

# 임피던스 센서 제작을 위한 잉크젯 기반 IDE 패턴 적층공정 최적화 연구

정현윤\*, 고정범\*,#

\*한국생산기술연구원

## A Study on Optimization of Inkjet-based IDE Pattern Process for Impedance Sensor

Hyeon-Yun Jeong\*, Jeong-Beom Ko\*\*#

\*Korea Institute of Industrial Technology, KITECH

(Received 09 February 2022; received in revised form 22 February 2022; accepted 07 March 2022)

### ABSTRACT

At present, it is possible to manufacture electrodes down to several micrometers ( $\sim \mu\text{m}$ ) using inkjet printing technology owing to the development of precision ejection heads. Inkjet printing technology is also used in the manufacturing of bio-sensors, electronic sensors, and flexible displays. To reduce the difference between the electrode design/simulation performance and actual printing pattern performance, it is necessary to analyze and optimize the processable area of the ink material, which is a fluid. In this study, process optimization was conducted to manufacture an IDE pattern and fabricate an impedance sensor. A total of 25 IDE patterns were produced, with five for each lamination process. Electrode line width and height changes were measured by stacking the designed IDE pattern with a nanoparticle-based conductive ink multilayer. Furthermore, the optimal process area for securing a performance close to the design result was analyzed through impedance and capacitance. It was observed that the increase in the height of stack layer 4 was the lowest at 4.106%, and the increase in capacitance was measured to be the highest at 44.08%. The proposed stacking process pattern, which is optimized in terms of uniformity, reproducibility, and performance, can be efficiently applied to bio-applications such as biomaterial sensing with an impedance sensor.

**Keywords :** Ink Jet(잉크젯), Interdigitated Electrode(평면형 미세전극), Multilayer(다층), Optimization(최적화)

### 1. 서 론

지금까지 미세 패터닝 공정이 요구되는 바이오 센서, 전기·화학적 센서, 정밀 전자 부품 소자, 디스플레이 등 전자산업 분야에는 photo-lithography

공정이 주로 사용되어져 왔다. 그러나 장비 도입과 원자재 공급비용에 대한 증가로 공정 단가가 상대적으로 높아 저가형 소자 생산에 대한 제조사들의 경제적 부담이 높아지고 있다.<sup>[1]</sup> 이에 따라 photo-lithography 공정 기술을 대체할 수 있는 미세 패터닝 기술로 잉크젯, 스크린, R2R(roll-to-roll) 등의 프린팅 기술을 이용한 저가형 대량생산 공정 기술 개발이 활발히 이루어지고 있다. 특히 잉크젯

# Corresponding Author : no1kori@kitech.re.kr

Tel: +82-064-754-1515, Fax: +82-064-754-1540

프린팅 기술을 이용한 센서 및 전자 부품 소자 생산 분야는 소재, 헤드, 대량생산 핵심기술 확보 측면에서 많은 연구가 진행되었으며, 높은 공정효율과 친환경성 등을 특징으로 하고 있다.

잉크젯 프린팅 기술은 기존 photo-lithography 공정과 대비하여 생산 공정 단계를 획기적으로 단축시켜 생산원가 절감과 동시에 원자재 낭비나 폐수 발생과 같은 화학적인 오염을 최소화 할 수 있다는 측면에서 바이오센서 및 전자소자 산업분야에 도입되고 있다. 또한, 정밀 토출 헤드의 개발을 통해 수 마이크로미터( $\sim\mu\text{m}$ ) 단위까지 전극제조가 가능할 정도로 발전되고 있으며, 이를 통한 바이오 및 전자센서, 유연 디스플레이 제조에도 활용되고 있다.<sup>[2]</sup>

바이오센서 및 전자소자 제조 과정에 활용되고 있는 잉크젯 프린팅의 기술적 핵심 요소는 피코리터급(pl) 액적을 토출할 수 있는 프린트 헤드 기술이다.<sup>[3]</sup> 헤드는 제어신호의 전압 크기와 펄스 폭 등의 조건 제어로 액적을 토출하여 기판상에 고정밀도의 마이크로( $\mu\text{m}$ )전극을 형성하는 역할을 한다. 잉크젯 헤드의 미세액적 토출 기술은 스크린, R2R과 같은 기존의 프린팅 기술에서 직면하는 선평과 두께의 한계를 극복할 수 있어 많은 연구가 진행되고 있다.

