

Cu-Ni계 박막 스트레인 게이지의 개발

민 남 기* 이 성 래* 김 정 완**
* 고려대학교, ** 대성 전기(주)

Development of Cu-Ni Thin Film Strain Gages

Nam Ki Min* Seong Rae Lee* Jeong Wan Kim**
* Korea University, ** Dae Sung Electric Co., Ltd.

Abstract- Thin films of Cu-Ni alloys of various compositions were prepared by RF sputtering onto glass and stainless steel substrates. The effect of composition, substrate temperature, Ar partial pressure, aging time on the electrical properties of Cu-Ni film strain gages in the thickness range 500~2000 Å was studied. The maximum resistivity is obtained from 53wt%Cu-47wt%Ni films, while their TCR becomes minimum. This tendency is very desirable for thin film strain gages.

1. 서 론

금속 박막 스트레인 게이지는 종래의 박 게이지(foil gage)와는 달리 접착제를 필요로 하지 않기 때문에 크리프 현상이 적고 안정성이 우수한 특징이 있다. 또한 박막 공정의 자동화를 통해 수율의 향상과 저가격화를 실현할 수 있으며, 열적 보상이 용이하여 동작 온도 범위가 넓고 고온에서 사용이 가능한 장점을 갖는다. 이와 같은 장점 때문에 최근 박막 스트레인 게이지에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으나,¹⁻³⁾ 제조 공정상의 문제로 아직 널리 사용되지 못하고 있으며, 특히 우리나라에서는 이 분야의 연구가 미미한 실정이다.

박막 스트레인 게이지의 저항체 선택시 고려해야할 인자로는, 비저항과 게이지율이 크고, 저항 온도 계수(TCR)가 작으며, 제조가 용이할 것 등이다. 비저항이 작으면 좁은 면적에서 원하는 저항값을 얻기가 곤란하므로 센서가 대형으로 된다. 스트레인 게이지에서는 변형에 의한 것 뿐만 아니라 온도에 의한 저항 변화도 게이지의 감도를 변화시킨다. 따라서 저항 온도 계수가 적은 박막 재료의 사용이 필수적이다.

본 연구에서는 각종 박 게이지에 널리 사용되고 있는 Cu-Ni계 합금을 사용해서 박막 스트레인 게이지(thin film strain gage)를 제작하였고, 증착 조건과 열처리에 따른 비저항, TCR, 게이지율, 출력 특성 등을 고찰하였다.

2. 실험 방법

2.1 시편 제작

본 연구에 사용된 Cu-Ni 합금 박막은 RF 및 직류 마그네트론 스퍼터 장치를 사용하여 제작하였다. 스퍼터 장치의 증착전 초기 진공도는 1×10^{-6} Torr 이하로 유지하였고, 스퍼터 전력량은 150W, Ar 분압은 2 mTorr~10 mTorr 사이, 기판온도는 상온~200°C 사이에서 변화시켰다. Cu-Ni 합금의 조성은 순도 99.99%Ni 타겟위에 상대적인 면적비를 달리한 두께 1 mm의 Cu sheet를 올려 놓고 증착함으로써 조절하였으며, 모든 시편의 조성은 ICP-AES로 확인하였다.

구조 분석용 시료는 유리 기판용 dc 바이어스 50 V에서 15분간 pre-sputtering한 후 Cu-Ni 합금 박막을 500, 1000 및 2000 Å 두께로 증착하였다. 박막 두께는 α -step을 사용하여 측정하였다.

스트레인 게이지 제작 과정은 다음과 같다. 먼저, 스테인레스강 기판위에 약 4 μ m 두께로 폴리이미드 박막을 스팀 코팅한 후 300°C에서 cure하였다. Cu-Ni 박막 증착전, 내부의 수분을 제거하기 위해 진공 상태(10^{-6} Torr 범위)에서 기판 온도를 올려 100°C에서 30분 동안 가열한 다음, 다시 진공 중에서 상온으로 냉각하거나 100 °C를 유지한 채 80 W에서 40분 동안 pre-sputtering을 실시하였고, 그 위에 구조용 시료와 동일하게 Cu-Ni 합금 박막 및 전극용 Ag를 증착하였다. 증착후 패터닝하여, 그림 1에 나타낸 구조의 박막 스트레인 게이지를 완성하였다.

