

Cu-Ni 박막 스트레인 게이지를 이용한 다이어프램식 압력 센서-I : Cu-Ni 박막 스트레인 게이지 개발

논문
10-9-11

Diaphragm-Type Pressure Sensor with Cu-Ni Thin Film Strain Gauges-I : Development of Cu-Ni Thin Film Strain Gauges

민남기*, 이성래*, 김정완**, 조원기***

(Nam-Ki Min, Seong-Rae Lee, Jeong-Wan Kim, Won-Ki Cho)

Abstract

Cu-Ni thin film strain gauges for diaphragm-type pressure sensors were developed. Thin films of Cu-Ni alloys of various compositions were deposited onto glass and stainless steel substrates by RF magnetron sputtering. The effects of composition, substrate temperature, Ar partial pressure and aging on the electrical properties of Cu-Ni film strain gauges in the thickness range 500~2000Å are discussed. The maximum resistivity(95.6 $\mu\Omega\text{cm}$) is obtained from 53wt%Cu-47wt%Ni films, while the temperature coefficient of resistance(TCR) becomes minimum(25.6ppm/°C). The gauge factor is about 1.9.

Key words(중요용어) : Cu-Ni 박막, 박막 스트레인 게이지, 박막 압력 센서

1. 서 론

다이어프램식 압력 센서용 스트레인 게이지로는 박 게이지(foil-type strain gauge)가 널리 사용되어 왔으나, 최근에는 박막기술을 이용한 스트레인 게이지가 주목을 받고 있다. 박막 게이지의 가장 중요한 특징은 접착제가 불필요하기 때문에 크리프 현상이 적고 안정성이 우수하며, 또한 박막의 종류나 특성을 자유롭게 선택할 수 있으므로 고온, 고감도와 같은 특수 목적에 적합한 압력 센서의 제작이 가능한 점이다. 이와 같은 장점 때문에 최근 박막 스트레인 게이지에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 금속 및 합금 박막 게이지에 관한 다수의 논문이 발표되고 있다.¹⁻¹⁰⁾

금속 박막 스트레인 게이지에 사용하는 저항체는 적절한 비저항과 큰 게이지율을 가지며, 저항의 온도 계수(TCR)가 작고 제조가 용이해야 한다. 비저항이 너무 작으면 좁은 면적에서 원하는 저항값을 얻기가 곤란하므로 센서가 대형으로 된다. 또, 변형뿐

만 아니라 온도에 의해서도 스트레인 게이지의 저항 변화가 발생하여 이것이 게이지의 감도에 영향을 주기 때문에 TCR이 작은 재료의 사용이 필수적이다.

현재 논문에 발표된 금속 스트레인 게이지 재료로는 NiCr계 합금¹⁾⁸⁻⁹⁾, CuNi계 합금⁵⁾, AuNi⁷⁾, Bi-Sb²⁾, Au³⁾, TiCN⁴⁾, Mn⁶⁾, TaON¹⁰⁾ 등이 있으며, NiCr계 합금과 CuNi계 합금은 저항의 온도계수가 작아 정적·동적 변형의 측정용 박 게이지로 널리 사용되고 있다. 박막 스트레인 게이지의 경우는 NiCr계 합금에 관한 연구가 가장 많이 발표되고 있다. 그러나 NiCr계 합금의 비저항이 높기 때문에 게이지와 전극에 동일 재료를 사용할 수 없는 제약이 따른다.⁵⁾ 한편, CuNi계의 비저항은 NiCr계보다 훨씬 작기 때문에 전극재료의 선택이 자유롭다. Konish⁵⁾ 등은 RF 스퍼터링에 의해 제작한 Cu-Ni 박막 스트레인 게이지를 사용해서 로드 셀의 온도 특성(TCR)을 간단히 고찰하였으며, 기관-게이지 사이의 절연체로 폴리이미드를 사용하였다. 그러나, 일반적으로 폴리이미드보다 SiO₂ 절연막이 더 우수한 게이지 특성을 나타내는 것으로 보고되고 있다.¹¹⁾ 또한 SiO₂ 박막은 Cu-Ni 박막과 동일한 장치를 사용해 연속 증착이 가능하므로 공정의 단순화와 저가격화 측면에서도

* : 고려대학교 공대 제어계측공학과, 금속공학과

** : 대성전기(주)

*** : LG 멀티미디어 연구소

유리하다.

본 논문에서는 Cu-Ni 합금과 SiO₂ 절연막을 사용해 압력 센서용 박막 스트레인 게이지를 제작하여 박막 제작 조건에 따른 Cu-Ni 박막의 미세 구조의 변화, 비저항, TCR, 게이지율 등을 고찰하였다.

