

알루미늄 박판의 다단 전해식각 공정을 이용한 3 차원 마이크로 구조물의 제작

김윤지* · 윤세찬* · 한 원* · 조영호† · 박호준** · 장병규** · 오용수**

* 한국과학기술원, 바이오및뇌공학과, ** 삼성전기 중앙 R&D 연구소, AM 랩

Three-Dimensional Microstructures Fabricated by Multi-Step Electrochemical Aluminum-Foil Etching

Yoonji Kim*, Sechan Youn*, Won Han*, Young-Ho Cho†, HoJoon Park**, ByeungGyu Chang** and YongSoo Oh**

* Dept. of Bio and Brain Engineering, KAIST,

** Advanced Materials Laboratory, Central R&D Institute, Samsung Electromechanics

(Received March 3, 2010 ; Revised September 10, 2010; Accepted October 8, 2010)

Key Words : Multi-step Electrochemical Etching(다단 전해식각), 3D Microstructure(3 차원 마이크로 구조물), Aluminum-foil(알루미늄 박판), Micro Probe(마이크로 프로브)

초록: 본 논문에서는 알루미늄 박판의 다단 전해식각을 공정을 이용한 3 차원 마이크로 구조물 제작방법을 제안한다. 본 공정은 기존 전해가공 공정들에 비해 3 차원 구조물의 대량생산이 용이하며, 기존 3 차원 마이크로 금속 구조물의 제작을 위한 다단 도금방법에 비해 간단하고, 경제적인 뿐만 아니라, 성형된 금속 박판을 이용하므로 구조물의 물성이 안정적이다. 본 논문에서는 단일 전해식각 공정을 통한 2 차원 외팔보 열과 다단 전해식각 공정을 통한 3 차원 마이크로 구조물의 제작을 수행하였다. 단일 전해식각 공정에서 평균 수직방향 식각률 $1.50 \pm 0.10 \mu\text{m}/\text{min}$ 와 평균 수평방향 식각률 $0.77 \pm 0.03 \mu\text{m}/\text{min}$ 을 얻었으며, 이를 이용한 3 차원 마이크로 구조물을 제작한 결과, 수직방향으로 $15.5 \pm 5.8 \%$, 수평방향으로 $3.3 \pm 0.9 \%$ 의 제작오차와 $37.4 \pm 9.6 \text{ nm}$ 의 표면조도를 보였다.

Abstract: We present a simple, cost-effective, and fast fabrication process for three-dimensional (3D) microstructures; this process is based on multi-step electrochemical etching of metal foils which facilitates the mass production of 3D microstructures. Compared to electroplating, this process maintains uniform and well-controlled material properties of the microstructure. In the experimental study, we perform single-step electrochemical etching of aluminum foils for the fabrication of 2D cantilever arrays. In the single-step etching, the depth etch rate and bias etch rate are measured as $1.50 \pm 0.10 \mu\text{m}/\text{min}$ and $0.77 \pm 0.03 \mu\text{m}/\text{min}$, respectively. Using the results of single-step etching, we perform two-step electrochemical etching for 3D microstructures with probe tips on cantilevers. The errors in height and lateral fabrication in the case of the fabricated structures are $15.5 \pm 5.8\%$ and $3.3 \pm 0.9\%$, respectively; the surface roughness is $37.4 \pm 9.6 \text{ nm}$.

- 기호설명 -

1. 서론

d : 수직방향 식각깊이
 w : 개방선폭
 w' : 수평방향 식각너비

최근 3 차원 마이크로 금속 구조물은 반도체 검사용 프로브카드,⁽¹⁾ 생체정보수집을 위한 바이오 프로브⁽²⁾ 및 원자현미경 프로브⁽³⁾ 등 다양한 분야에서 그 수요가 증가하고 있다. 이러한 3 차원 마이크로 금속 구조물의 제작을 위한 대표적인 가공 공정은 다단 도금방법이다. 다단 도금방법⁽⁴⁾은 seed layer 증착, PR 패터닝, 도금, CMP 등 4 단계로

