

# RF Sputtering을 이용한 전류 민감성 차단 디바이스에 관한 연구

•이세현\*, 정광희\*, 박두기\*, 김용락\*, 이종철\*, 구경환\*\*, 한상욱\*  
\*충남대학교, \*\*영동공과대학

## The Study on a sensitive current limiting breaking device using RF Sputtering

•S.H.Lee\*, K.H.Jeong\*, D.K.Park\*, Y.L.Kim\*, J.C.Lee\*, K.W.Koo\*\*, S.O.Han\*  
\*ChungNam National University, \*\*YoungDong Institute of Technology

### Abstract

In this paper, we evaluated the sputter-deposited Cr/Cu thin film fuses on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> substrates by the adhesive, breaking and repetitive over-current test as a function of temperature on them.

Each Cr and Cu was deposited 1700±300Å, 3700±300Å using RF sputtering unit. The electroplated Cu of 25µm thickness was added in order to make sensitive thin film fuse of the normal current 15[A].

The adhesive strength and the number of repetition were increasing and then decreasing with the temperature.

The maximum adhesive strength of over 9kgf/9mm<sup>2</sup> was obtained at 400°C.

In the breaking test, the post-arc time characteristic was better than any other factor.

### 1. 서 론

반도체 보호용 퓨즈는 다른 과전류 보호 기기에 비하여 뛰어난 속동성(Rapid operating), 한류성(Limiting current)을 갖고 있고, 소형이면서 가격이 저렴하기 때문에 전력 장치의 보호용으로 많이 이용되고 있다.<sup>1)</sup>

현재 주로 사용되고 있는 속동형 퓨즈 엘리먼트는 은, 구리 등의 낮은 용점 금속을 사용하고 있고, 형태는 리본형으로 되어 있다. 금속판으로된 퓨즈 엘리먼트는 작업 중에 파손량이 많이 발생하여 신뢰도 및 동일 특성을 갖는 엘리먼트를 제작하는데 어려움이 많다. 또한 press 가공을 이용하여 제작하기 때문에 고정밀의 전류 민감도를 갖는 수µm 두께의 엘리먼트 제작 시에 고도의 기술이 필요하다.<sup>2)</sup>

이러한 문제점을 개선하기 위해서 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 기판 위에 금속을 Metalization 시켜 사용되고 있는 퓨즈 엘리먼트의 특징으로는 두께를 수[µm] 까지 제조할 수 있어 미소의 전류까지 제어할 수 있고, 제조상의 기계적인 파손을 현저하게 줄일 수 있으며, 기판의 열전도가 뛰어나 소형화할 수 있는 특징을 갖고 있다.<sup>3,4)</sup>

현재 생산되고 있는 엘리먼트는 스위칭시에 발생하는 반복적인 과전류로 인해 주열 열이 발생하여 구리와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 기판간에 열응력과 열팽창계수등의 차이로 인한 기계적인 변형으로 장시간 수명의 관점에서 볼 때 개선이 요구되고 있다.

이러한 이유로 금속 산화물 형성 에너지가 커 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 기판과 금속 양쪽에 밀착력을 강하게 할 수 있는 금속 물질로 극히 제한적이기는 하지만 Zr, Ti, Cr 등이 이용되고 있는데 특히 이들을 활성금속(active metal)이라고 부른다.<sup>5,6,7,8)</sup> Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 기판에 Metalization 하는 방법으로는 paste법, 진공증착법, 스퍼터링법, 무전해 도금법등이 있고 현재 환경 공해 유발을 감소시키기 위한 방법중 물리적인 증착법이 제안되고 있다.

물리적인 증착법 중에 스퍼터 증착(sputter deposition)을 이용한 박막이 진공증발(thermal evaporation)법으로 제조한 박막보다 밀착력이 좋은 것으로 알려져 있다. 그 이유는 박막을 형성하는 금속의 응축 에너지가 높고 스퍼터링 과정에서 생긴 높은 에너지를 가진 원자가 기판 표면을 깨끗하게 할 수 있으며 기판 표면에 극부적으로 결합을 제공하는 등의 효과가 있기 때문이다. 스퍼터를 이용한 Cr박막의 경우에 두께가 약 1500±400Å 범위에서 Peel 강도가 가장 큰 것으로 보고되었다.<sup>9)</sup>

본 논문에서는 퓨즈 엘리먼트와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 기판과의 밀착력과 장기 수명에 미치는 영향을 다음과 같이 조사하였다.