잉크젯 프린팅에서는 수십 피코리터급(pl)의 노즐을 통해 전도성 잉크가 토출된다.<sup>[4]</sup> 전도성 잉크는 나노 금속 입자나 전도성 폴리머가 솔벤트에 분산되어 있는 소재로 마이크로전극과 같은 각종 전자소자 제조에 주로 사용되며, 소재별로 물성이 상이하여 잉크별로 공정분석을 통해 잉크 및 기판 소재에 따라 전극의 형상이 일정하게 유지될 수 있는 연구가 필요하다. 최근 전도성 잉크를 이용한 고성능 마이크로전극 개발로 소재 함량 변화에 따른 헤드 제어 기술이 제안되고 있다.<sup>[5]</sup>

잉크젯 프린팅의 헤드 정밀도와 제어기술의 향상으로 고정밀도의 입력 및 검출 기능을 갖춘 마이크로전극 기반 임피던스 센서 개발이 활발하게 진행되고 있다. 임피던스 센서는 감지 전극 사이에 배치된 분석대상물과 상호작용을 통해 발생하는 신호를 전기·광학적 신호로 변환시켜 측정하는 장치로써, 높은 감도와 빠른 응답성을 특징으로 한다.

특히 두 쌍의 마이크로전극이 맞물린 평면형 구조의 IDE(interdigitated electrode) 패턴을 기반으로 하는 임피던스 센서는 전극 사이의 좁은 간격으로 기존의 커패시터보다 주파수 응답과 속도 성능이 높아 가장 많이 활용되고 있는 구조이다.<sup>[6]</sup> 이러한 구조의 나노, 마이크로 크기의 물질 감지가 가능하며 성능 제어가 용이한 구조적 특징으로 민감도 향상이 비교적 쉽다.

잉크젯 프린팅 기반 임피던스 센서의 민감도, 신뢰성 등 전기적 성능 확보를 위해서는 마이크로전극의 설계 및 구성을 바탕으로 인쇄 공정의 높은 균일도 및 재현성, 재료의 전기·물리적 물성 확보 등이 핵심이다.<sup>[7]</sup> 특히 전극의 설계·시뮬레이션 성능과 실제 프린팅 패턴 성능간의 차이를 줄이기 위해서는 유체인 잉크소재의 공정 가능 영역을 분석하고 최적화하는 과정이 필요하다.

본 논문에서는 임피던스 센서 제작을 위해 IDE 패턴 제조에 필요한 공정 최적화 연구를 진행하였다. 특히 IDE 패턴 성능이 설계수치와 유사하도록 전도성 잉크 적층 공정을 통해 안정성과 재현성을 확보하였다. 나노 입자 기반의 전도성 잉크를 레이어별로 적층하여 전극 선평 및 높이 변화를 측정하였고, 임피던스와 커패시턴스 분석을 통해 설계 결과와 근접한 성능을 확보할 수 있는 최적 공정 영역을 분석하였다.

## 2. 잉크젯 패턴링 공정 최적화

### 2.1 미세전극 공정 최적화

연속 적층 공정을 최적화하기 위해서 Table. 1과 같이 토출 조건을 설정하였다. 잉크의 함량, 점도, 표면장력 등을 고려하여 최적의 cartridge temperature와 meniscus setpoint 값을 설정하였다. Tickle control 주파수 설정을 통해 전도성 잉크에 연속적으로 가해지는 토출 전압 주기를 제어하여 전극 패턴링 공정을 안정화하였다. Drop spacing과 plate temperature를 같이 조절하여 전극 가장자리가 높아지는 현상을 최소화하였다.<sup>[8]</sup> 또한, 정밀한 패턴 구현을 위해 drop watcher로 가장 안정화된 노즐을 선택하였고, jetting voltage를 조절하여 최적의 액적 토출이 가능하도록 하였다. 그리고 cartridge print

