

대량 생산에 적합한 고효율 저비용 유연 신경 프로브

¹이해윤, ²이승준, ²이지민, ²추남선*, ¹신효근*,

¹ 경북대학교 전자전기공학부, 대한민국 대구광역시,

² 한국뇌연구원 정서·인지질환 연구그룹, 대한민국 대구광역시

E-mail: Hyogeun Shin (hyogeunshin@knu.ac.kr), Namsun Chou (nschou@kbri.re.kr)

A highly efficient low-cost flexible neural probe for scalable mass fabrication

¹Haeyun Lee, ¹Seungjun Lee, ²Jimin Lee, ²Namsun Chou* and ¹Hyogeun Shin*

¹School of Electronics and Electrical Engineering, Kyungpook National University, Daegu, Republic of Korea,

²Emotion, Cognition & Behavior Research Group, Korea Brain Research Institute (KBRI), Daegu, Republic of Korea

Abstract

Neural probes for precise brain signal recording and control are crucial for brain-computer interfaces and neuroscience research. However, high semiconductor fabrication costs and complex packaging have hindered the adoption of traditional probes. We introduce a highly efficient flexible neural probe, produced for just \$2 per unit, enabling mass production (1,000 units in 3 days). Designed with a standardized flexible PCB process, it ensures scalability, minimizes performance variation, and simplifies packaging. Featuring four independent probes for multi-region targeting and a reusable interface PCB, the device offers comparable performance to silicon-based probes, supporting eight electrodes for simultaneous recordings. We anticipate that our innovative device will significantly improve neuroscience research accessibility.

Keywords: *Flexible neural probe(유연 신경 프로브), Low-cost(저비용), scalable mass fabrication(대량 생산 가능), flexible PCB(유연 인쇄회로기판), extracellular recording(세포 외 기록)*

1. 서론

뉴런 수준에서 전기 신호를 정확하게 기록하고 제어할 수 있는 침습적 도구의 발전은 뇌 연구의 새로운 시대를 열었습니다. 그 중에서도 신경 프로브는 뇌 영역 간의 연결성 탐구와 뇌-컴퓨터 인터페이스(BCI) 구축을 위해 필수적인 도구입니다 [1]. 그러나 현재 신경 프로브의 제작에는 고가의 반도체 공정과 노동집약적인 패키징 과정이 요구되며, 칩당 최소 450달러의 비용이 발생합니다 [2]. 신경 프로브는 일회용 제품이기 때문에 높은 비용은 접근성을 크게 제한하며, 경직된 실리콘(Si) 기반 프로브는 쉽게 부러질 수 있어 신경 생리학적 연구를 수행할 때 연구자들이 매우 신중하게 다뤄야 합니다.

신경 프로브의 복잡한 제조 공정을 간략화하고, 제작 비용을 절감하기 위해, 우리는 초 저비용, 고효율 신경

프로브를 제안합니다 (그림. 1). 본 프로브의 장점은 다음과 같습니다. 1) 칩당 약 2달러의 낮은 생산 비용, 2) 대량 생산 가능성, 3) 유연하고 재사용 가능한 구조, 4) 여러 뇌 영역을 동시에 타겟팅 가능합니다. 유연 인쇄회로기판(FPCB) 공정을 사용하여 생산 비용이 기존의 1/200로 절감되었으며, 3일 내에 1,000개 이상의 프로브를 대량 생산할 수 있습니다. 기존 장치와 유사한 성능을 보이는 본 프로브는, 신경과학 연구의 접근성을 크게 향상시키고 신경과학의 발전에 기여할 것입니다.

