

<관심분야>

반도체 공정, 광섬유 통신 및 센서, 전자빔 기술, 레이저 미세가공