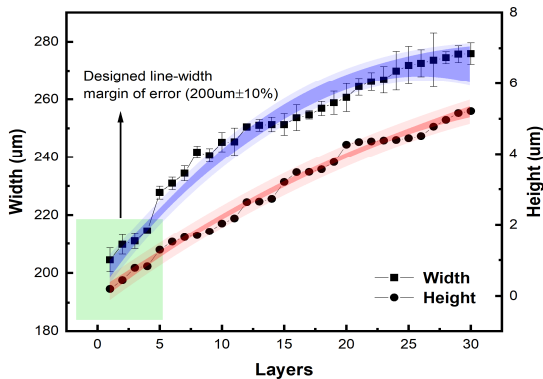
height 조절을 통해 건조되지 않은 잉크가 기판에 번지는 현상을 방지하였다.

IDE 패턴의 선행연구로 길이 3mm, 폭 200um의 싱글전극을 이용해서 Table 1의 토출 조건으로 적층공정 최적화 실험을 진행하였다. 적층 공정의 최적화 기준은 설계 선폭에 대해 ± 10% 내 근접하는 것을 목표로 하였다. Fig. 1은 전극의 선폭 및 높이 측정 결과로, 1~4번 적층된 layer가 선폭의 오차범위 내에 해당됨을 확인하였다.

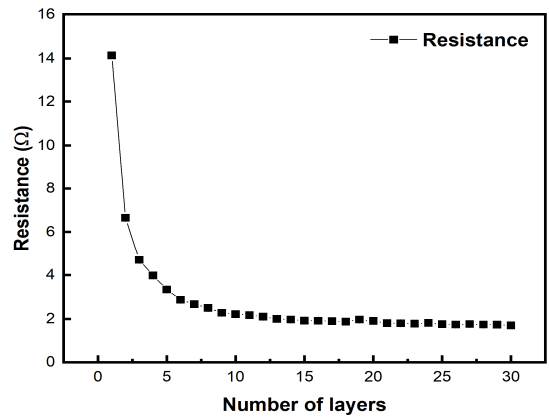
Fig. 2는 전도도 측정 결과로 저항의 변화율은 1번에서 2번 적층된 layer가 53%, 2번에서 3번 적층된 layer가 29.53%, 3번에서 4번 적층된 layer가 15.17%, 4번에서 5번 적층된 layer가 16.12%로 3번에서 4번 적층된 layer의 변화율이 가장 낮았다. 3번에서 4번

**Table 1 Printing parameter for electrode**

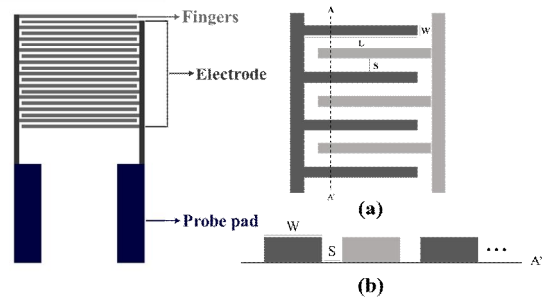
Printing parameter	Value
Substrate thickness	125 um
Tickle control	5 kHz
Plate temperature	50 °C
Cartridge temperature	30 °C
Jetting voltage	14.20 V
Cartridge print height	0.7 mm
Meniscus setpoint(inches $H_2O$ )	2.5
Number of nozzles to use	1 ea
Drop spacing	25 um



**Fig. 1 Height and line width of single electrode by multilayer**



**Fig. 2 Resistance of single electrode by multilayer**



**Fig. 3 (a) Top and (b) A-A' section views design of IDE**

적층된 layer부터 저항의 변화율이 안정적으로 감소 되었으며, 최종적으로 수렴하는 결과가 나타났다.<sup>[9]</sup> Single 전극 공정 분석 결과, 높이 대비 전도도와 설계 선폭에 대한 오차범위를 만족하는 4개의 결과 중 3, 4번과 근접한 적층 조건이 IDE 패턴 제작을 위한 최적 조건임을 알 수 있다.