- ① 기판의 표면적을 증가시킬 목적으로 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 기판을 50% HF에서 에칭 하여 Roughness와 표면, 단면을 조사하였다.
- ② RF Sputtering 을 이용하여 Cu, Ni, Cr을 1700±300Å을 스퍼터하였다. 그 위에 두께 25µm를 황산구리 전기 도금하여 밀착력을 조사하였다.  
위의 실험으로 밀착력이 가장 양호한 Cr/Cu층을 씨앗층으로 하여 각각 300, 400, 500, 600, 700°C의 분위기에서 Cr 1700±300Å을 스퍼터 한후 그 위에 Cu 3700±300Å을 스퍼터 하였다. 그 후 위의 같은 방법으로 두께 25µm를 전기 도금하여 시편을 제작하였다. 제작된 시편으로
- ③ 반복 과전류 시험을 하여 밀착력과 관계를 조사하였다.
- ④ 이종 금속 결합 층으로 인해 아크 발호 시에 나타나는 차단 특성을 조사하였다.

## 2. 실험 방법

본 연구에 사용된  $Al_2O_3$  기판은 순도 96%, 크기 54mm × 48mm, 두께 0.635mm, Ra 2250 ± 750 Å, Insulation resistivity 10 kv/mm 인 Nikco사 기판을 8mm × 20mm 크기로 곡선산업에서 Laser cutting 하였다.

시편의 전처리로서, 비누물로 표면을 세척한 후 5분간 초음파 증류수 세척을 하고, Acetone에서 5분간 초음파 탈지후 표면에 남아 있는 Acetone 을 제거하기 위해 다시 초음파 세척을 행하여 탈지 시켰다.

그 후  $Al_2O_3$  기판을 진공 오븐(GCA사)에서 129.8Torr, 40°C 에서, 24시간 이상 건조시켰다

### 2.1 기판의 표면 및 단면 SEM 관찰

$Al_2O_3$  기판의 표면적을 증가시키기 위해 50% HF, Bath temp 95~98°C 중탕에서 0~600sec 동안 30sec간격으로 에칭 하여  $Al_2O_3$  기판의 binder인 유리질 성분( $SiO_2$ ,  $MgO$ ,  $CaO$ , ...)을 녹여 내어 입계공간을 형성시켰다.

Etching 시간에 따른 기판의 표면과 단면을 SEM(Scanning Electron Microscope 535M)을 이용해 관찰하였다. 그리고 표면의 Roughness를 조사하기 위해  $\alpha$ -step(Tencor Alpha Step 200)으로 측정하였다. 이때 scan time 8 sec, scan length 2000 $\mu$ m로 하여 각각의 시료 4곳을 측정하여 평균하였다

### 2.2 밀착력 시험

RF Magnetron Sputter장치(한국진공)를 이용하여 Etched depth와 Roughness와 밀착력의 관계를 조사하기 위해 시료를 스퍼터 장치의 기판 홀더에 장착한 뒤  $Al_2O_3$  기판 내부의 수분 제거를 위해 진공상태 ( $10^{-6}$  torr)에서 150°C로 5분간 가열한 후 상온으로 냉각하였다.  $Al_2O_3$ 기판 위에 Cu, Cr, Ni를 각각 상온에서 1700 ± 300 Å 스퍼터 하였다. 또한 Cr/Cu를 300, 400, 500, 600, 700°C의 분위기에서 Cr 1700 ± 300 Å, Cu 3700 ± 300 Å을 Thickness monitor Display를 읽어 가며 스퍼터 하였다. 이때 사용된 Target의 순도는 99.9%, 크기 Cr 2" dia × 0.125 thickness, 순도 99.99%인 Ni 2" dia × 0.125, 순도 99.99%인 Cu 2" dia × 0.25 thickness를 가진 Plasmaterials사 제품을 이용하였다.