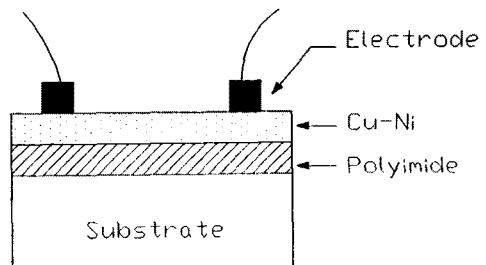


그림 1 Cu-Ni 박막 스트레인 게이지의 구조

2.2 비저항, TCR 측정, 게이지율 측정

비저항과 TCR은 4단자법을 사용하여 측정하였다. 비저항의 온도 의존성은 진공 열처리노 내부에 시료를 설치한 후, 175 °C로 부터 상온까지 10 °C/min.의 냉각 속도를 유지하면서 비저항을 측정하여 얻었으며, 이 직선의 기울기로 부터 TCR 값을 계산하였다.

게이지율은 Cantilever 방법을 이용한 게이지율 측정 장치를 자체 제작하여 측정하였다. Microstep motor로부터 인가된 힘은 Load Cell에 의해 전압으로 변환되어 Nano-voltmeter로 측정하였고, 시편의 저항은 Microvolt DMM으로 측정하여 게이지율을 결정하였다.

2.3 열처리 및 구조 분석

열처리는 순도 99.999%Ar과 99.99% H_2 를 사용하여 Ar-50% H_2 비율로 blowing하면서 100, 125, 150, 200 및 300 °C에서 100시간까지 실시하였다. 또, Ar 분압과 기판 온도를 변화시키면서 제작한 시편에 대하여 X-선 회절기를 이용해 구조 분석을 하였고, TEM을 사용하여 미세 구조를 관찰하였다.

3. 결과 및 검토

3.1 조성에 따른 전기적 특성의 변화

DC 스퍼터로 증착한 합금 박막의 경우 RF 증착막에 비해 더 큰 비저항을 갖지만, TCR도 함께 증가하여 스트레인 게이지에 요구되는 조건을 만족시키지 못하기 때문에 RF 스퍼터로 증착하는 것이 DC 스퍼터의 경우보다 더 유리하다고 생각된다.

그림 2는 RF 스퍼터로 증착한 Cu-Ni 합금 박막의 조성에 따른 비저항, TCR, 게이지율 및 결정립 크기를 나타낸 것이다. Cu 53wt%-Ni 47wt% 조성에서 최대 비저항(95 $\mu\Omega\text{cm}$) 및 최소 TCR(25 ppm/°C)이 얻어졌다. 이것은 Cu-Ni계가 전을 고용체로 되기 때문에 증착된 상태에서 조성에 따른 비저항의 변화가 첨가 원소의 효과와 같은 $\rho_i = AX_i(1-X_i)$ 형태의 조성-비저항 곡선을 나타내고 있는 것이다. 게이지율은 순수 Cu가 3, 순수 Ni이 -4 정도의 값을 나타내었으며, 50wt% Ni 까지는 약 2 정도 값을 유지하다가 그 이상에서는 Ni의 게이지율 값에 접근하고 있다. 이 값은 Kuwahara¹⁾가 실험한 결과와 일치한다. 이와 같은 실험 결과로부터 본 실험에서는 게이지 박막에 대한 최적 조성으로 53wt%Cu-47wt%Ni를 선택하였다.

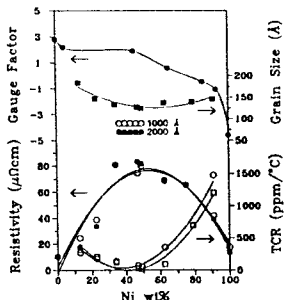


그림 2 Ni 조성에 따른 비저항, TCR, 결정립 크기 및 게이지율의 변화.