† Corresponding Author, nanosys@kaist.ac.kr
© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

이루어진 층별 형성공정을 반복하여 3 차원 형상의 마이크로 금속 구조물을 제작하는 방법이다. 다만 도금에 의한 3 차원 마이크로 금속 구조물 제작방법은 공정 단계가 복잡하여 공정시간이 오래 소요는 단점이 있다. 또한 도금 구조물의 물성은 공정조건에 민감하여 물성의 안정성과 재현성을 유지하기 어려우며, 각 층의 도금 사이의 CMP 공정에 의해 금속 층간의 접착력의 약화를 초래할 수 있다.

또한 마이크로 금속 구조물을 제작하는 방법으로 전해가공 방법⁽⁵⁻⁸⁾이 있다. 마스크를 사용하지 않는 전해가공의 경우, 노즐을 이용하여 마스크없이 3 차원 마이크로 구조물을 제작할 수 있으나, 대량생산이 어려우며, 마스크를 사용한 방법의 경우, 대량생산은 가능하나, 다양한 모양의 3 차원 마이크로 구조물을 제작하는데 한계가 있다.

이에 본 논문에서는 기존 마스크를 이용한 단일 전해식각을 통한 간단한 마이크로 구조물 제작 연구에서 한 단계 더 나아가 다단 전해식각을 통한 3 차원 구조물 대량생산 할 수 있는 방법을 처음으로 시도했다. 이 방법은 다단 도금공정과 달리 PR 패터닝, 전해식각 및 식각보호막인 PR 제거 등 3 단계를 거쳐 구조물을 가공하므로 다단 도금 방법에 비해 seed layer 증착 및 CMP 과정이 불필요하며 공정시간이 단축된다. 뿐만 아니라 일반 산업용 알루미늄 박판을 사용하므로 경제적이며, 다른 금속 박판도 사용 가능하며, 성형된 금속 박판을 식각하여 구조물을 얻으므로 물성이 안정적이고 잔류응력⁽⁹⁾이 적다는 장점이 있다.

본 논문에서는 알루미늄 박판의 선택적 다단 전해식각을 통한 3 차원 마이크로 금속 구조물 제작 방법을 제안하고, 이를 통해 마이크로 프로브 열을 제작하여 3 차원 마이크로 금속 구조물을 제작할 수 있음을 입증하였다.

2. 전해식각의 원리 및 실험장치 구성

2.1 전해식각의 원리 및 공정특성

전해식각은 전기-화학적 반응을 이용한 식각 방법 중의 하나로 Fig. 1(a)과 같이 전해액이 든 비커에 양극에는 금속박판을 음극에는 탄소 전극을 두고 전류를 흘려주면, 양극에서는 산화반응, 음극에서는 환원반응이 일어나면서 양극의 금속을 용해하는 방법이다. 양극에서 금속이 용해되는 양은 Faraday's law 에 따라 계산할 수 있고, 전류 또는 시간의 변화를 통해 조절 가능하다.

전해식각은 전압과 전류밀도에 따라 분극곡선⁽¹⁰⁾의 특성을 보인다. 이 곡선은 3 가지 영역으로 나뉘는데 I 영역은 식각영역(Etching), II 영역은 식각과 연마가 동시에 진행되는 전해연마 영역(Etching and Polishing), 마지막으로 III 영역은 식각과 핏팅영역(Etching and pitting)이다. 본 논문에서는 금속 박판에 식각보호막을 형성하고 II 영역의 전해연마 영역을 이용하여 선택적으로 식각을 하였다.