그 후 25 $\mu$ m 두께의 Cu를 상온에서 황산구리 전해 액으로 전류 밀도 0.52 A/cm<sup>2</sup> 로 전기 도금한 후 Photo etching 하여 2 × 2 mm<sup>2</sup>, 3 × 3 mm<sup>2</sup> 정방형으로 만들었다. 기판을 고정시킨 후 금속 층에 기계적, 화학적인 변화를 줄이기 위해 납땀을 이용하지 않고 중력 방향으로 시료에 강력 접착제 (AL-Lock CN( $\alpha$ -Cyancacrylate))를 이용하여 시험편을 부착하였다. 실험 시에 기판이 부러지지 않게 지지대로 밀착을 시켰다. 2 × 2 mm<sup>2</sup>의 시료를 분석 할 때 시편 부착이 용이하지 않아 실험에 어려움이 있었다. 그래서 Cr 1700 ± 300 Å, Cu 3700 ± 300 Å 으로 제작한 시료에는 3 × 3 mm<sup>2</sup>로 하여 실험을 하였다. 각각의 시료에 힘[1.2kgf/4mm<sup>2</sup>, 9mm<sup>2</sup>] 을 가하면서 밀착력을 측정하였다.

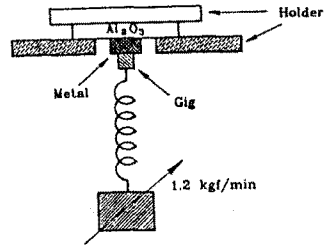


Fig. 1. Testing device of the adhesion

### 2.3 반복 과전류 시험

퓨우즈의 수명을 예측하는데 적용되고 있는 반복 과전류 시험은 반복적인 과전류를 퓨우즈 엘리먼트의 도체 부에 인가하면 주울 열로 인해 가열 또는 냉각하여 금속 층이 산화되고 기판과 금속 층간의 열팽창 계수와 응력으로 인한 신축 변형으로 금속의 단면적이 협소한 노치 부위가 파손된다.

파손되기까지의 반복적인 전류인가 횟수를 KSC 4612의 규정대로 실험을 하였다. 이때 정격 전류 15A용 퓨우즈에 60초 용단 전류로 부하를 1로 30A를 10 sec동안 ON 시키고, 30 sec 동안 OFF 반복하면서 일정 전류를 공급하였다. 퓨우즈 양단에 Mult pen recoder(YEW사)를 연결하여 퓨우즈에 인가되는 파형과 횟수를 그래프로 플로터 하였다.

### 2.4 차단 시험

밀착력이 다른 시료에 비해 큰 Cr을 씨앗 층으로 하여  $Al_2O_3$  기판위에 Cr 1700 ± 300 Å을 스퍼터 하고 그 위에 Cu 3700 ± 300 Å을 스퍼터하였다. 그 후 위와 같은 방법으로 황산구리 전해 액으로 전기 도금하여 25 $\mu$ m 두께의 금속 층을 갖는 기판을 제작하여 시편 하나의 크기를 8mm × 20mm 로 하였다. 시료에 노치를 직렬로 4개 병렬로 5개, 노치폭을 100  $\mu$ m × 120  $\mu$ m로 하여 6.8 ± 0.3의 저항을 갖는 퓨우즈 엘리먼트를 제작하였다.

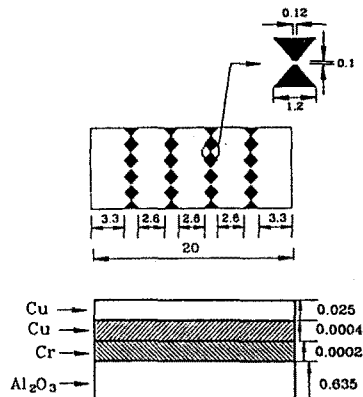


Fig. 2. Schematic structure of the fuse element

그림 3의 회로는 퓨우즈의 차단 실험을 하기 위해 고안되었다. 100V를 슬라이드스틀 이용하여 가변하여 1 : 10 승압 변압기와 다이오우드를 통해 콘덴서 뱅크(22400 $\mu$ F)에 100V로 충전된다. 시험시 사이리스터를 스위치로 하여 콘덴서 뱅크와 인덕턴스 L(10 $\mu$ H)로 인해 di/dt의 전류 기술기로 고장 전류가 퓨우즈에 공급된다. 퓨우즈가 차단된 후 콘덴서 뱅크에 남아 있는 전하량이 회복 전압으로 남게 된다. 퓨우즈에 고장 전류가 흘러 주울 열로 용융되며 아크가 발생하는 순간을 오실로 스크프로 측정하여 차단 시에 나타나는 특성을 분석하였다.