2. 실험

2.1 Cu-Ni 박막 및 게이지 제작

본 연구에 사용된 Cu-Ni 합금 박막은 RF 마그네트론 스퍼터 장치를 이용하여 제작하였다. Cu-Ni 박막의 조성은 순도 99.99%인 Ni 타겟위에 상대적인 면적비를 달리한 두께 1 mm의 Cu 시트(sheet)를 올려 놓고 증착하여 합금의 조성을 조절하였으며, 모든 시료의 조성은 ICP-AES로 확인하였다. 스퍼터 장치의 진공도는 1×10^{-6} Torr 이하로 유지하였고, 증착시 Ar 분압(P_{Ar})은 2~10 mTorr사이에서 변화시켰다. 또, 스퍼터 전력은 150 W로 고정하였고, 기판 온도(T_s)를 상온에서 200 °C까지 변화시키면서 증착하였다.

구조 분석용 시료는 초음파로 세척한 유리 기판을 50V의 직류 바이어스에서 15 분간 sputter-etching 하고, 상온에서 40분간 pre-sputtering을 한 다음 순수 Cu, Ni 및 Cu-Ni 합금 박막을 500, 1000 및 2000 Å 두께로 증착하였다. 증착후 박막 두께는 α -step을 이용하여 확인하였다.

스트레인 게이지의 제작과정은 다음과 같다. 먼저 스테인레스 강 기판을 400,800,1200 사포로 그라인딩한 다음 3 μ m 다이아몬드 현탁액으로 폴리싱한 후 TCE, 아세톤, 알코올 순서로 초음파 세척하여 건조시켰다. 이렇게 준비된 기판을 홀더에 장착한 다음

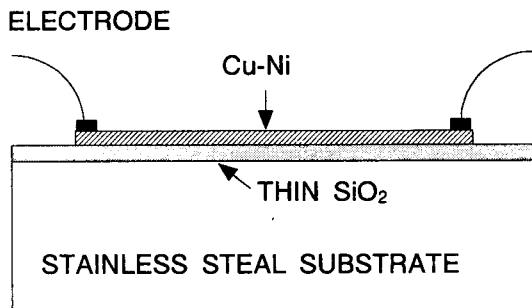


그림 1. Cu-Ni 박막 스트레인 게이지의 단면도.
Fig. 1. Cross section of the Cu-Ni thin film strain gauge.

두께 약 1.2 μ m의 SiO₂ 절연막을, 그 위에 구조 분석용 시료와 동일한 방법으로 두께 2000Å의 Cu-Ni 합금 박막을, 그 위에 다시 두께 0.5-1 μ m의 Ag 박막을 연속 스퍼터링하였다. 증착후 2개의 마스크를 사용해 에칭을 반복하여 그림 1에 나타난 구조의 Cu-Ni 박막 스트레인 게이지를 완성하였다.

2.2 비저항, TCR 및 게이지율 측정

비저항과 TCR은 4단자법을 사용하여 측정하였다. 제작된 시료의 양단에 0.001A의 일정 전류를 흘려주면서 비저항을 상온에서 측정하였고, TCR은 온도를 변화시키면서 나타나는 전압 변화를 Nanovoltmeter (nVM)로 측정한 후, 저항식에 의해 비저항을 계산하였다.

비저항의 온도 의존성은 진공 열처리노 내부에 시료를 설치한 후, 175 °C로 부터 상온까지 냉각 속도 10 °C/min을 유지하면서 측정하였고, 온도에 대한 비저항의 변화 곡선의 기울기로 부터 TCR 값을 구하였다.

게이지율은 그림 2와 같은 Cantilever beam 게이지율 측정 장치를 자체 제작하여 측정하였다. Microstepping motor가 로드 셀에 부착된 침을 구동시켜 일정한 힘을 게이지의 한쪽 끝에 인가하면 게이지의 저항이 변한다. 가해진 힘은 로드 셀을 통하여 전압으로 변환되고, 이것을 Nanovoltmeter(nVM)로 측정하여 힘의 크기로 환산하였다. 게이지의 저