Fig. 2 는 금속박판 위에 식각보호막인 PR 을 도포하여 패터닝한 상태에서 전해식각에 의한 식각 단면을 나타낸다. 금속 박판을 선택적으로 전해식각 할 때, 그 단면 형상은 초기에는 cavity 식각단면^(11,12)을 보이다가, 시간이 흘러 박판이 관통되기 시작하면 관통식각단면^(11,12)을 보인다. 금속 박판의 노출된 곳에서부터 깊이 방향으로 식각되는 것을 수직방향 식각(Etch depth), 식각보호막 아래 측면으로 식각되는 것을 수평방향 식각(Etch bias)이라 하며 Etch factor(EF)는 수직방향 식각(Etch depth)와 수평방향 식각(Etch bias)의 비로 표현된다.

$$Etch\ depth = d \tag{1}$$

$$Etch\ bias = (w'-w)/2 \tag{2}$$

$$Etch\ factor\ (EF) = (Etch\ depth)/(Etch\ bias) \tag{3}$$

본 논문에서는 1 차 전해식각인 cavity 식각을 통하여 프로브의 팁 형태를 구현하고, 2 차 전해식각인 관통

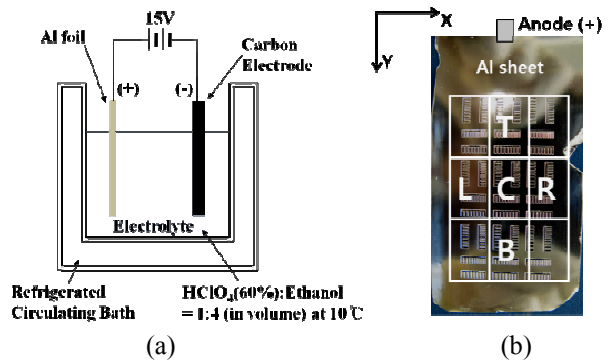


Fig. 1 Experimental apparatus: (a) Schematic view of experimental setup; (b) Five different pattern positions in Al specimen

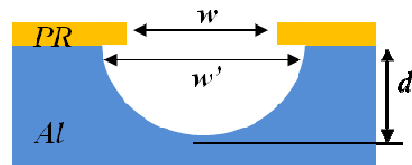


Fig. 2 Schematic showing the etch profile

식각으로 마이크로 외팔보를 형성하여 최종적으로 3 차원 마이크로 프로브를 제작하였다.

2.2 실험장치 구성

Fig. 1(a)는 전해식각을 위한 실험장치의 구성도이다. 본 실험장치는 HClO₄ (60%)와 에탄올의 혼합액(부피비 1:4, 10°C)⁽¹³⁾으로 이루어진 전해액과

알루미늄 박판(양극), 탄소전극(음극)으로 구성되며, 15V의 직류전압을 공급하였다. 금속 박판(Fig. 1(b))은 일반 산업계에서 사용되는 순도 99.5%의 알루미늄(1050)을 사용하였다.

3. 단일 전해식각 공정

3.1 2 차원 외팔보 열의 설계 및 공정

제작하고자 하는 2 차원 외팔보는 너비 300 μm, 길이 1,500 μm이며, 보 간격(40~200 μm)에 따른 수직방향 식각속도 차이를 보기위한 사전 실험결과, 보간격 60 μm 이상에서 수직방향 식각속도가 안정적이며 점차적으로 증가하는 경향을 보였다. 이러한 경향에 따라 본 논문에서는 보간격을 500 μm로 설계하였다.

우선 초음파 수조에서 아세톤 세척을 통해 알루미늄 박판의 윤활유 성분을 제거하고, 박판의 준비를 마친다. 선택적 식각을 위하여 준비된 박판 위에 식각보호막(SU-8)을 도포하고 외팔보를 패터닝한다. 그리고 Fig. 1(a)와 같이 금속박막을 관통 식각한다. 마지막으로 SU-8 stripper (Remover PG) 및 집착 테잎을 이용하여 식각보호막인 SU-8 을 제거하여 2 차원 외팔보 열 제작을 완료하였다.