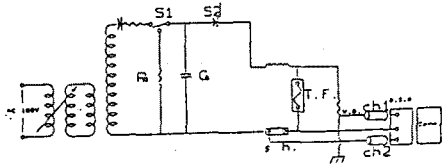


Fig. 3. Circuit of the breaking test

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 기판의 표면 및 단면 SEM 관찰

사진 1은 etching 시간에 따른 기판의 표면과 단면을 관찰한 것이다.

사진 a), b), c)는 평면으로서 시간 변화에 따라 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 입자와 입자 사이에 binder로 보이는 물질들이 제거되는 현상을 미약하게 확인할 수 있었으나 특별한 특징은 찾아 보기 힘들었다. 단면을 나타내는 사진 d), e), f)는 시간이 길어짐에 따라 etched part의 깊이가 깊어져 가는 현상을 뚜렷하게 알 수 있었다.

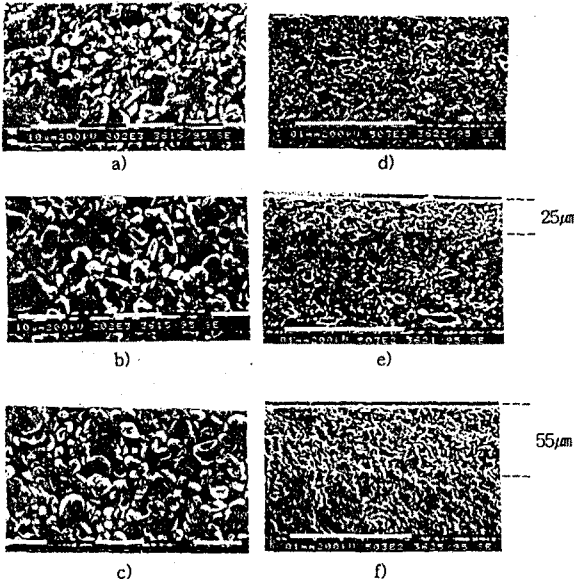


Photo. 1 SEM photomicrographs of surface(a-c) and cross(d-f) sections of the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> substrate with different etching time

a)no etching b)210 sec.etching c)510 sec.etching

그림 4는 시간 변화에 따른 기판의 표면을  $\alpha$ -step(Tencor Alpha Step 200)을 이용하여 Roughness를 측정하여 평균값을 나타낸 것이다. 그림의 오른쪽 Y축은 애칭 시간이 길어질수록 Etched depth는 거의 비례적으로 증가하는 것을 알 수 있다.

그러나 왼쪽 Y축을 기준으로 한 Roughness는 시간이 길어질수록 약간의 편차는 있지만 오히려 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 시간에 따라 Roughness가 증가할 것으로 예상한 것과는 반대의 결과가 얻어지는 현상을 알 수 있었다.

그리고 Roughness의 변화가 그래프에서 보듯이 시간 변화에 대해 3단계의 그룹을 형성하고 있다. 1영역은 0~180 sec, 2영역 180~400 sec, 3영역 400~600 sec로 구분이 되었다. 사용된 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 기판은 평균 입자 크기는 현미경으로 관찰 해본 결과 3 $\mu$ m 정도의 크기를 갖고 있었다.

이는 균일 층의 입자를 가상한다면 3 $\mu$ m 정도의 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자가 기판에서 애칭 되어 떨어져 나가는 시간은 약 200 sec 정도가 소요되는 것을 가정할 수 있었다. 그러나 표면 Roughness를 증가시키는 방법으로는 애칭보다는 기판 제조상에 더욱 많은 요소가 있을 것으로 생각된다.