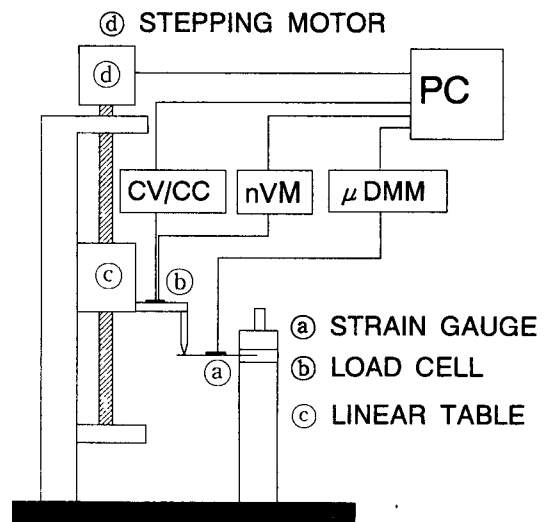


그림 2. 게이지율 측정 장치.
Fig. 2. The experimental set-up used for gauge factor measurement.

항 변화는 디지털 멀티미터(μ DMM)로 측정하였다. 게이지율은 다음과 같은 수식을 이용하여 구하였다.¹²⁾

$$\sigma = E \varepsilon = \frac{Mc}{I} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{Mc}{EI} = \frac{w \ell h/2}{Eb h^3/12} = \frac{6w \ell}{Eb h^2} \quad (2)$$

여기서, $M=w \ell$ 은 가해진 모멘트(N·m), h 는 빔의 두께($=1.5 \times 10^{-3}$ m), $c=h/2$ 는 중앙축위의 표면으로부터 떨어진 거리(m), $I=bh^3/12$ 는 수평빔이 수직으로 가해질 때의 모멘트(N·m), w 는 가해진 무게(N), ℓ 은 빔의 길이($=110 \times 10^{-3}$ m), b 는 빔의 폭($=12.5 \times 10^{-3}$ m)을 각각 나타낸다.

모든 실험에서, 측정 장치를 IEEE-488 버스를 통하여 PC에 접속시켜 데이터를 수집하고 제어하였다.

2.3 구조 분석

증착시 Ar 분압과 기판 온도를 변화시키면서 제작한 시료에 대하여 X-선 회절상을 분석하였고, TEM을 사용해 Cu-Ni 박막의 미세 구조를 관찰하였다. 사용된 X-선 회절기는 Rigaku사의 모델 RTP 300 RC로 가속 전압은 40 kV이고, 전류는 80 mA였다. 미세 구조 관찰에 사용된 TEM은 Jeol사의 모델 JEM-1200EX로 가속 전압 120kV, 사용 전류 85 μ A였다.

열처리에 따른 미세 구조와 저항 변화를 알아보기 위해서, 순도 99.999%Ar 과 99.999%H₂를 혼합하여 blowing하면서 100, 125, 150, 200°C에서 100 시간까지 열처리를 실시한 후, 각 온도에서 열처리 시간에 따른 저항 변화를 고찰하였다.

3. 실험 결과 및 검토

3.1 조성에 따른 박막 특성

그림 3은 Cu-Ni 박막의 조성에 따른 X-선 회절상의 변화를 나타낸 것이다. Cu-Ni 합금의 fcc(111) 피크의 면간거리로부터 격자 상수를 구하면 그림 4와 같다. 격자 상수는 Ni 함량이 증가할수록 순수 Cu fcc(111)의 격자 상수로부터 직선적으로 변화해서 순수 Ni fcc(111)의 격자 상수에 접근하는 것을 볼 수 있다. 이 결과로부터 Cu-Ni 합금이 전율 고용체임을 알 수 있으며, 이것은 격자 상수가 각 상의 at%에 비례하는 Vegard's law¹³⁾와 잘 일치한다.

그림 5는 Cu-Ni 합금 박막의 조성에 따른 비저항,

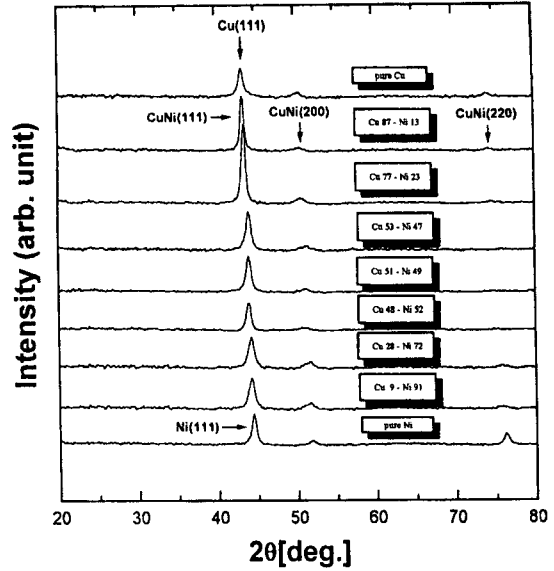


그림 3. Cu-Ni 합금 박막의 X-선 회절상. Ar분압 =5 mTorr.

