

전기화학적 에칭법에 의한 텅스텐 와이어의 Sharp tip 제조에 관한 연구

우선기, 이홍로

충남대학교 금속공학과

Tungsten Wire Tip Sharpening by Electrochemical Etching

S. G. Woo and H. R. Lee

Dept. of Metallurgical Eng., Chungnam National University.

Abstract

Sharp tips are commonly used for applications in fields as diverse as nanolithography, low-voltage, field emitters, nanoelectronics, electrochemistry, cell biology, field-ion, and electron microscopy¹⁾. Tungsten wire, materials used in this experiment, which test the chip of wafer has been used to the needle of probe card. Tungsten wire was sharpened by electrochemical etching methode to get a typical tip shape.

1. 서 론

Tungsten wire는 내구성이 우수하며 마모율이 적어 반복하여 사용할 때에도 contact pressure가 균일한 것으로 알려져 있다. needle로써 사용되어지기 위해서는 일정한 모양과 sharp한 tip이 요구되어지는데 본 실험에서는 전기화학적 에칭에 의하여 tip shape을 제어할 수 있는 기술을 개발하는데 그 목적이 있다.

전해가공(electrolytic machining)은 전기화학가공(electrochemical machining)이라고도 하며 전해 에칭 즉 전기화학적 용해작용을 금속재료 표면 또는 소요부분에 집중, 제한함으로써 원하는 치수나 형상을 얻는 가공법이다. 전해가공과 화학가공은

둘다 에칭작용을 금속재료 표면의 어떤 부분에 집중 또는 제한 함으로써 행하여지나, 집중 제한의 방법으로서는 전해가공이 화학가공보다 많은 기법을 사용할 수 있다²⁾.

Probe card의 재료의 선택은 needle의 접촉저항, needle의 수명, PAD의 damage 및 yield의 특성을 고려하여 재료를 선정하게 된다. 실질적으로 사용되어지고 있는 재료로서는 BE-CU, Palladium, Pt-Ir, W 등의 여러 가지 재료가 있다. BE-CU재료의 경우 초기 접촉저항이 높으며(약 200 m Ω), self cleaning으로 초기와 같은 접촉저항을 유지할 수 있으나 텅스텐 보다 연성이므로 수명이 텅스텐보다 1/3 정도로 짧고 가격이 비싼 단점이 있다. 반면 텅스텐 재료는 마모율이 적어 내구성

이 우수하고 반복 사용시에도 contact pressure가 균일하므로 PAD의 Al_2O_3 를 뚫고 Al과 접촉되는데 최적으로 알려져 있다. 그러나 텅스텐 와이어에 PAD의 산화물이 probe에 형성되어 접촉저항이 증가하고 불순물의 증가로 lapping film을 사용하여 자주 세척을 실시해야 하는 단점이 있다. 그림 1 a)에 probe card의 개략적인 형태와 그림 1b)에 probe card의 단면도를 나타내었다.

2. 실험방법

오래전부터 sharp tip을 제조하기 위해 단순한 기계적 방법으로 W, Pt-Ir, Pt-Rh, Mo 등의 재료를 shearing, grinding의 방법을 이용하여 원하는 모양의 tip을 제조해왔다. 이와 같은 방법으로 sharp tip을 제조할 경우 단순하고 편리하게 만들 수 있다는 장점이 있으나 재현성이 떨어지고, 대칭되는 모양을 얻기 어려우며, 무딘 tip을 형성하거나, multiple tips을 형성하는 단점이 있다³⁾. 전기화학적으로 요구되어지는 대칭성, 예각도, small apex, cone angle을 얻기 위해 최근에 적용되어진 방법으로서 Muller⁴⁾ 등에 의해 제안되어졌다. 이

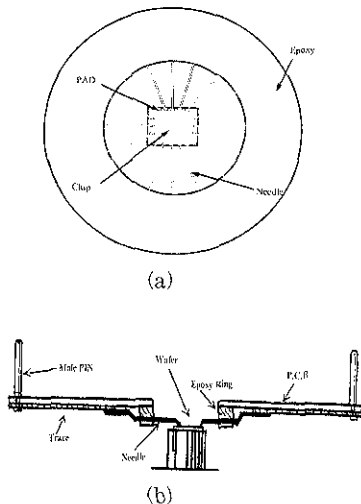


Fig. 1 a) Schematic of probe card
b) Cross section of probe card

방법은 적절한 전해액에 W, Au, Ta, Fe, Pt, Ir, Pt-Ir 등의 시편을 침지시킨후 직접적으로 AC 또는 DC전원을 연결하여 sharp tip을 제조하는 방법⁵⁻⁸⁾으로서 원하는 sharp tip을 제조하기 위해 적절한 여러 가지 다른 방법과 병행하여 사용되고 있다.