## 2.2 IDE 패턴 설계 및 공정

IDE 패턴의 단면적은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.<sup>[10]</sup>

$$A = n_d L (W + 2H) \quad (1)$$

Fig. 3에서  $n_d$ ,  $H$ ,  $W$ ,  $L$ ,  $S$  는 각각 전극 쌍의 수, 높이, 선폭, 핑거의 길이, 간격이다. IDE 패턴의

커패시턴스는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.<sup>[11]</sup>

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{S} \quad (2)$$

여기서  $\epsilon_0$ ,  $\epsilon_r$ , 각각 진공 유전율, 전극 사이의 상대유전율이다.  $\epsilon_r$ 은 primer 전처리된 PEN film으로 1.6의 상대유전율로 계산 하였다. IDE 패턴의 길이는 총 7.65mm × 15mm로 전극간의 간격(S)는 150um, 선폭(W)는 200um, 핑거의 길이(L)는 6.9mm 그리고 프로브용 패드 1.6mm × 6mm를 포함하며, 10개의 쌍을 이루는 미세전극을 배열한 평면구조로 설계하였다. 설계된 전극 샘플은 공정 별로 5개씩 총 25개 제작하였다. 설계된 전극의 수치를 식 (1), (2)에 대입하여 커패시턴스 값을 도출하였고, 이론적 수치와 실제 측정값을 통해 성능 분석을 진행하였다.

전극 제작에 필요한 전도성 잉크는 ANP(advanced nano products)사의 DGP-40LT-15C를 사용하였다. 전도성 잉크의 금속 함량은 30.28%로 점도 14.58, 표면장력 35.04이다. Fujifilm사의 미세 패터닝 공정 장비 DMP-2850를 통해 125um 두께의 primer처리된 PEN 기판 상에 Table 1의 미세전극 공정 최적화 조건에 의해 5번까지 적층 패터닝하였다.

적층된 전극은 두께에 따라 소결에 필요한 에너지량이 다르다. 하지만 기존의 열소결 방식은 기판이 변형될 가능성이 높아 이에 맞는 소결공정이 필요하다.<sup>[12]</sup> 따라서 광에너지를 조사하여 급속 열처리 하는 기술인 IPL(intense pulsed light)을 통해 소결하였다. 고강도의 펄스를 선택적으로 조사하여 짧은 소결시간과 기판에 미치는 영향이 적은 공정으로, 적층된 전극을 기판의 손상 없이 소결하였다. IPL 소결의 공정 조건은 전도성 잉크에 최적화된 열소결 조건 120℃ 30분의 에너지인 약 10J를 기준으로 안정화된 소결이 이루어질 때까지 1J씩 감소시키며 4J의 최적화된 광에너지량을 도출하였다.<sup>[13]</sup>

소결된 전극의 높이 및 선폭을 3차원 미세형상 측정 장치로 측정하였다. 임피던스와 커패시턴스 값은 Semiconductor Device Parameter Analyzer (B1500A)를 이용하여 측정하였다.

### 2.3 IDE 패턴 형상 측정

Fig. 4는 전극 적층 횟수에 따른 높이 변화를 나타낸다. Layer가 증가할수록 전극의 가장자리가 높게 패터닝 되는 현상이 감소하는 것을 볼 수 있으며, 전극 표면의 구조적 균일성은 전극 표면에서 전하 이동을 용이하게 한다.<sup>[14]</sup> 5번 적층된 layer에서는 기존의 패턴들보다 형상이 급격하게 변화하였다. 전극의 평균 높이를 측정하였을 때, 3, 4번 적층된 layer가 828nm, 862nm로 높이가 34nm 증가하였으며, 증가에 대한 변화율이 4.106%로 다른 layer들보다 낮게 측정되었다.