Fig. 3. XRD patterns of as-deposited Cu-Ni alloy films. P_{Ar}=5 mTorr.

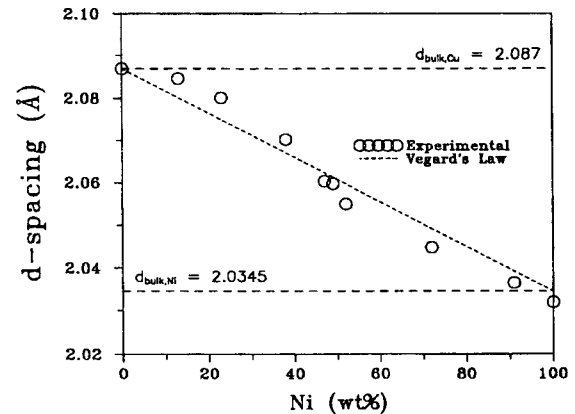


그림 4. Ni 농도에 따른 격자 상수의 변화.

Fig. 4. Variation in the lattice parameter with Ni composition.

저항 온도 계수(TCR), 게이지율(GF)를 나타낸 것으로, 53wt%Cu-47wt%Ni 조성에서 최대 비저항(95.6 μ Ωcm) 및 최소 TCR(25.6 ppm/°C)이 얻어졌다. 이것은 Cu-Ni계가 전율 고용체를 이루고 있기 때문에 증착된 상태에서 조성에 따른 비저항의 변화가 첨가 원소의 효과와 같은 $\rho_i = 2.77x_i(1-0.01x_i)$ 형태의 조성-비저항 곡선을 나타내는 것으로 생각된다.

게이지율은 순수 Cu와 Ni이 각각 3 과 -4 정도의 값을 나타내었고, 53wt%Ni 까지는 약 2 정도 값을 유지하다가 그 이상에서는 Ni의 게이지율 값에 접근하고 있다. 이 값은 Kuwahara¹⁴⁾의 실험 결과와 일치하며, 그에 의하면 Ni의 게이지율이 부(-)로 되는 것은 Ni의 자화에 의한 영향으로 전자의 평균자유행로가 길어지는 것에 기인하는 것으로 알려지고 있다. 따라서 박막 스트레인 게이지에 요구되는 비저항, 온도 계수, 게이지율을 얻기 위해서는 Cu-Ni 박막의 조성이 곡선의 중간 영역에서 선택되어야 하며, 본 연구에서는 게이지를 위한 최적 조성으로 53wt%Cu-47wt%Ni을 채택하였다.

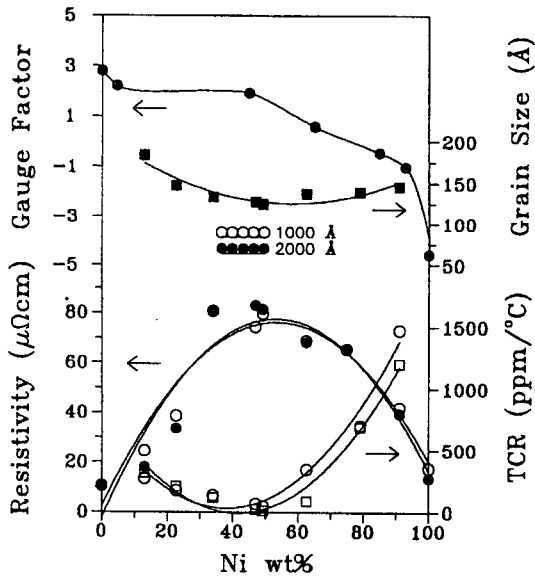


그림 5. Ni조성에 따른 Cu-Ni 박막의 비저항, TCR, 결정립 크기 및 게이지율의 변화. Ar 분압 =5mTorr, 전력=150W, 기판온도=상온.

Fig. 5. Variations of resistivity, TCR, grain size and gauge factor of Cu-Ni films with Ni composition. P_{Ar} =5 mTorr, power=150W, T_s =room temperature.