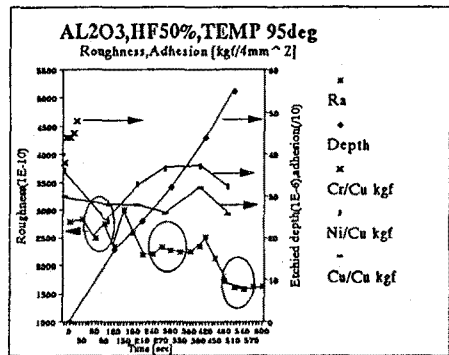


Fig. 4. the adhesion, roughness and etched part depth of the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> substrate

#### 3.2 밀착력 시험

그림 4의 오른쪽 Y축은 표면 Roughness의 변화에 의해 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 기판과 금속 층의 밀착력의 관계를 알아 본 것이다.

씨앗 층으로 Cu, Cr, Ni를 상온에서 각각 스퍼터한 후에 전기 도금으로 25 $\mu$ m의 만든 후 크기 2mm  $\times$  2mm의 정방형 시료를 시험한 결과이다. 밀착력 시험으로 때어 낸 금속은 Cu, Ni만이 떨어져 나왔다. Cr은 여전히 기판과 단단하게 밀착되어 있다. 그래프에서 보듯이 표면 Roughness가 증가할 수록 밀착력은 증가하는 경향을 나타내고 있다.

그러나 그 중에 밀착력이 4kgf/4mm<sup>2</sup> 이상의 값을 갖는 시료는 Cr을 씨앗 층으로 한 경우였다.

그림 4의 데이터로부터 애칭 시간이 길어질수록 표면 Roughness가 더 작아지는 경향을 보여 그림 5에서는 애칭을 하지 않은 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 기판을 이용하였다. 그림 4에서 가장 우수한 밀착력을 보인 Cr을 대상으로 스퍼터링시에 기판의 온도를 변수로 하여 얻은 결과이다. 이 실험에서 기판과 Cr은 밀착력이 떨어지지만 Cr과 Cu가 같은 금속임에도 불구하고 오히려 접착력이 더 약하게 나타났다. 그래프의 왼쪽 Y축을 기준으로 한 밀착력은 기판의 온도가 400 $^{\circ}$ C에서 제작한 시료에

서 가장 큰 결과를 얻을 수 있었다. 실험 중에 금속은 기판에 붙어 있으나 0.635mm의 두께를 갖는  $Al_2O_3$  기판이 부러져 제작한 실험 장비로는 실험이 불가능하였다. 그러나 그 힘은 약  $10kgf/4mm^2$  이상 되는 것으로 추정되었다. 이는  $Al_2O_3$  기판과 Cr의 밀착력 뛰어난 반면 오히려 Cr과 Cu 층의 밀착력 약함을 알 수 있었다. 이의 개선을 위해서는 두 금속간의 두께와 산화 정도가 밀착력의 큰 변수로 작용하고 있음을 알 수 있었다. 차후 밀착력에 미치는 자세한 계면 반응을 규명하기 위해서는 실험이 추가로 실행되어야 할 것이다.

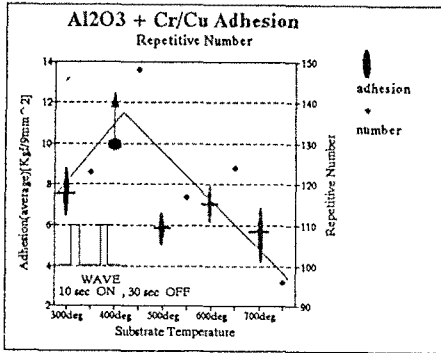


Fig. 5. Characteristics of the adhesion test

### 3.3 반복 과전류 시험

그림 5에서 오른쪽 Y축을 기준으로 하여 반복적 과전류 결과를 나타낸 것이다.