2. 본론

2.1 저비용 유연 신경 프로브 개발

본 연구의 주요 성과는 신경 프로브의 성능을 유지하면서도 생산 비용을 대폭 절감한 점에 있습니다. 목표를 달성하기 위해, 우리는 FPCB 공정과 호환되는 새로운 공정을 설계하였습니다. 이를 통해 프로브의 두께를 100 μm 에서 35 μm 로 줄일 수 있었으며, 회로는 규칙을 만족하는 최소 크기로 설계되었습니다. 최종적으로 제작된 프로브의 크기는 폭 550 μm , 두께 35 μm , 길이 32 mm 였습니다 (표. 1). 본 프로브는 일반적인 소동물용 Si 기반 프로브(약 6 mm)보다 훨씬 길어서, 원하는 뇌 영역에 선택적으로 삽입할 수 있습니다. 또한, 추가적인 패키징 없이 인터페이스 보드에 프로브를 30초 이내에 직접 연결 가능합니다. 이러한 간소화된 공정은 제작 기간을 3일로 단축시켜 대량 생산을 가능하게 합니다. 최종적으로 제작된 장치는 각각 2개의 전극이 포함된 유연한 신경 프로브 4개를 포함하며, 뇌의 서로 다른 네 영역에서 동시에 신호를 측정할 수 있습니다.

2.2 Black Pt 전기도금

전극 성능 개선을 위한 Black Pt 전기 도금 [3]이 본 연구의 유일한 수작업 공정이었었습니다 (그림. 2). Au 전극은 1 kHz에서 평균 임피던스가 $313.14 \pm 24.38 \text{ k}\Omega$ 로 나타났으며, 도금 후 전극의 평균 임피던스는 $12.15 \pm 2.41 \text{ k}\Omega$ 로 30배 감소하였습니다. 이로써 전극의 기록 성능을 대폭 개선할 수 있었습니다.

3. 결론

우리는 칩당 약 2달러의 낮은 생산 비용과 간소화된 패키징 공정을 갖춘 고효율 유연 신경 프로브를 성공적으로 개발했습니다. 본 프로브는 3일이라는 짧은 제작 시간 덕분에 대량 생산에 매우 적합합니다. 또한, in vivo 실험 결과를 통해 (그림. 3) 이 신경 프로브의 신호 기록 성능이 기존의 실리콘(Si) 기반 신경 프로브와 유사하다는 점과 여러 뇌 영역에서 동시에 신호를 측정할 수 있는 확장성을 성공적으로 입증했습니다 (그림. 4).

생체 적합성 재료를 이용한 표면 코팅 기술을 탐구하여 체내 장기 기록 안정성을 보장하고 [4], 양면 전극 구조를 도입하여 기록의 공간 해상도를 향상시킨다면 신경과학 연구에 더욱 이바지할 수 있을 것입니다. 결론적으로, 이 고효율 유연 신경 프로브는 비용 효율성과 대량 생산 가능성을 바탕으로 신경과학 연구의 발전에 크게 기여할 잠재력을 가지고 있습니다.

감사의글

본 연구는 2024년도 경북대학교 교내연구비의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

1. J. Luo, N. Xue, and J. Chen, **Journal** A Review: Research Progress of Neural Probes for Brain Research and Brain-Computer Interface, *Biosensors*, vol. 12, no. 12, p. 1167 (Dec. 2022)
2. H. Shin et al., **Journal** Multifunctional multi-shank neural probe for investigating and modulating long-range neural circuits in vivo, *Nature Communications*, vol. 10, no. 1, (Aug. 2019)
3. H. Shin, S.-W. Jeong, Ju Hyun Lee, W. Sun, N. Choi, and I.-J. Cho, **Journal** 3D high-density microelectrode array with optical stimulation and drug delivery for investigating neural circuit dynamics, *Nature Communications*, vol. 12, no. 1 (Jan. 2021)
4. Y. Lee, H. Shin, D. Lee, S. Choi, I. Cho, and J. Seo, **Journal** A Lubricated Nonimmunogenic Neural Probe for Acute Insertion Trauma Minimization and Long-Term Signal Recording, *Advanced Science*, vol. 8, no. 15 (Jun. 2021)

