

# 평판형 반도체 미세전극 어레이 제작 및 이를 이용한 무척추 동물의 말초신경다발 신호기록

황은정, 윤태환, 김성준  
서울대학교 전기공학부

## Fabrication of Planar-type Semiconductor Microelectrode Array and Its Application to Peripheral Nerve of Invertebrates

E. J. Hwang, T. H. Yoon, and S. J. Kim  
School of Electrical Engineering, Seoul National University

### ABSTRACT

A planar-type silicon microelectrode array has been fabricated and used successfully in obtaining simultaneous multichannel recordings from peripheral nerve of invertebrates. This paper demonstrates that planar-type semiconductor electrode arrays are useful for studying traveling wave properties of action potential.

### 서론

말초신경다발 활동전위 측정에는 주로 금속 hook 또는 cuff electrode가 이용되어왔다. Hook electrode는 텅스텐 등을 구부려 갈고리 모양으로 만든 후 신경다발을 걸어 신경신호를 재는 전극으로 주로 단채널용으로 많이 쓰여왔다. Implant용으로 자주 사용된 cuff electrode는 나선모양으로 신경다발을 감싼 절연막 안쪽으로 미세전극이 형성되어 있어 신경다발의 신호를 측정하는데, 제작방법이 까다롭고 재현성이 낮다는 단점이 있다. 다중채널의 신경신호 측정용으로 재현성과 정밀성이 좋은 반도체 전극이 제작되고 신경생리학에 유용하게 활용되고 있으나, 이들은 주로 탐침구조로서 뇌피질이나 척수등에 삽입용으로, 신경다발의 활동전위 측정에는 부적당하다[1]. 본 논문에서는 신경다발에 적용하기 쉬운 구조의 반도체 전극 어레이를 제작하여 무척추동물 신경다발에 직접 도입해 다중채널 신경신호 기록에 활용한 과정 및 결과를 보인다.

### 본론

#### 1. 제작 과정

평판형 반도체 미세전극은 기존의 반도체 공정 기술을 이용하여 간단히 제작하였다. 먼저 실리콘 기판에 열산화막을 1000 Å 기르고 질화막을 LPCVD로 2000 Å, 그 위에 산화막을 8000 Å PECVD로

증착시켜 실리콘 기판과의 절연막을 형성한다. 전극 사이트, 본딩 패드 및 이를 연결하는 금속 패턴은 photoresist를 먼저 패터닝한 후 크롬-금을 각각 1000Å, 3000 Å 기상증착하여 liftoff하였다. 체액에 노출되었을 때 이온 침투를 막기 위하여 금속 패턴 위의 상층 절연막은 PECVD로 산화막, 질화막, 산화막(2000/2000/8000 Å)의 3중막을 올린 후, 전극 사이트와 본딩 패드 부분만 건식 식각으로 개방하였다. 전극의 단면은 그림1과 같다. 외부 회로와의 연결이 쉽도록 전치증폭기의 입력단으로의 콘넥터가 조립된 PCB기판과 전극을 와이어 본딩한 후 'L'자로 micro-manipulator에 부착한다.

#### 2. 본 실험에 사용된 전극어레이의 특징

본 실험에 사용된 전극어레이는 금으로 이루어진  $200 \times 200 \mu\text{m}^2$  및  $500 \times 500 \mu\text{m}^2$  사이트 10개가  $800 \mu\text{m}$  간격으로 일직선상에 배열되어있고 전체 칩 사이즈는  $1 \times 1 \text{cm}$ 이다. 반도체 전극은 사이트의 크기, 배열, 간격, 개수 등을 실험의 목적에 맞도록 자유롭게 구성할 수 있으며 dimension 조절이 정밀하므로 다중채널간의 상대위치를 정확하게 파악할 수 있다. 본 전극의 체액과의 계면 임피던스는  $200 \times 200 \mu\text{m}^2$  사이트의 경우 1kHz에서 56kΩ, 위상은 약  $60^\circ$ 이다. 백금이나 이리듐 사이트에 비해 임피던스가 크지만 무척추 동물의 신경신호 측정에는 무리가 없다. 다음의 동물 실험 결과는 본 전극어레이가 신경신호 기록에 적합함을 보여준다.

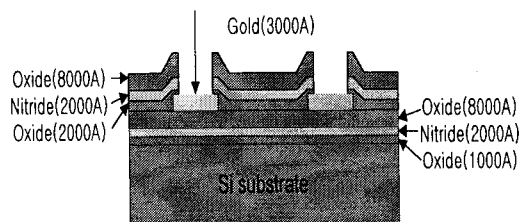


그림 1 본 연구에서 제작된 반도체 미세전극 어레이의 단면구조

3. 동물 실험

가재의 medial giant 신경은 감각신경과 운동신경들의 다발로서 직경이 약 200-450  $\mu\text{m}$ 에 이른다[2]. 가재의 배 부분의 연결 조직을 얇게 벗겨내어 가슴 부위에서 꼬리까지 길게 배 가운데로 지나가는 giant nerve를 유리피펫으로 골라내어 반도체 전극 어레이 위에 건다. 전극과 신경사이의 임피던스가 감소하도록 마이크로스테이지에 연결된 전극을 위로 당겨서 밀착시킨다. 이 때 레퍼런스 전극은 가재의 몸체가 담긴 체액에 둔다. 반도체 전극 어레이 중 8개의 사이트와 레퍼런스 전극사이의 신호 차이를 8채널 AC coupled 전치증폭기로 50배, 후치증폭기로 20배 증폭하여 300-6kHz의 대역통과필터를 통과시켰다. 이 중 가장 멀리 떨어져있는 2채널은 digitize하여 자기테이프에 영구 저장하였다.