3.2 Ar 분압 및 기판 온도에 따른 전기적 특성의 변화

그림 3은 상온에서 RF 스퍼터로 증착한 합금 박막의 비저항과 TCR 변화를 Ar 분압을 파라미터로 하여 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이, 2 mTorr에서 증착된 것보다 5 mTorr와 10 mTorr에서 증착된 시료의 비저항은 거의 2 배씩 증가하였으며, 그러나 TCR의 변화는 비저항 만큼 크지 않았다.

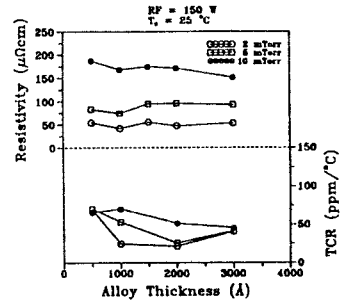


그림 3 막두께에 따른 비저항 및 TCR의 변화

그림 4는 두께 2000Å인 합금 박막의 비저항과 TCR의 기판 온도 의존성을 나타낸 것이다. 비저항은 기판 온도가 증가할수록 감소하고, 반면, TCR은 기판 온도에 따라 전반적으로 증가하고 있다.

위의 실험 결과로부터, 최대 비저항 및 최소 TCR 그리고 안정적인 박막 구조를 갖는 최적 조건은 Ar 분압이 5 mTorr, 기판 온도는 상온, 막 두께가 2000 Å이었다.

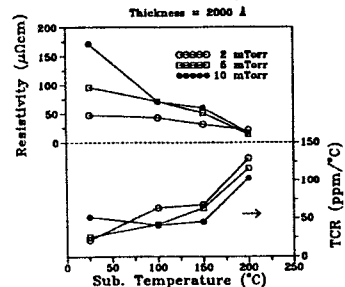


그림 4 기판 온도에 따른 비저항 및 TCR의 변화

3.3 열처리에 따른 전기적 특성 변화

열처리는 100, 200, 300 °C에서 실시하였다. 그림 5은 200 °C에서 열처리한 결과를 나타낸 것으로, 평균 결정립 크기는 초기 128 Å에서 200°C, 50시간 열처리 후 209Å으로 증가하였다. Ar 분압과 기판 온도에 따라서는 큰 변화가 없었으며, 이것으로부터 Cu₅₃-Ni₄₇계 합금은 박막의 구조 변화에 영향을 미칠것이라 예상되는 증착 변수들에 관계없이 안정된 박막 구조를 이루고 있다.

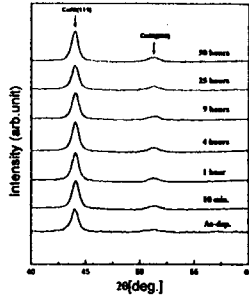


그림 5 $Cu_{53}Ni_{47}$ 박막을 200 °C에서 열처리한 후 X-ray 결과.

최적 조건에서 RF 스퍼터로 증착한 Cu-Ni 박막의 Ar 분압에 대하여 열처리 온도 및 시간에 따른 비저항의 변화를 그림 6에 나타내었다. 125°C에서는 전체적으로 열처리 시간에 따라 큰 변화가 없었지만, 비교적 높은 온도인 150°C와 200°C에서 열처리 하였을 경우는, 초기에 비저항의 급격한 감소가 발생하였다가 일정한 값으로 안정되었다. Ar 분압이 10 mTorr로 높아질수록 이러한 비저항의 초기 감소는 더욱 커진다. 최적 조건에서 증착한 시편의 경우, 125°C에서 100시간 동안 열처리 하였을 때 저항 변화는 36.4% 이었고, 150 및 200°C에서는 각각 51.5%와 61.8%로 증가하였다.

또한, 모든 온도에서 DC로 제작한 합금 박막이 증착된 상태에서는 큰 비저항을 갖지만, 100시간동안 열처리를 행한 후 저항 변화가 RF로 증착한 경우보다 훨씬 컸다. 결국 RF로 제작한 Cu-Ni 박막이 DC로 제작한 경우보다 열적 안정성, 비저항과 TCR 특성이 우수하여 스트레인 게이지 저항체 박막으로서 더 적합하다고 생각된다.