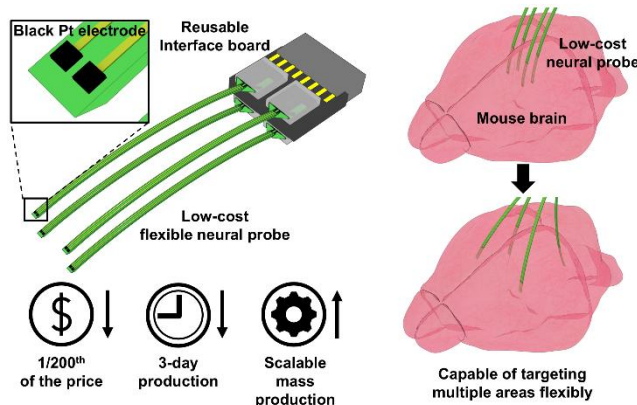


그림. 1 저비용 고효율 유연 신경 프로브

표. 1 본 프로브와 상용 신경 프로브의 특성 비교

	This work	NeuroNexus (A1-16)
Substrate	Polyimide (Flexible)	Silicon (Very brittle)
Young's modulus	2 GPa	130 GPa
Dimension	Width 550 μm , Thickness 35 μm	Width 100 μm , Thickness 15 μm or 50 μm
Stiffness	$4.91 \times 10^{-9} \text{ N} \cdot \text{m}^2$	$3.66 \times 10^{-9} \text{ N} \cdot \text{m}^2$ (for 15 μm thickness)
# of electrodes	8	16
# of recording sites	4	1
Electrode	Black Pt, 30 μm round (~300 k Ω) Au, 30 μm round (~10 k Ω)	Ir, 15 μm round (~400 k Ω)
Cost per unit	\$2	At least \$450
Packaging steps	1 (Optional)	4

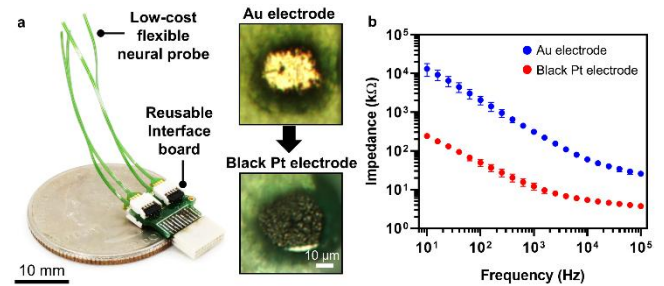


그림. 2 (a) Black Pt 도금 전극과 (b) 도금 전후 전극의 임피던스 특성

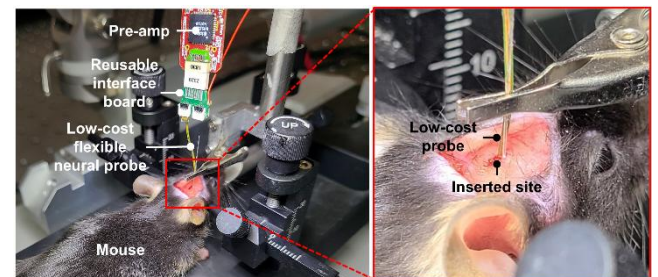


그림. 3 in vivo 기록 실험

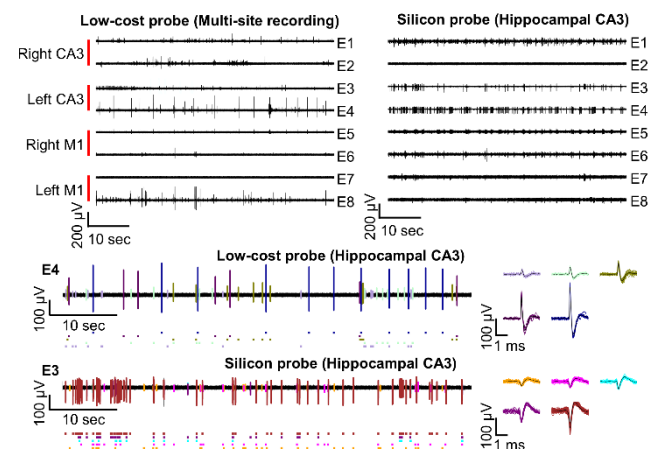


그림. 4 저비용 고효율 프로브와 Si 프로브의 기록 성능 비교