먼저 일반적으로 사용되어지고 있는 방법으로서 다음과 같은 것이 있다. 전기화학적 방법에 의해 sharp tip을 제조하기 위한 방법중 가장 단순하고 고전적인 방법으로써 그림 2 a)에서 보여주는 바와 같이 시편을 hand-hold clamp로 고정시킨 후 상대전극과의 사이에 일정한 전압을 가하여 육안으로서 관찰하며 한 번 혹은 여러번 반복적으로 침지시켜 원하는 모양의 sharp tip을 제조하게 된다.

Sharp tip을 제조하기 위해 전기화학적 방법의 사용에 있어 전해액안에 시편을 침지시키게 되는데 이때 일어나는 반응은 화학반응 뿐만 아니라 EMF도 영향을 미치게 된다. 침지의 깊이가 깊어질수록 tapering되는 속도가 감소하게 된다. 이와 같이 예칭을 실시한 후 요구되어지는 모양을 얻기 위해서 깃털이나 솜, 스폰지 등의 재료를 이용하여 final thinning을 하기도 한다.

그림 2 b)는 시편을 clamping하거나 holding을 하여 수직으로 용액에 접촉시킨 후 두 전극사이에 일정한 전압을 걸어준다. 이때 용액과 공기의 접

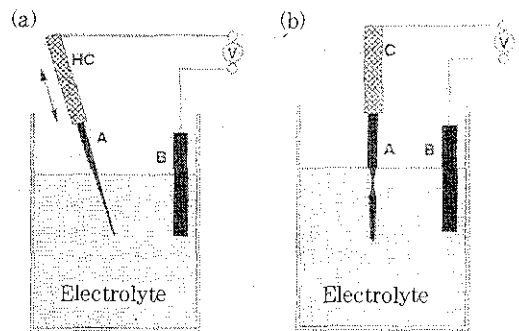


Fig. 2 Schematic of simple electrochemical etching

측면 부분에서 necking이 발생하여 떨어져 나가게 된다. 용액에 침지되어진 시편의 경우 일정하게 에칭이 진행되어지는데 공기와 용액의 경계부의 경우 에칭의 속도가 빠르게 진행된다. 이는 bubble motion, convection currents, 와이어에 접촉되는 용액의 형태에 의해 시편의 용해가 빠르게 진행되기 때문이다. 이와 같은 neck부분의 모양은 다양한 주파수에 의해 조절되어질 수 있는 것으로 알려져 있으며, tip shape에 영향을 주는 다른 인자로서는 침지된 깊이, 전압, 용액의 농도 등이 있다⁹⁾. 이와 같은 방법을 사용할 시 일반적으로 두 단계를 거쳐 실시하게 되는데 neck가 형성된 후 두 번째 단계로서 좀더 묽은 용액에 침지시켜 에칭을 실시하거나 a)번과 같이 final thinning을 하여 원하는 모양을 형성한다.

이외에도 floating-layer 방법, glass capillary를 이용하는 방법과 시편 아래의 스프링에 의해 소성 변형을 일으켜 원하는 sharp tip을 제조하는 방법도 있다. 또한 DC로 실험할 시 양극부위에서 기포가 발생하게 되는데 이것의 영향을 최소화 하기 위해 전극부위를 glass로 차단시키는 방법도 사용되고 있다.

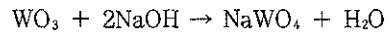
위에서 제시한 실험방법과 더불어 앞에서 제시한 여러 가지 parameter의 제어와 조절 및 적용에 의해서 sharp tip의 형태를 제어할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

전해가공에 이용되는 전해액은 슬러지가 생기는 것과 생기지 않는 것으로 나눌 수 있다. NaCl 등의 중성염 수용액은 전자에 속하고 각종 산 또는 알칼리 용액은 후자에 속한다. 알칼리 용액의 경우 많은 금속에서 상용되지는 않는다. 그것은 알칼리용액 중에서 녹지 않는 양극 생성물 피막이 형성되어 가공물의 용출을 방해하기 때문이다. 그러나 텅스텐이나 몰리브덴 등을 전해 용출시키기 위해서는 이들 양극산화에 의해 산화물로 만들고

그것을 NaOH 등에 의해 텅스텐 염기 또는 몰리브덴 염기로 용출시킬 필요가 있으므로 이들의 전해액으로는 아주 바람직하다.

W의 경우 양극산화 되어서 WO_3 가 되고 이것이 NaOH와 반응해서



에 의해서 텅스텐염 소다로 용출한다⁹⁾.