그림2는 가재의 꼬리부분을 유리막대로 건드렸을 때 medial giant nerve의 자극에 대한 반응을 기록한 8 채널 중 가장 멀리 떨어져있는  $200 \times 200 \mu\text{m}^2$  사이트 2 채널의 신호이다. 측정된 활동전위는 진폭이 약 100  $\mu\text{V}$ 이고 신호대잡음비가 약 10-14 dB로서 신호검출에 충분하다. 또한 전극어레이의 일직선상에 신경다발을 위치시켰기 때문에 동시에 측정된 각 채널간의 신호를 비교하면 활동전위의 진행파(traveling wave)특성을 관찰할 수 있다. 활동전위는 잡음 또는 artifact와는 달리 모든 채널에서 나타나면서 채널간의 delay가 보인다. 따라서 일직선상의 어레이에서 측정된 활동전위의 피크사이의 시간을 재면 활동전위의 전달속도(conduction velocity)를 계산할 수 있다. 그림2의 경우 2채널간의 간격이 9mm이고 피크사이의 delay가 1.5ms이므로 전달속도는 약 6m/s이다. 자극을 가하지 않고 자발적인 활동전위의 경우 양방향의 신호(꼬리를 향하여 전달되는 신호와 머리를 향하여 전달되는 신호)가 모두 관찰된다.

그림3은  $500 \times 500 \mu\text{m}^2$  전극사이트에서 측정한 신호이다. 사이트 크기가 커지면서 접촉하는 신경의 수가 증가하면서 복합활동전위(compound action potential, CAP)의 특징을 보여준다. CAP를 이루는 각 활동전위들은 전달속도 다르므로 진행하면서 빠른 신호와 느린 신호가 분리되는데, 그림은 이러한 특징을 잘 보여주고 있다. 빠른 유닛들은 약 40m/s, 느린 유닛들은 12m/s의 전달속도를 보인다.

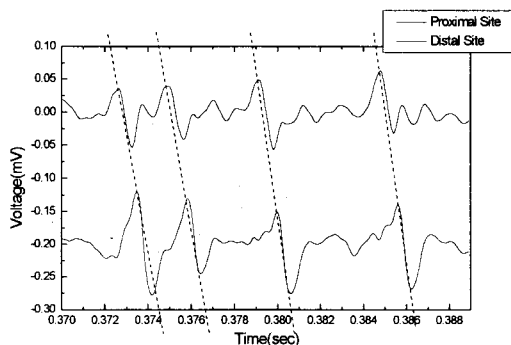


그림 2 가재의 꼬리 자극에 대한 medial giant nerve에서의 2채널 활동전위 기록 (2채널은 9mm 간격의  $200 \times 200 \mu\text{m}^2$  사이트)

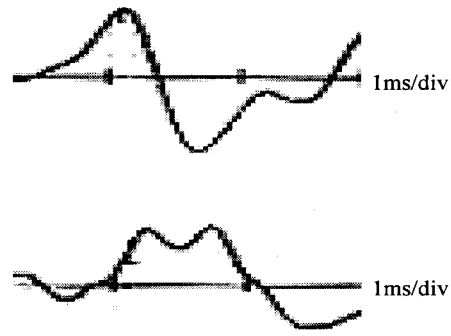


그림 3 가재의 꼬리자극에 대한 복합활동전위(CAP) 위 파형이 진행하면서 아래파형으로 변형됨

토 의

본 연구에서 제작한 반도체 미세전극어레이는 무척추 동물의 신경다발에서 성공적인 신호기록을 수행함으로써 반도체 전극의 효용성을 보였다. 그런데 이 전극은  $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ 로서 단일 유닛 신호 기록용으로는 비교적 큰 면적이다. 단일 유닛 신호에 대한 선별성을 높이기 위해서는 전극의 크기를 줄여야하는데 전극면적이 줄어들면 전극-체액 계면 임피던스가 커져 신호대잡음비가 줄어든다. 본 실험에서 기상증착된 금전극 사이트의 경우  $100 \times 100 \mu\text{m}^2$  이하가 될 경우 임피던스가 수백 k $\Omega$  이상이 되어 신호 특성이 나빠진다. 따라서 더 미세한 전극이 필요할 경우 금전극에 백금 도금을 하든지, 활성화된 이리듐 등을 도입하거나 실리콘 마이크로머시닝 기술을 이용하여 전극과 신경이 밀착하는 전극 구조를 만들어 임피던스를 낮추는 방안이 필요하다.[3]

참 고 문 헌

[1] 황은정, 김성준, 조하원, 오우택, "반도체 미세전극을 이용한 말초신경계에서의 신경신호 기록", '97 대한의용생체공학회 추계학술회의, 제 19권 2호, pp. 31-34  
 [2] S. Kim, M. Kim and W. Heetderks, "Laser-Induced Fabrication of a Trans-substrated Microelectrode Array and Its Neurophysiological Performance" IEEE Trans. Biomed. Eng., Vol. 32, No. 7, p.497, 1985  
 [3] G.T. Kovacs, C.W. Stormont, M. Halks-Miller, C.R. Belczynski, Jr. C. Della Santina, E. R. Lewis and N. I. Maluf, "Silicon-Substrate Microelectrode Arrays for Parallel Recording of Neural Activity in Peripheral and Cranial Nerves," IEEE, Trans. Biomed. Eng., Vol. 41, pp567-576, June,1994