3.2 공정특성 및 결과분석

3.2.1 전해식각의 균일성 분석

Fig. 3 은 선택적으로 패터닝된 식각보호막으로 덮인 알루미늄 박판을 1 시간동안 전해식각 공정을 진행하는 도중 매 10 분마다 측정된 알루미늄 박판내 패턴(Fig. 1(b))의 위치별 수직 방향 식각깊이를 보여준다. 이때 금속 박판의 x 축을 따라 위치하는 세

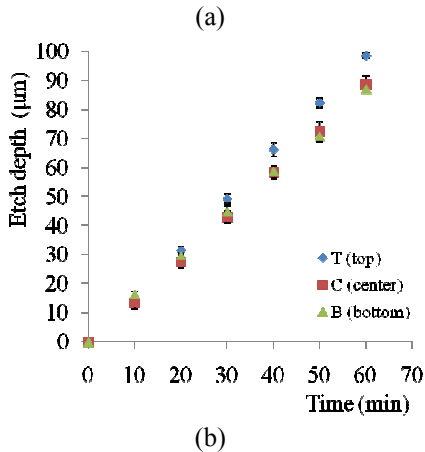
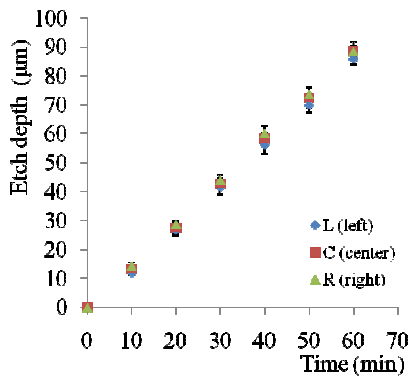


Fig. 3 Etch depth at 5 different positions of Fig.1(b) in aluminum foil: (a) Etch depth at 3 different positions along x-axis; (b) Etch depth at 3 different positions along y-axis

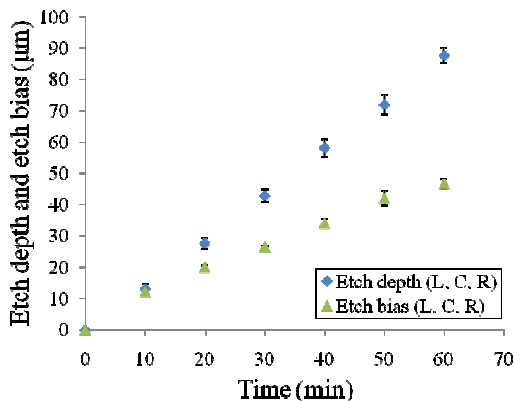


Fig. 4 Measured etch depth and etch bias depending on etch time

Table 1 Dimensions and fabrication errors of the micro probe array

Etch step	Dimension		Designed dimension [μm]	Fabricated dimension [μm]	Fabrication error [%]
1st etch step (40min.)	Tip	Diameter (D _t)	80	80.3±3.9	3.5
		Height (H _t)	60	71.8±8.8	19.6
2nd etch step (90min.)	Cantilever	Width (W _c)	210	205.0±5.8	2.4
		Length (L _c)	1,410	1,467.5±24.7	4.1
		Height (H _c)	90	80.8±3.9	11.4
Height fabrication error [%]					15.5±5.8
Lateral fabrication error [%]					3.3±0.9

영역 (L, C, R) 의 평균 수직방향 식각률이 $1.47 \pm 0.02 \mu\text{m}/\text{min}$, y 축을 따라 위치하는 세 영역 (T, C, B)의 평균 수직방향 식각률이 $1.52 \pm 0.13 \mu\text{m}/\text{min}$ 로 측정되었다. 모든 영역 (L, C, R, T, B)의 평균 수직방향 식각률은 $1.50 \pm 0.10 \mu\text{m}/\text{min}$ 이었다.

3.2.2 수직/수평방향 식각깊이와의 상관관계 분석

Fig. 4 는 1 시간의 전해식각 동안 시간에 따라 측정된 x 축 위의 패턴들의 수직방향 식각깊이와 수평방향 식각깊이를 보여준다. 이로부터 시간에 따른 EF 를 구하여 본 결과, 식각 10 분 후 EF 가 1.08 에서 식각 60 분 후 EF 가 1.83 이 되면서 시간이 흐를수록 수직도가 점점 좋아짐을 알 수 있다.