본 실험에서는 전기화학적 에칭법을 사용하였으며 sharp tip제조를 위해서는 AC에 의한 방법과 DC를 사용하는 방법이 있다. AC의 경우 phase angle과 wave shape을 수동적으로 통제하기가 어려워 DC에 의한 방법보다 재현성이 어려운 것으로 알려져 있다. 그러나 tip의 shape을 제어하기 위해 여러 가지 parameter를 변형시켜 최적의 조건을 도출하고 있다. shape에 영향을 주는 주요요인은 전압과 전류의 크기, Bubble dynamics, 파형, 주파수, 침지 깊이, 전극 모양, 전해액 농도, 용액 점도, 용기의 모양, Shielding, Washing procedure등이 있다⁹⁾.

여기서 주의할 점은 위에서 제시한 요인들의 모든 경우가 시편에 critical하거나 중요할 수도 있으나 어떤 재료에 있어서는 위의 요소 중 한 두 가지가 매우 중요하게 작용될 수도 있다. 즉 sharp tip을 제조하는데 있어 요구되어지는 tip의 형상을 얻기 위해서는 위에서 제시한 인자들의 적절한 수정 및 적용이 필요하다.

특히 AC, DC, Pulse-shaped wave와 같은 전압의 선택은 각각의 sharp tip을 제조하는데 있어 매우 중요한 요소이다.

masking의 과정이 없이 시편의 작은 부분에 한정지어 sharp tip을 제조하기 위해서는 첫 번째 단계에서 DC 전원을 사용하는 것이 좋다. 이는 AC전원을 사용할 때보다 시편표면에서 거품의 발생이 적어 전기화학 에칭의 활동도를 더욱 증가시키기 때문이다. 그러나 sharp tip을 제조하는데

있어 에칭을 방해하는 부동태 피막이 형성되는 경우 AC 전원을 사용하는 것이 좋다. 이는 실험이 진행되는 동안 발생한 기포에 의하여 에칭을 방해하는 피막이 제거되어질 수 있으며 이때 발생된 기포는 sharp tip 부분의 micro-zone에 큰 영향을 주지 않는 것으로 알려져 있다. 또한 AC전원은 다소 긴 시편을 제작할때도 사용되어진다. 어떤 재료에 대해 AC방법을 이용할 경우 DC를 사용하는 경우보다 많은 이점이 있을 수도 있지만 실질적으로 phase angle과 파형의 변화에 따라 재현성이 DC에 의한 경우 보다 떨어지는 것으로 알려져 있다. 따라서 AC전원을 사용하여 요구되어지는 tip을 얻기위해 phase angle, 파형의 변화, 주파수, 적용전압, 파수 등을 고려해야 한다.

액체 용액내에서 고체 재료의 용출은 물출된 부분에서 우선적으로 일어나게 되는데 만약 와이어가 너무 두껍거나 짧지만 얇다면 실질적으로 sharp tip을 얻을 수 있다. 즉 사용되어지는 재료가 얇고 긴 경우 시편의 전체 와이어가 용출에 의해 짧아지기 전에 radial direction (thinning of the wire)의 용출이 시편의 중앙부에 이르게 되므로 sharp tip의 제조가 가능하게 된다¹⁰⁾. 또한 pulse-shaped wave는 에칭 중에 제거되어진 금속의 양을 정확하게 제어하기 위해 사용되어진다. tip의 apex부분의 micro-feature가 요구되어질 경우 적은 양을 back polishing할 때 주로 사용되어진다.

먼저 요구되어지는 tip의 규격과 모양을 그림 3 a)에 나타내었다. 그림 3 b)는 상용화되어 현재 사용되고 있는 시편으로써 Ni-plating된 시편을 가공한 후 sharpening하여 얻어진 그림이다.

실제 사용되고 있는 텅스텐 와이어의 가공되기 전의 tip의 shape을 그림 4에 나타내었다. 그림 4과 같이 일정한 형태의 모양으로부터 그림 3 b)의 원하는 모양과 형태를 얻기 위하여 앞에서도 언급했듯이 여러 가지의 방법이 적용되어 실제 사용되어지기 위한 모양으로 가공을 하게된다. 따라서