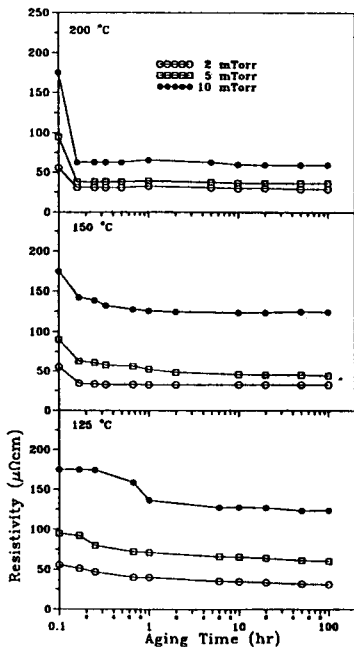


그림 6 RF 증착막의 열처리 시간에 따른 비저항의 변화

3.4 스트레인 게이지의 출력 특성

그림 7은 개발된 스트레인 게이지에 부하(압력)를 가한 후 측정된 대표적 출력 특성을 나타낸 것이다. 감도는 1.0 ~2.0 mV/V, 비선형성은 1~2% 정도이다.

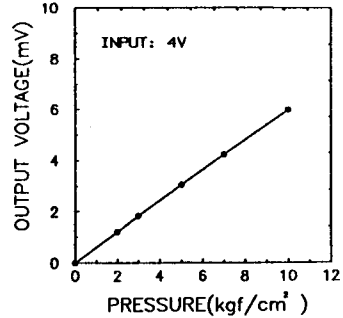


그림 7 Cu-Ni 박막 스트레인 게이지의 출력 특성

4. 결론

스퍼터 증착한 Cu-Ni계 합금 박막의 열적 안정성 및 전기적 특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다

1. RF 스퍼터한 합금 박막의 최적 증착 조건은, 조성 $Cu_{53}Ni_{47}$, Ar 분압 5 mTorr, 기판 온도는 25°C, 박막 두께 2000 Å이었다.
2. 합금 박막의 조성에 따른 비저항과 TCR의 변화는 전술 고용체계에서 첨가 원소의 효과로 인한 $\rho_i = AX_i(1 - X_i)$ 형태의 조성-비저항 곡선을 나타내었으며, 최적 조건에서 최대 비저항($95 \mu\Omega cm$)과 최소 TCR (25ppm/°C)을 보였다.
3. 최적 조건에서 RF 스퍼터한 합금 박막보다 DC 스퍼터한 합금 박막이 비저항은 $158 \mu\Omega cm$ 로 컸지만 TCR도 또한 115 ppm/°C로 증가하여 요구조건에 미치지 못하였고, 열적 안정성이 나빠서 RF 스퍼터가 유리하였다.
4. Cu-Ni계 합금 박막은 125°C에서 100시간 동안 열처리한 후에도 10% 미만의 저항 변화를 보였다. 더 높은 온도에서는 초기에 급격한 저항변화가 관측된 후 안정되었다.
5. 시작된 스트레인 게이지의 게이지율은 약 2.0, 비선형성은 1~2% 정도이다.

참고문헌

- [1] A.Garcia-Alonso, J.Garcia, E.Castaño, I.Obieta and F.J.Gracia, "Strain sensitivity and temperature influence on sputtered thin films for piezoresistive sensors," Sensor and Actuators A. No.37-38, 1993, pp.784-789.
- [2] P.Kayser, J.C.Godefroy and L.Leca, "High-temperature thin-film strain gauges," Sensor and Actuators A. No.37-38, 1993, pp.328-332
- [3] W.Hongye, L.Kun, A.Zhichou, W.Xu and H.Xun, "Ion-beam sputtered thin-film strain-gage pressure transducers," Sensor and Actuators A. No.35, 1993, pp.265-268.
- [4] K.Kuwahara, S.Nakahara and A.Nishimura, Jpn. J.Appl. Phys., 6 (1967) 267