Fig. 5는 IDE 패턴의 3D 형상이다. 3D 이미지는 기관과 전극의 영역을 명확하게 표시한다. Fig. 5를 통해 높이를 표시함으로써 전극이 균일하고 손상되지 않게 배열된 것을 확인하였다.

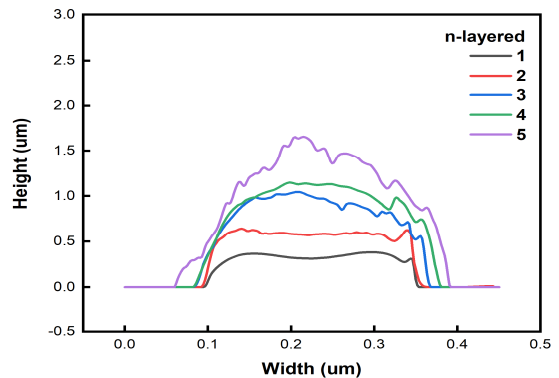


Fig. 4 Height of printed IDE by multilayer

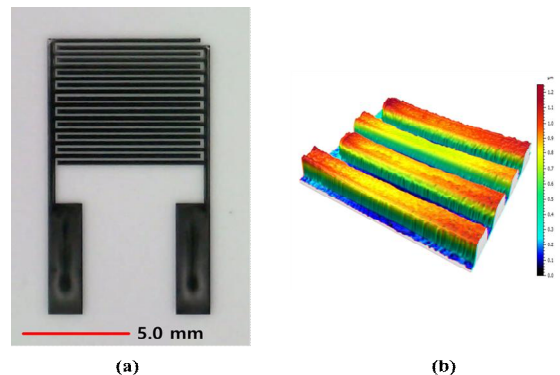


Fig. 5 (a) Scope and (b) 3D images of printed IDE

### 3. IDE 패턴 성능 분석

#### 3.1 임피던스 및 커패시턴스 측정

Fig. 6은 주파수 증가에 대한 1~5번 적층된 layer의 임피던스 크기의 변화를 보여준다. 2, 3번 적층된 layer의 임피던스 값은 거의 일치하였고, 1번 적층된 layer와 20kHz에서 70kHz 영역에서 계속 감소하다 수렴하였다. 4, 5번 적층된 layer는 1, 2, 3 번 적층된 layer와 감소 영역이 1kHz 차이로 19kHz에서 69kHz 영역에서 감소하다 수렴하였다. 1, 2, 3번 적층된 layer와 4, 5번 적층된 layer는 감소하는 영역이 미세한 차이만을 보였지만, 임피던스 값은 3번에서 4번 적층된 layer로 증가할 때 85MΩ과 56MΩ으로 크게 감소하였다.