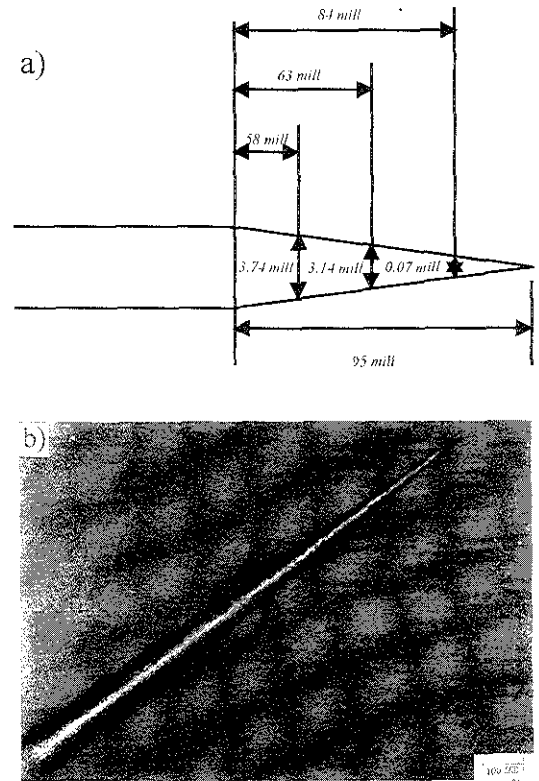


Fig. 3 Used commercial specimen.

본 연구에서는 그림 3 b)와 같은 일정한 형태를 가지는 텅스텐 와이어를 제조하기 위해 pure 텅스텐 와이어를 사용하여 최적의 조건을 찾아낸 후 pure 텅스텐 와이어에 Ni이 plating된 시편에 적용하여 실제 사용되고 있는 sharp tip을 제조하였다.

본 실험에서 사용되어진 전원으로는 AC를 사용하였으며, AC 전원하에서 hydrodynamic force는 부식기구에 큰 영향을 주게되므로 bubble dynamic의 관점에서 etching factor를 적용하여 보았다. bubble의 부력은 AC 전원에 의해 반 사이클 동안에 형성되어지며 이때 형성된 bubble은 시편의 표면을 비끄러져 상승하게 된다. 윗 방향으로 향하는 이와 같은 흐름은 AC전원 하에서 존재하는 tip 주위에 전기화학적 전위차와 대류에 의해 tip표면 주위에 국부적 부식속도에 실질적으로 영향을 미치게 된다. 이와 같은 과정을 그림 5 a)에 개략적

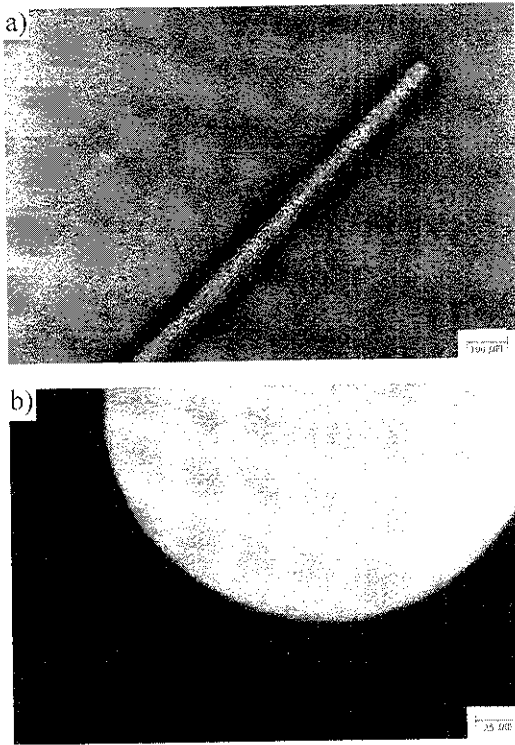


Fig. 4 a) Untreated Tungsten wire
b) Cross section of Ni-plated Tungsten wire

으로 나타내었다. 직접적으로 윗 방향으로 향하는 부력에 의해 wire의 표면을 떠나 올라가는 bubble의 유동속도는 etching시의 전압에 주로 의존한다. 그러나 이때의 부식속도는 tip의 전표면에 걸쳐 균일하게 발생되지 않으며 이와 같은 부식속도는 bubble의 표면밀도와 크기 그리고 미끄러져가는 속도 등에 의한 금속과 전해액사이의 접촉에 의해서도 영향을 받게 된다. 즉 tip의 정점부근의 에칭거동은 본질적으로 에칭시 형성되는 bubble에 의해 방해받지 않으며 에칭이 진행되게 된다. 따라서 침지된 시편의 표면마다 서로 다른 부식속도를 형성하게되는데 이와 같이 서로 다른 부식속도는 전기화학적 에칭에 의해 sharp tip의 제조를 가능하게 한다.

또한 tip 정점부근에서의 빠른 에칭 속도와 bubble의 형성과 이 형성된 bubble이 상승시 불안정

한 masking에 의해 정점 이외의 부근은 에칭속도가 상대적으로 둔화된다. 따라서 bubble의 상승과 표면과의 접촉정도에 따라 일정한 각도를 갖는 sharp tip을 제조할 수 있다. 이때 형성되는 bubble에 의한 부력과 tip주위와의 관계를 그림 5 b)에 개략적으로 나타내었다. 그림 5 b)에서 FL은 longitudinal 요소이며 FB는 bubble에 의해 형성되어지는 수직으로 상승하려는 부력이며 FN은 일반 에칭에 따른 tip표면에 대한 성분을 나타내고 있다.