정격 전류 보다 큰 전류를 공급하여 퓨우즈가 파단 되기까지 몇 회의 전류가 인가되었는가를 횡수로 하여 플로터 하였다. 반복 과전류의 인가 횟수는 현장에서 사용 시에 몇 번의 개폐를 해도 이상이 없는가를 결정짓는 요소가 되므로 매우 중요한 의미를 갖는다. KSC 4612의 규정에 약 100회 이상의 반복 과전류에 견딜 수 있어야 하는 내용을 모두 만족는 하지만 그 중에 밀착력과 같은 곡선을 나타내며 밀착력이 가장 좋은 400℃에서 반복 회수도 약 145회 정도로 가장 많은 반복 횟수를 나타내었다. 이는 반복 시에 흐르는 전류로 인해 노치부분이 가열 또는 냉각되어도 밀착력이 뛰어나 신축 변형을 다소 감소하는데 역할을 한 것으로 생각된다.

### 3.4 차단 시험

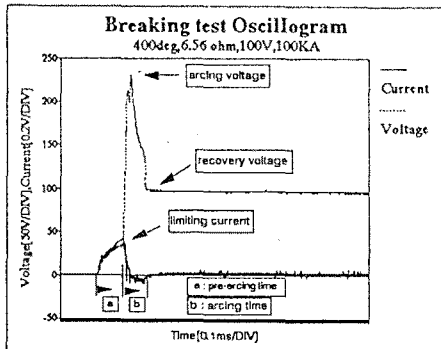


Fig. 6. Oscillogram of the breaking test

그림 6은 퓨즈차단시에 나타나는 파형을 오실로스코프(VC-6165)로 측정된 결과를 QPRO 소프트웨어를 이용하여 플로터 한 것이다. 퓨우즈가 차단될 때의 특성중 동작과 전압은 시스템에 역전압을 가해 절연 파괴를 초래할 수 있으므로 될 수 있으면 낮게 하여야 한다. 또한 과전류가 흐르게 되면 빠르게 차단 시키야 하므로 한류값은 낮을 수록 좋은 결과를 얻을 수 있게 된다.

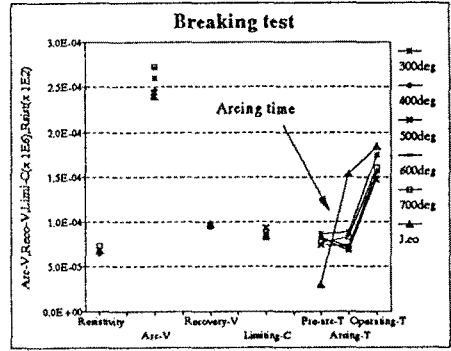


Fig. 7. Characteristics of the breaking test

그림 7은 그림 6 파형의 특징을 플로터 한 것이다. 실험에 사용된 퓨우즈의 저항은  $6.8 \pm 0.3 [\Omega]$ 이었다. 비교 실험을 하기 위해 증원전기(주)의 수입된 퓨우즈 엘리먼트도 함께 실험하였다. 차단 후 나타난 회복 전압은 약  $96 \pm 1 [V]$ , 차단 시에 퓨우즈 양단에 걸린 아크 전압은  $260 \pm 10 [V]$ , 한류값은  $85 \pm 10 [A]$ 를 나타내어 대부분 큰 특징을 알 수 없었다. 그러나 차단 시에 발생하는 아크의 영향을 분석해 본 결과 제작한 시료는 수입된 퓨우즈 엘리먼트보다 아크 시간이 매우 짧게 나타나는 특징이 있음을 알 수 있었다.

$Al_2O_3$  기판과 Cu 층 사이에 Cr층의 삽입으로 말미암아 수입 엘리먼트보다 차단 특성이 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

#### 4. 결 론

이상과 같이 RF Sputter를 이용하여 제작한 퓨우즈 엘리먼트의 밀착력과 차단시험, 반복시험 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

①.  $Al_2O_3$  기판의 Roughness가 시간 변화에 대해 3단계의 그룹을 형성하고 있는 것을 알 수 있었다. 비록  $Al_2O_3$  입자의 binder성분의 차이로도 볼 수가 있지만  $3\mu m$  정도의 크기를 갖는 균일 층의 입자를 가정한다면  $Al_2O_3$  입자가 기판에서 애칭되어 떨어져 나가는 시간은 약 200 sec 정도가 소요되는 것을 가정할 수 있었다. 또한 기존 논문의 내용중 애칭에 의해 표면 Roughness가 증가되는 것으로 보고되어 있으나 실험을 통하여 오히려 감소하는 경향을 알 수 있었다. Etched depth는 애칭 시간과 비례하게 증가하였으나 계면간의 밀착력에는 영향을 미치지 못하는 것으로 판단된다. 기판의 Roughness를 증가시키기 위해서는 기판 제조상에 비중을 두어야 할 것으로 생각된다.