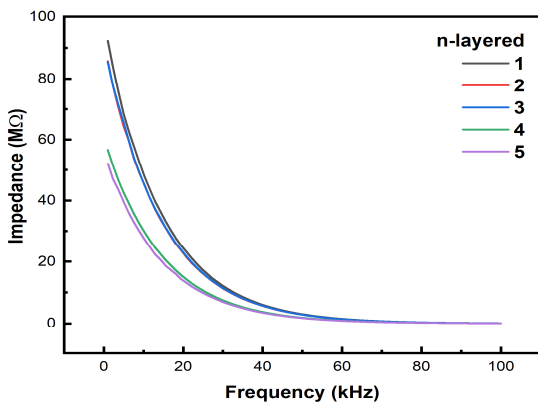


Fig. 6 Impedance of printed IDE by multilayer

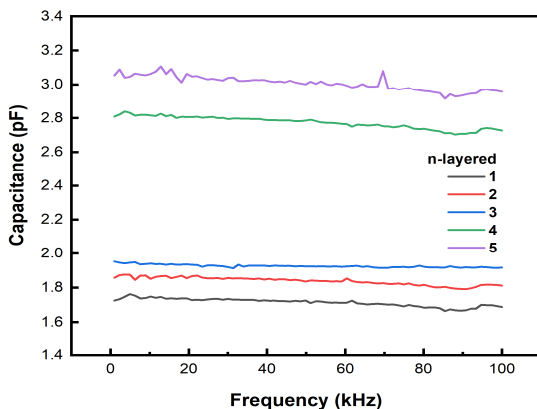


Fig. 7 Capacitance of printed IDE by multilayer

Fig. 7은 주파수 증가에 대한 1~5번 적층된 layer의 커패시턴스 변화를 보여준다. Layer 수 증가에 따라 커패시턴스 값이 증가하였으며, 3번 적층된 layer에서 4번 적층된 layer로 증가할 때 변화량이 44.08%로 가장 높았다. 또한, 4, 5번 적층된 layer가 가장 우수한 커패시턴스 값을 나타냈지만, 5번 적층된 layer가 4번 적층된 layer보다 비교적 불안정한 그래프를 보였다.

또한, 커패시턴스의 이론적 수치와 측정값을 1번 적층된 layer를 통해 비교한 결과, 이론치와 차이가 0.011 pF이었으며, 0.68%의 오차범위 내에 있었다.

#### 3.2 결과 및 고찰

전극 분석 결과, layer 수 증가에 따라 임피던스 및 커패시턴스 크기가 예상했던 수치와 근접하게 측정되었다. 4, 5번 적층된 layer가 가장 이상적인 수치를 나타냈지만, 5번 적층된 layer는 Fig. 7의 커패시턴스 측정 결과에서 비교적 불안정한 값을 보였으며, Fig. 4에서 전극 형상의 균일도 및 프린팅 공정의 재현성이 눈에 띄게 떨어진 것을 확인하였다. 또한, 4번 적층된 layer의 높이 증가량은 4.106%로 가장 낮았으며, 커패시턴스 증가량이 44.08%로 가장 높게 측정 되어 높이 대비 커패시턴스 증가비가 가장 높아 최적화 조건에 적합하였다. 4번 적층 공정된 IDE 패턴을 이론값과 비교한 결과, 측정값과 근사치를 보여 공정 최적화됨을 알 수 있었다.

### 4. 결론

잉크젯 기술은 기존의 프린팅 기술에서 직면하는 선폭과 두께의 한계를 극복할 수 있어 바이오센서, 전자 부품 소자 분야에서 활발히 응용되고 있다. 하지만 잉크젯 기술의 전기적 성능 확보를 위해서는 공정 가능 영역을 분석하고 최적화 하는 과정이 필요하다.

본 연구는 잉크젯 프린팅 기술을 이용한 IDE 패턴 최적 공정 영역을 분석하고자 하였다. 전도성 잉크를 사용하여 적층 공정된 전극의 높이, 선폭 변화에 대한 임피던스 및 커패시턴스의 변화 측정을 통해 예상했던 수치와 가장 근접한 IDE 패턴을 찾아냈다. 균일성, 재현성, 성능 부분에서 최적화된 적층 공정

패턴은 임피던스 센서로써, 생체 물질 감지와 같은 바이오 응용 분야에 효율적으로 적용 가능할 것으로 예상된다.

고감도 및 빠른 응답시간을 특징으로 하는 바이오센서는 생체분자 검출 시 발생하는 전류의 변화량을 뚜렷하게 구별하는 것을 목표로 한다. 최근 고분자, 폴리머, 등 전류 변환 감지에 우수한 전도성 소재의 개발로 경쟁력을 가지는 고감도 바이오센서 개발이 요구되고 있다. 따라서 전도성 물질의 적층형 패턴 최적 공정 영역 분석 및 항원-항체 증착을 통한 바이오센서로서의 성능 검증을 추후 연구에서 진행하고자 한다.

또한, 미세전극 적층두께 제어 최적화 연구를 바탕으로 센서 감도에 영향을 줄 수 있는 소재 물성 연구, 선폭제어 최적화 연구를 추가로 진행하고자 한다.