일반적으로 에칭 전압이 낮을수록 더욱 sharp한 tip과 좁은 cone angle과 더욱 뾰족한 정점을 형성하는 것으로 알려져 있다¹⁾.

본 실험에서 사용되어진 방법으로는 그림 5 a)와 같은 방법으로 실험을 실시하여 최적의 조건을 도출하였다. 일반적으로 downward 방식으로 에칭을 실시할 경우 적용되는 전압이 높은 fast etching의 경우 tip부분이 무디며 용액과의 계면 부근에서 약간의 necking이 발생하는 것으로 보고되어

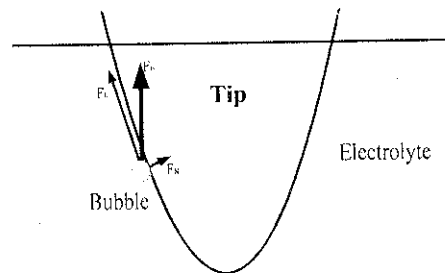
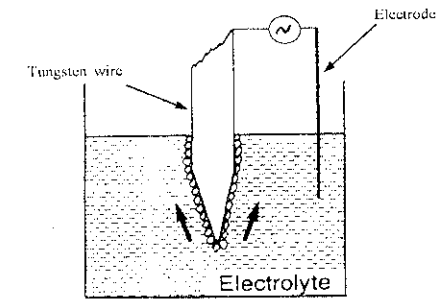


Fig. 5 Schematic of downward method(a) and the driving bubble stream (b).

지고 있으며 낮은 전압에서 실시되는 slow etching의 경우 sharp한 tip이 형성되며 용액계면에서의 necking현상도 감소하는 것으로 알려져 있다. 또한 시편에 침지되어지는 깊이가 낮은 경우 tip부근의 모양이 뽀족하지 않으며, 일정한 깊이에 노출되어질 경우 요구되어지는 corn angle을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 이를 그림 6에 개략적으로 나타내었다.

우선 최적의 조건을 얻기 위해 전압과 에칭 시간에 따라 얻어진 tip shape의 모양에 대하여 고찰하여 보았다. 그림 7은 2V의 전압에서 시간에 따른 tip shape의 모양변화에 대하여 도시하였다. 용액은 상온의 1M NaOH용액에서 실시하였다. 원뿔 형태로 만들어진 시편의 중간부분의 두께를 실험 후 사진을 찍어 측정한 후 원래 시편의 폭과

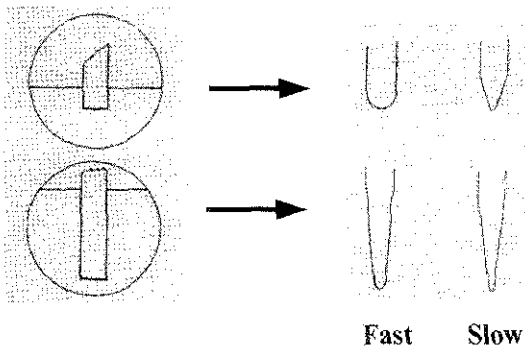


Fig. 6 Schematic of tip shape acquired by potential and immersion depth

비교하여 그림에 나타내었다. 위의 조건에서 시간이 증가함에 따라 sharp한 모양이 형성되어지고 있음을 볼 수 있다. 2V의 경우 4분 이상 에칭을 실시하여도 원 시편의 두께인 55.8 μ m의 두께에 미치지 못하고 있음을 알 수 있다. 4분 이상을 에칭하여 원하는 두께의 시편을 얻을 수 있지만 실제 생산과정에 적합하지 않고 더욱이 침적 시간이 증가함에 따라 용액과의 접촉부근에 step이 형성되고 있다. 즉 낮은 전압하에서는 sharp tip을 형성하는데 있어 많은 시간이 요구되어지며 용액에 침지되어지는 시간이 증가함에 따라 용액과의 계면에서의 necking이 발생하고 있다.

그림 8와 그림 9에서 각각 5V와 10V로 전압을 바꾸었을 경우 시간과의 관계를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 5V의 105초 부근에서와 10V 50초 부근에서 적당한 전압과 시간의 조건을 얻을 수 있었다. 그러나 2V의 경우 보다 작지만 용액과 접촉부근에서 마찬가지로 약간의 step이 형성되고 있다. 이와 같은 원인은 bubble dynamic의 관점에서 보면 시편의 아래부분에서 형성된 기포가 위로 올라가면서 다른 기포와 합쳐져 부유하게 되는데 이때 형성된 기포가 수면부근에 이르러 잠시 머무르게 되면서 반응에 참여하게 됨으로써 용액과의 접촉면에서 step이 형성되는 것으로 보여진다. 따라서 이와 같은 현상을 억제하기 위하여 다른 조건의 수정이 필요하다.