②. Cu, Cr, Ni를 씨앗 층으로 만든 시료중 Cr층이 가장 우수한 밀착력을 나타내었다.

그리고 Cr은 온도  $400^\circ C$ 에서 가장 큰 밀착력을 나타내었다. 이는 Cr이 금속 산화물 형성 자유 에너지가 커  $Al_2O_3$  기판과 화학적인 결합을 하고 있기 때문으로 판단된다. 또한 Cu를 Cr위에 스퍼터 할 때 Cr-O, CuO,  $Cu_2O$ 가 계면에서 화학 반응하여 밀착력이 증가된 것으로 판단된다. 그러나 Cr과 Cu 금속 계면간의 반응 메커니즘을 규명하기 위해서는 실험이 추가로 필요할 것이다.

③. KSC 4612의 규정에 약 100회 이상의 반복 과전류에 견딜 수 있어야 하는 내용을 모두 만족하고 있음을 알 수 있었다.

또한 밀착력이 가장 좋은  $400^\circ C$ 에서 반복 회수가 약 145회로 다른 온도에 비해 약 1.5배의 신뢰성을 갖고 있음을 알 수 있었다. 이는 반복 시에 흐르는 전류로 인해 노치부분이 가열 또는 냉각되어도 밀착력이 강하면 강할 수록 신축 변형을 감소시키는 역할을 하는 것으로 생각된다.

④. 차단 시에 발생하는 아크의 영향을 분석해 본 결과 본 연구에서 제작한 시료는 수입된 퓨우즈 엘리먼트보다 아크 시간이 매우 짧게 나타나는 특징이 있음을 알 수 있었다. 이는  $Al_2O_3$  기판과 Cu 층 사이에 Cr층의 삽입으로 밀미암아 아크 지속 시간이 짧아진 것으로 판단되며 크롬을 삽입한 퓨우즈 엘리먼트는 차단 특성이 양호함을 알 수 있었다.

#### 참고문헌

- 1)이세현, "반도체 보호를 위한 속동형 한류 퓨우즈 엘리먼트의 특성 개선", 석사학위 논문, pp.1~2, 1994, 2
- 2)이세현, 한상욱 등 "세라믹기판을 이용한 半導體 保護用 Fuse Element에 관한 研究", 대한전기학회 하계 학술대회 논문집(B) pp.762-764, 1992. 7월
- 3)이세현, 한상욱 등 "半導體 保護用 Fuse의 熱化 特性에 관한 研究", 한국전기, 電子재료학회 춘계 학술대회 논문집, 1993. 5월
- 4)이세현, 한상욱 등 "限流形 Fuse Element의 노치형태에 따른 電氣적 特性 研究", 대한전기학회 하계 학술대회 논문집(B) pp.1153~1155, 1993. 7월
- 5).O. M. Akselsen, J. Master. Sci., 27, 1989(1992)
- 6).John L. Vossen, J. Vac. Sci. Technol., 8[5]s12
- 7)구자용 등, "금속-세라믹 기판의 집합공정특성 평가 기술 개발" 과학기술처 KRISS-95-003-IR, pp. 1~2, 1994
- 8)J. E. McDonald and J. G. Everhart, Trans Metall. Soc. AIME, 233, 512. (9165)
- 9)김용식, "스퍼터 방법으로 증착된 Cr 박막의 두께가  $Al_2O_3$  기판과의 접착성에 미치는 효과" 과학기술원 석사학위논문 p2-3, p51, p65MMS. 88079, 1990
- 10)조용균 등 "Alumina substrate상의 무전해 도금층의 밀착력에 관한 연구", 표면공학회지 Vol.24, No.4, 1991