3.2.3 표면조도의 AFM 분석

초기 알루미늄 박판의 표면 조도와 전면 전해연마 후 조도를 AFM(XE-120)으로 측정 한 결과, 초기 $154.7 \pm 52.7 \text{ nm}$ 에서 $19.71 \pm 4.33 \text{ nm}$ 로 개선되었다. 단일 전해식각 이후, 표면을 AFM 으로 측정 한 결과, 표면조도는 $25.5 \pm 5.2 \text{ nm}$ 로 측정되었다. 이를 통해서 전해식각 도중 초기 거칠었던 금속 박판의 식각과 연마가 동시에 일어나 표면조도를 개선하면서 마이크로 구조물을 제작할 수 있음을 보였다.

3.3 이론 및 실험의 비교·토의

실험 결과 알루미늄 박판의 y 축 방향에 위치한 패턴 식각률의 표준편차가 $0.13 \mu\text{m}/\text{min}$, x 축 방향에 위치한 패턴 식각률의 표준편차는 $0.02 \mu\text{m}/\text{min}$ 로 축의 방향에 따라 그 표준편차가 6 배 넘게 차이 나는 것을 보였다. 특히 y 축 방향의 윗영역이 아랫영역보다 더 빠른 식각률을 보였으며, 이와 같이 y 축 방향으로 식각률 차이를 보이는 것은 전해식각 시 형성되는 부산물로 인한 금속 박판 표면의 확산층(Diffusion layer)⁽¹⁴⁾이 중력에 의해 하강 하는 현상의 영향으로 판단된다. 전해식각의 균일 성을 위해서 두 전극을 지면과 평행하게 배치 를 한다면, 확산층은 중력의 영향을 끌고루 받아 금속박판 전극이 위치에 상관없이 균일한 전해식각 반응을 얻을 수 있다.

4. 다단 전해식각 공정

4.1 3 차원 마이크로 프로브 열의 설계 및 공정

단일 식각공정에서 얻은 식각 특성을 바탕으로 2 단계 전해식각을 통한 3 차원 마이크로 프로브 열을 설계·제작하였다. 단일 전해식각 공정에서 측

정된 시간에 따른 수직/수평방향 식각깊이와의 관계를 고려하여 식각 마스크의 치수를 아래의 식을 따라 설계하였다.

$$(Mask\ Width) = (Structure\ Width) + 2 \times (Expected\ Etch\ Bias) \quad (4)$$

Fig. 5 는 2 단계 전해식각을 통한 3 차원 마이크로 프로브 열 제작을 위한 과정을 나타내며, Fig. 6 은 프로브 열 제작을 위한 2 가지 식각 마스크를 간략히 나타낸 것이다. 먼저 단일 전해식각을 통한 2

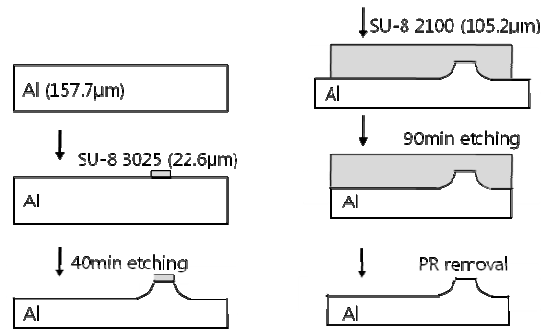


Fig. 5 Multi-step electrochemical etching process: (a) 1st step for tip definition; (b) 2nd step for cantilever fabrication