15V정도의 높은 전압하에서는 에칭에 소요는

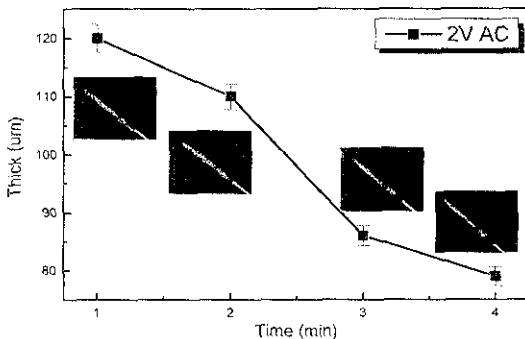


Fig. 7 Relation of potential and time

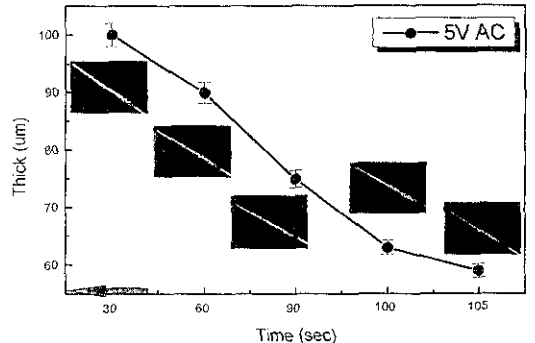


Fig. 8 Relation of potential and time

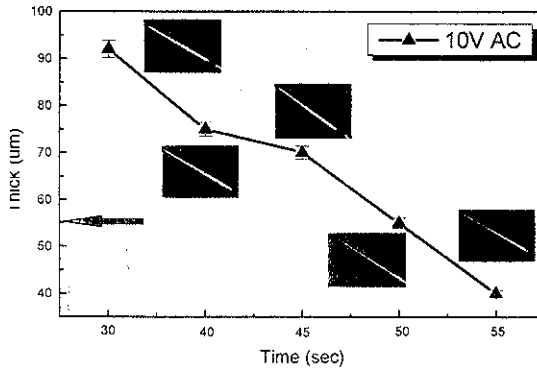


Fig. 9 Relation of potential and time

시간은 30초 정도로 짧게 걸리지만 일정한 모양이 형성되지 않고 반응이 격렬하게 일어나며 시간의 흐름에 따라 일정한 형태가 형성되지 않고 거의 일자형태의 모양이 형성되었다. 이는 높은 전압에 의해 반응이 빠르게 진행하였으며, 생성된 bubble의 상승 속도가 매우 빠르기 때문에 국부적으로 에칭 속도의 변화가 없었기 때문으로 보여진다. 또한 높은 전압에서 빠르게 에칭이 진행되어 최적의 시간을 제어하기가 어려웠다.

온도와 tip shape과의 관계를 고찰하여 보기 위해 앞 실험에서 얻어진 10V AC 1M NaOH, 50 sec의 조건하에서 온도를 변화시켜 가면서 tip의 모양을 관찰하여 그림 10에 나타내었다. 온도변화에 따른 tip shape의 변화는 온도가 10°C 변화함에 따라 두께의 감소가 3~4um 정도로 나타나고 있다. 이는 전압의 변화시의 두께감소보다 훨씬 작은 값을 보이고 있다. 따라서 온도에 의한 tip 모양의 변화는 전압이나 침지된 시간에 의한 영향보다 변화량이 상대적으로 적었음을 알 수 있다.

그림 11은 농도변화에 따른 두께변화를 나타내었다. 용액의 농도를 2M로 수정한 후 10V AC의 조건에서 시간의 변화에 따른 두께의 감소량을 나타낸 그림이다. 2M의 용액에서는 앞에서 언급했던 용액의 계면 부근에서 step구조가 거의 나타나고 있지 않고 있다. 이는 농도의 증가에 의해 1M 용액의 경우보다 미세한 bubble이 형성되었으며