## 후 기

본 논문은 한국생산기술연구원 기관주요사업 “2022년 청정 생산 공정기술 기반 스마트 웰니스케어 핵심기술 개발사업(4/5) (kitech EH-22-0001)”의 지원으로 수행한 연구입니다.

## REFERENCES

- Kim, S. S., Kim, D. S., Lee, W. H., Shin, D. Y., Kim, C. H., “Ink-jet Printing Technology for Paradigm Shift in Mass Production,” *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 23, no. 8, pp. 15–21, Aug. 2006.
- Al-Halhouli, A., Al-Ghussain, L., El Bouri, S., Liu, H. and Zheng, D. “Fabrication and Evaluation of a Novel Non-Invasive Stretchable and Wearable Respiratory Rate Sensor Based on Silver Nanoparticles Using Inkjet Printing Technology,” *Polymers*, Vol. 11, No. 9, 2019.
- Kim, Y. K., Yoon, S. J., Park, J. A., Jung, S. J. “Inkjet-Based Bioprinting,” *Polymer Science and Technology*, Vol. 26, No. 5, October 2015.
- Cheng, et al, “Ink Jet Printing, Self Assembled Polyelectrolytes, and Electroless Plating: Low Cost Fabrication of Circuits on a Flexible Substrate at Room Temperature, 2005, *Macromolecular Rapid Communications*, Wiley Online Library.” (accessed Nov. 12, 2021).
- Bernasconi, R., Brovelli, S., Viviani, P., Soldo, M., Giusti, D. and Magagnin, L. “Piezoelectric Drop-On-Demand Inkjet Printing of High-Viscosity Inks,” *Advanced Engineering Materials*, p. 2100733, 2021.
- Ehret, R., Baumann, W., Brischwein, M., Schwinde, A., Stegbauer, K. and Wolf, B. “Monitoring of cellular behaviour by impedance measurements on interdigitated electrode structures,” *Biosensors and Bioelectronics*, Vol. 12, No. 1, pp. 29–41, Jan. 1997.
- Martinez Domingo, C. “Inkjet-printed devices for chemical and biosensing applications,” Ph.D. Thesis, Universitat Autònoma de Barcelona, 2018. Accessed: Feb. 08, 2022.
- Slabov, V., Vinogradov, A. V. and Yakovlev, A. V. “Inkjet printing of specular holograms based on a coffee-ring effect concave structure,” *Journal of Materials Chemistry C*, Vol. 6, No. 19, pp. 5269–5277, 2018.
- Jeong, H. Y., Ko, J. B., Oh, G. Y., Park, S. H. “A Study on Optimized Biosensor Microelectrode Fabrication by Inkjet Printing,” *The Korean Society Of Manufacturing Process Engineers*, pp. 374, 2021.
- Dizon, A. and Orazem, M. E. “On the impedance response of interdigitated electrodes,” *Electrochimica Acta*, Vol. 327, p. 135000, 2019.
- Jung, H.-W., Chang, Y. W., Lee, G., Cho, S., Kang, M.-J. and Pyun, J. C. “A capacitive biosensor based on an interdigitated electrode with nanoislands,” *Analytica Chimica Acta*, Vol. 844, pp. 27–34, Sep. 2014.
- Hwang, H.-J. et al., “Rapid Pulsed Light Sintering of Silver Nanowires on Woven Polyester for personal thermal management with enhanced performance, durability and

cost-effectiveness,” *Sci Rep*, Vol. 8, No. 1, p. 17159, Nov. 2018.

13. Jeong, H. Y., and Ko, J. B., “A Study on the Optimization of Microelectrode Light Sintering Process for IDT Sensor Production,” *Korean Society for Precision Engineering*, pp. 476-477, 2021.
14. Tunesi, M. M. et al., “Functionalised CuO nanostructures for the detection of organophosphorus pesticides: A non-enzymatic inhibition approach coupled with nano-scale electrode engineering to improve electrode sensitivity,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 260, pp. 480 - 489, 2018.