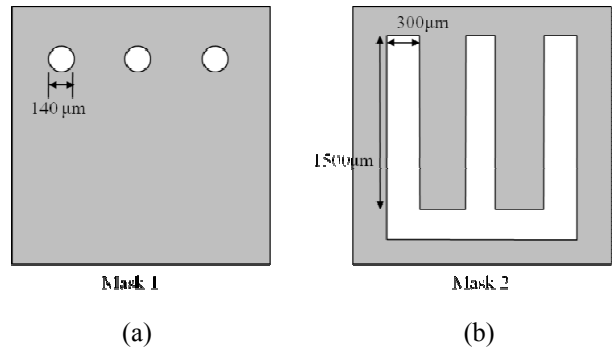


Fig. 6 Two-step etch mask for probe structure: (a) 1st negative mask for tip definition; (b) 2nd negative mask for cantilever fabrication

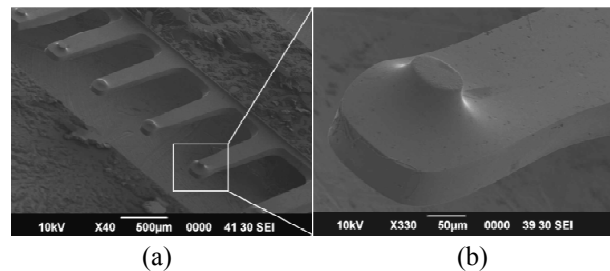


Fig. 7 SEM image of the fabricated probe structure: (a) Fabricated probe array; (b) Enlarged view of the tip

차원 구조물 제작과 똑같이 금속박판을 준비한다. 금속 박판에 프로브의 팁 형상(Fig. 6(a))을 SU-8 PR 식각보호막으로 패터닝하여 원하는 깊이만큼 1 차 전해식각하고, SU-8 stripper 및 접착 테이프를 이용하여 제거함으로써 팁 형상을 만든다. 그리고 팁 형상 위에 SU-8 PR 식각보호막으로 외팔보 형상(Fig. 6(b))을 패터닝하여 프로브의 팁 형상을 보호하면서 외팔보가 고립될 때까지 2 차 전해식각한 후 SU-8 stripper 및 접착 테이프를 이용하여 식각 보호막인 SU-8 을 제거함으로써 Fig. 7 의 3 차원 마이크로 프로브 열의 제작을 완료하였다.

4.2 공정특성 및 결과분석

4.2.1 제작한 마이크로 프로브 열의 형상 분석

2 단 전해식각을 통하여 제작한 3 차원 마이크로 프로브 열은 Fig. 8 에 보인 바와 같다. 제작된 프로브 팁의 지름과 높이는 각각 $80.8\pm 3.3 \mu\text{m}$, $71.8\pm 8.8 \mu\text{m}$ 이었으며, 2 차 전해식각으로 형성된 외팔보의 너비, 길이 및 높이는 각각 $205.0\pm 5.8 \mu\text{m}$, $1,467.0\pm 24.7 \mu\text{m}$, $80.3\pm 3.9 \mu\text{m}$ 으로 초기 설계한 치수에 비하여 수직방향 및 수평방향 치수는 각각 $15.5\pm 5.8 \%$, $3.3\pm 0.9 \%$ 의 제작오차를 보였다.

4.2.2 표면조도의 AFM 분석

AFM 을 이용하여 표면 조도를 측정할 결과, 알루미늄 박판의 초기 조도 $154.7\pm 52.7 \text{ nm}$ 에서 2 차 전해식각 후는 $37.4\pm 9.6 \text{ nm}$ 로 초기에 비해 확연히 개선됨을 확인하였다. 그러나 금속 박판의 양면 전해연마 직후의 조도가 $19.7\pm 4.3 \text{ nm}$, 1 차 전해식각 후의 조도가 $25.5\pm 5.2 \text{ nm}$ 로 측정되어, 전해식각 단계를 거칠수록 표면 조도가 나빠짐을 볼 수 있었다.