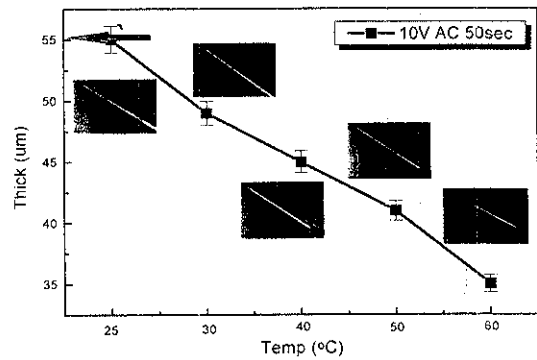


Fig. 10 Variation of tip shape by temperature change

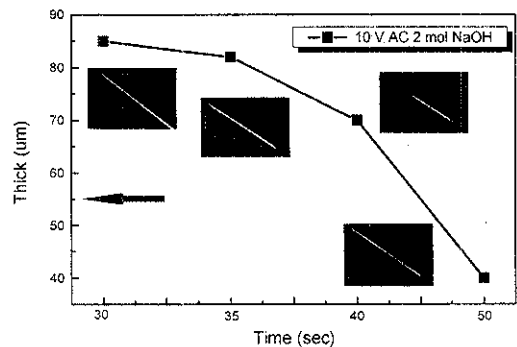


Fig. 11 Variation of tip shape by mol concentration change

반응의 진행이 빨랐기 때문으로 보여진다. 즉 위의 조건에서 반응이 일어날 경우 농도의 증가에 의한 미세한 거품들이 빠르게 부상함으로써 용액 계면에 머무르지 않으므로 계면에서 반응에 참여하는 용이 상대적으로 적기 때문으로 보여진다. 또한 미세한 bubble에 의해 1M의 용액에서 실험한 시편보다 표면 광택도가 증가하고 있음을 알 수 있다. 그러나 물 농도를 2.5M, 3M로 증가시킬수록 step구조는 발생하지 않았지만 용액 경계부분이 완만하게 파여 들어감을 알 수 있었다.

따라서 본 실험의 조건에서 순수한 텅스텐 와이어의 경우 10V, 45sec, 2M NaOH 용액의 조건이 가장 적합한 것으로 나타났다. 위의 조건에서 형성된 시편의 형상을 그림 12에 나타내었다.

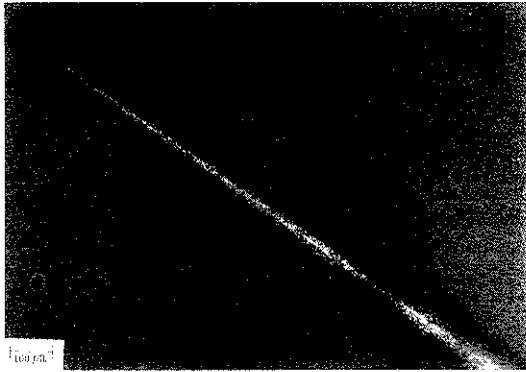


Fig. 12 Results of applied condition (10V AC, 45 sec, 2M NaOH)

이와 같은 실험을 바탕으로 순수 텅스텐 와이어에 Ni이 도금된 시편에 적용하여 원하는 tip shape을 얻기 위한 최적의 조건을 도출하였다.

먼저 앞 실험의 조건을 적용하기 위하여 Ni도금된 시편에서 sharpening을 원하는 부분의 Ni를 제거한 후 앞 실험에서 얻어진 조건을 적용하였다. 본 시편의 단면모습을 관찰하여 그림 13 a)에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 Ni도금된 부분이 약 $5\mu\text{m}$ 정도임을 알 수 있다. 이 시편을 앞에서 얻어진 조건으로 에칭을 할 경우 상당히 오랜 시간이 걸리고 일정한 모양이 형성되어지지 않게 된다. (그림 13 b)) 그러므로 우선 Ni도금된 부분을 먼저 에칭을 한 후 앞의 조건을 적용하여 일정한 tip 모양을 형성하였다.

다음과 같은 용액의 조건에서 Ni striping을 실시하였다.

Solution : ($\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O} < 2 : 1 >$)

Time : 30 sec

Temp : room temperature

Potential : 10V AC

Ni-striping 후의 시편사진을 그림 14 a)에 나타내었다. Ni도금된 부분을 벗겨낸 후의 과정은 앞 실험의 조건에 적용하여 원하는 모양의 sharp

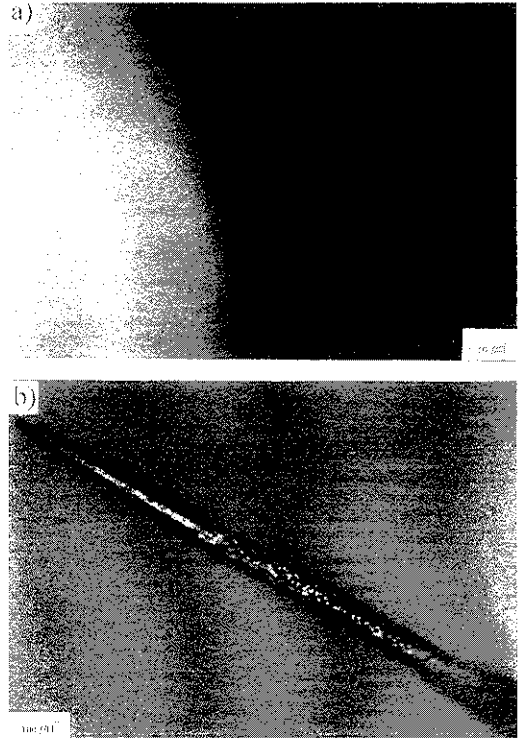


Fig. 13 a) Cross section of Ni-plated specimen
b) Tip shape acquired by ac 10V 80sec 2M NaOH condition

tip을 얻을 수가 있었다. 이때 요구되어지는 sharp tip을 형성하기 위해 Ni-striping의 길이를 정확히 제어해야하며 striping 후 시편에 묻은 용액의 세척과정을 거친 후 앞에서 얻어진 조건을 적용하여 sharp tip을 제조하여 그림 14 b)에 나타내었다. 위와 같은 방법으로 실제 여러번 실험을 하여도 재현성이 뛰어났으며 원하는 모양의 sharp tip을 제조할 수 있었으나 실험 후 정확한 치수를 얻기 위해서는 에칭후 적절한 final thinning이 필요하였다.

4. 결 과

Probe card 제작시 needle로 사용되고 있는 텅스텐 와이어의 경우 sharp tip이 제조된 상태에서 전량 수입에 의존하고 있으나 정밀 에칭기술을 적

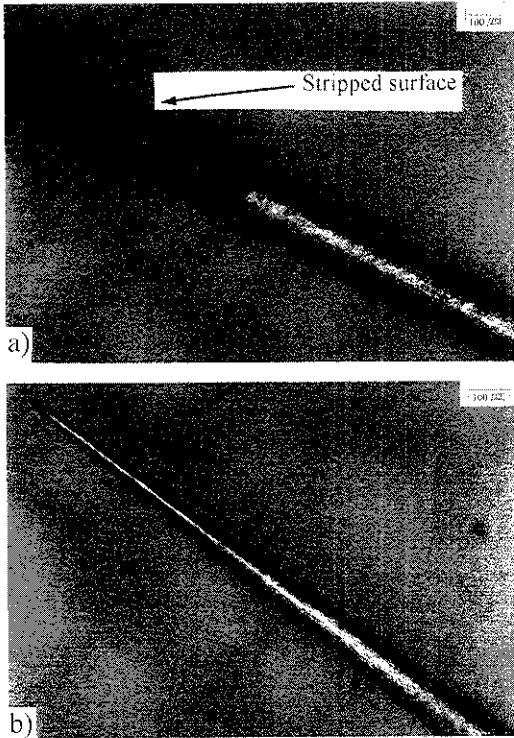


Fig. 14 a) Ni stripped specimen
b) Sharp tip obtained by modied condition

용하여 원하는 shape을 얻을 수 있을 경우 수입 대체의 효과가 있을 것으로 기대되어진다.

본 실험에서 사용된 텅스텐 와이어의 최적의 에칭조건은 상온의 2M의 NaOH용액에서 10V AC의 전압을 가하여 주었을 때 원하는 모양을 얻을 수 있었으며 Ni가 plate된 시편의 경우 $\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ 의 용액에서 10V AC의 조건에서 Ni이 도금된 부분을 제거한 후 같은 조건에서 에칭을 할 경우 재

현성이 뛰어나며 원하는 모양을 얻을 수 있었다.

실질적으로 최적의 요구되어지는 형태를 얻기 위해서는 다른 인자들에 따른 모양의 변화를 고찰할 필요가 있으며 에칭후 적절한 final thinning이 필요하다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. Mircea Fotino, Rev. Sci. Instrum. vol. 64, No. 1, (1993), 159.
2. 김홍구 "에칭가공기술", (1992). 6.
3. G. Binning and H. Rohrer, Helv. Phys. Acta 55, (1983), 726.
4. E. W. Muller, J. Phys. (1951), 131.
5. Allan J. Melmed, J. Vac. Sci. Technol. B 9, (1991), 601.
6. G. Binning and H. Rohrer, IBM, J. Res. Dev. 30, (1986), 355.
7. E. W. Muller and T. T. Tsong, "Fiele ion microscopy (Elsever, New York, 1969). 119.
8. L. J. Whitman, J. A. Stroscio, R. A. Dragoset, and R. J. Celotta, Science 251, (1991), 1206.
9. L. A. Nagahara, T. Thundat, and S. M. Lindsay, Rev. Sci. Instrum. vol. 60, No. 1, (1993), 159.
10. Hiroshi Morikawa and Keisuke Goto, Rev. Sci. Instrum. vol. 59, No. 10, (1988), 2195.