4.3 이론 및 실험의 비교·토의

전해식각은 전류밀도와 전압 분극곡선⁽⁶⁾에서 II 영역인 전해연마 영역에서 수행된다. 따라서 전해식각이 다단으로 진행이 되어도 그 표면 조도는 처음 전해연마된 상태와 같이 유지되어야하나, 실제 AFM 을 통한 조도 측정 결과, 초기 알루미늄 박판에 비해서는 조도가 크게 개선되었으나, 다단식각을 진행할수록 조도가 나빠짐을 볼 수 있었다. 이러한 원인으로 식각보호막으로 사용된 SU-8 이 제대로 제거되지 않은 것으로 밝혀졌다. 따라서 연마가 되면서 식각이 되는 전해식각의 장점을 최대한 살리기 위해서는 식각보호막으로 사용된 SU-8 을 완벽히 제거하기 위한 개선안 또는 제거가 쉬운 식각보호막이 필요하다.

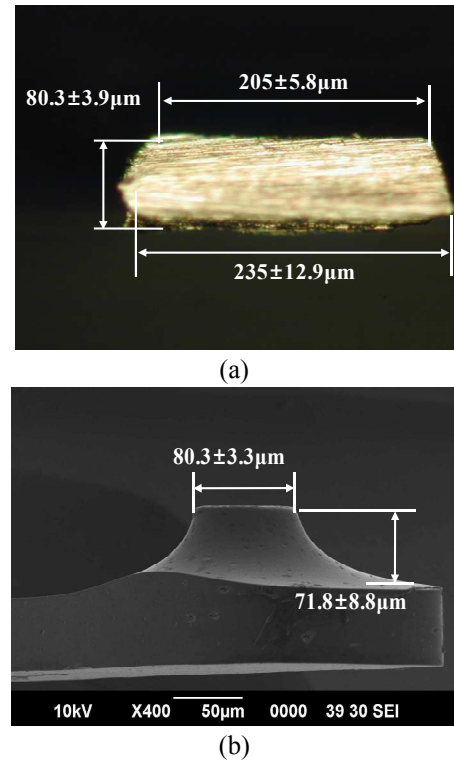


Fig. 8 Side view of the fabricated probe: (a) Cross-sectional view of the cantilever; (b) Side view of the tip on the cantilever

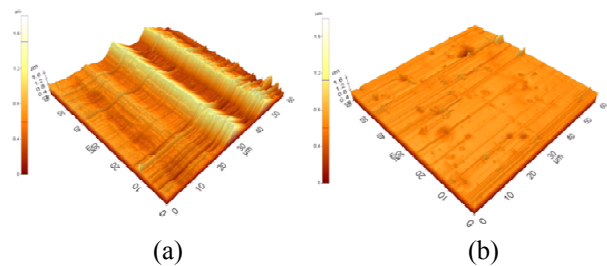


Fig. 9 AFM inspection of surface roughness: (a) Bare aluminum foil($154.7\pm 52.7 \text{ nm}$); (b) The fabricated probe structure($37.4\pm 9.6 \text{ nm}$)

5. 결론

본 논문에서는 최근 다양한 분야에서 요구되는 3 차원 마이크로 금속 구조물을 제작하는 방법으로 알루미늄 박판의 다단 전해식각을 통한 3 차원 마이크로 구조물의 제작방법을 제안하였다. 다단 전해식각을 통한 3 차원 마이크로 금속 구조물 제작방법은 본 연구에서 처음 시도되는 것으로 먼저 단일 전해식각 공정을 통하여 2 차원 구조물을 제작하여 전해식각의 특성을 파악하고, 이후 알루미늄 박판의 다단 전해식각을 통하여 3 차원 구조물을 성공적으로 제작하였다. 이를 통해 제안된 공정 방법이 기존

널리 사용되는 다단 도금방법에 비하여 간단하고, 경제적이며, 안정된 물성의 3 차원 구조물을 짧은 시간 내에 제작할 수 있음을 입증하였다. 본 논문에서 제안한 방법은 반도체 칩 검사용 프로브, 마이크로 외팔보 센서, 그리고 생물학적 신호 측정에 쓰이는 전극열과 같은 3 차원 마이크로 금속 구조물의 제작에 적용할 수 있다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부/한국과학재단 창의적 연구진흥사업(디지털나노구동연구단)인 "생체모사 기법을 응용한 디지털나노구동기관의 구현에 관한 연구" 과제의 지원으로 수행되었습니다. 공정은 삼성전기의 AM 랩의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Choe, S.-H., Tanaka, S. and Esashi, M., 2007, "MEMS-Based Probe Array for Wafer Lever LSI Testing Transferred onto Low CTE LTCC Substrate by Au/Sn Eutectic Bonding," *Proc. 14th Inter. Conf. on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers '09)*, Lyon, France, pp. 2517~2520.
- (2) Chu, H.-Y., Kuo, T.-Y., Chang, B., Lu, S.-W., Chiao, C.-C. and Fang, W., 2006, "Design and Fabrication of Novel Three-Dimensional Multi-Electrode Array Using SOI Wafer," *Sensors and Actuators A*, Vol.130-131, pp. 254~261.
- (3) Frederix, PLTM, Akiyama, T., Staufer, U., Gerber, C., Foriadis, D., Muller, D.J. and Engel, A., 2003, "Atomic Force Bio-Analytics," *Current Opinion in Chemical Biology*, Vol.7, pp. 641~647.
- (4) Kim, B.-H., Kim, H.-C., Chun, K., Ki, K. and Tak, Y., 2004, "Cantilever-Type Microelectromechanical Systems Probe Card with Through-Wafer Interconnects for Fine Pitch and High-Speed Testing," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.43, No.6B, pp. 3877~3881.
- (5) Natsu, W., Ooshiro, S. and Kunieda, M., 2008, "Research on Generation of Three-Dimensional Surface with Micro-Electrolyte," *Annals of the CIRP*, Vol.1, pp. 27~34.
- (6) Zhu, D., Qu, N.S., Li, H.S., Zeng, Y.B., Li, D.L. and Qian, S.Q., 2009, "Electrochemical Micromachining of Microstructures of Micro Hole and Dimple Array," *Annals of the CIRP*, Vol.58, pp. 177~180.
- (7) Kim, B.H., Na, C.W., Lee, Y.S., Choi, D.K. and Chu, C.N., 2005, "Micro Electrochemical Machining of 3D Micro Structure Using Dilute Sulfuric Acid," *Annals of the CIRP*, Vol.54, Issue1, pp. 191~194.
- (8) Kwon, S.-G., Lim, H.-J., Kim, S.-H. and Kwak, Y.K., 2004, "Electrochemical Fabrication of Multi Microelectrodes," *Proceedings of the KSME 2004 Spring Annual Meeting*, pp. 1136~1141.
- (9) Datta, M., 1998, "Microfabrication by Electrochemical Metal Removal," *J. Res. Develop.*, Vol.42, No.5, pp. 655~669.
- (10) Mcgeough, J.A., 1974, Chpman and Hall London, "Principles of Electrochemical Machining," *Chapman and hall-London*, pp. 101~105.
- (11) Datta, M. and Landolt, D., 2000, "Fundamental Aspects and Applications of Electrochemical Microfabrication," *Electrochimica Acta*, Vol.45, pp. 2535~2558.
- (12) West, A.C., Madore, C., Matlosz, M. and Landolt, D., 1992, "Shape Changes During Through-Mask Electrochemical Micromachining of Thin Metal Films," *J. Electrochem. Soc.*, Vol.139, No.2, pp. 499~506.
- (13) Kim, K.-M., Yook, J.-M., Yeo, S.-K., Kwon, Y.-S., 2007, "Embedded IC Technology for Compact Packaging Inside Aluminum Substrate (Pocket Embedded Packaging)," *European Microwave Conference*, Munich, Germany, pp. 1125~1128.
- (14) Lim, Y.-M. and Kim, S.H., 2001, "An Electrochemical Fabrication Method for Extremely Thin Cylindrical Micropin," *Intern. Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.41, pp. 2287~2296.