3.2 Ar 분압 및 기판 온도에 따른 박막 특성

그림 6은 상온에서 증착한 $Cu_{53}Ni_{47}$ 박막의 증착시 Ar 분압에 따른 TEM 관찰 결과를 나타낸 것이다. Ar 분압이 2 mTorr에서는 치밀한 박막이 얻어졌고, 5 mTorr에서는 2 mTorr 보다 덜 치밀하고 입계가 나타나기 시작했다. 10 mTorr 시료의 조직은 2 및 5 mTorr보다 상대적으로 덜 치밀하며, 입계가 뚜렷이 격리된 주상정 결정으로 성장했음을 알 수 있다.

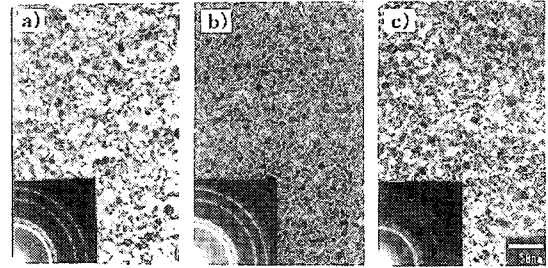


그림 6. $Cu_{53}Ni_{47}$ 박막의 Ar분압에 따른 명시야상과 제한시야 회절상.

a)2 mTorr, b)5 mTorr, c)10 mTorr.

Fig. 6. Bright field images and SAD patterns of as-deposited $Cu_{53}Ni_{47}$ films for different Ar pressure.

a)2mTorr, b)5mTorr, c)10mTorr.

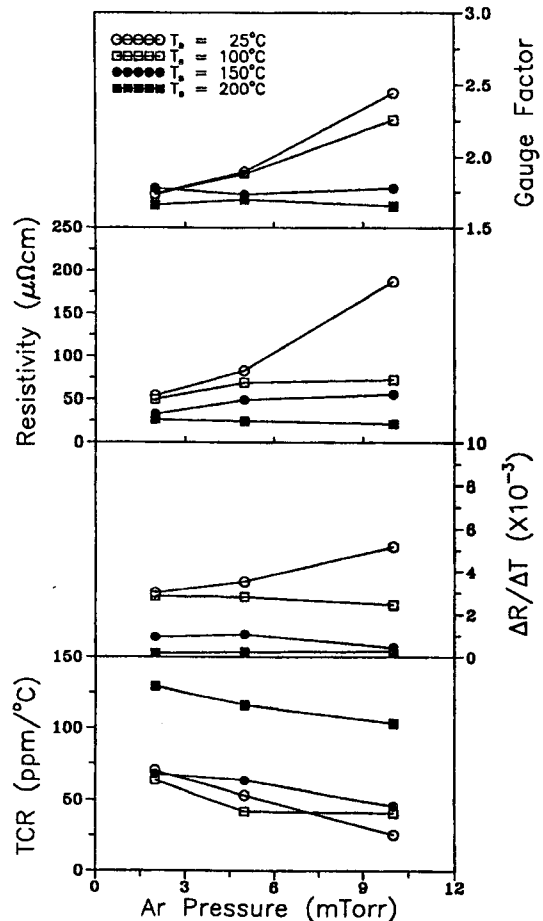


그림 7. Ar 분압에 따른 $Cu_{53}Ni_{47}$ 박막의 비저항, TCR, 게이지율의 변화.

Fig. 7. Variations of resistivity, TCR and gauge factor of $Cu_{53}Ni_{47}$ films with Ar pressure.

그림 7은 Ar 분압과 기판 온도에 따른 $\text{Cu}_{53}\text{Ni}_{47}$ 박막의 비저항, TCR, 게이지율의 변화를 나타낸 것이다. 전체적으로 Ar 분압이 높아질수록 비저항은 증가하고, $\Delta R/\Delta T$ 가 일정하기 때문에 TCR은 감소하고 있으며, 게이지율은 비저항이 마찬가지로 증가하였다. 비저항이 증가하는 것은 그림 6에서 알 수 있듯이 박막 구조가 치밀하지 못하여 결정들 사이의 경계가 전도 전자에 장벽으로 작용하기 때문으로 생각된다. 또, 기판 온도가 증가하면 저항은 감소하고 200°C에서는 거의 변하지 않는다. 이는 기판 온도가 높을수록 박막내의 결함 농도가 감소하여 비저항이 낮아지는 것으로 생각된다.

3.3 열처리에 따른 박막 특성

$\text{Cu}_{53}\text{Ni}_{47}$ 박막의 열처리는 100, 125, 150, 200 °C에서 실시하였다. 그림 8은 5 mTorr의 Ar 분압에서 증착한 $\text{Cu}_{53}\text{Ni}_{47}$ 박막을 200 °C에서 50시간 동안 열처리 한 경우, 열처리 시간에 따른 X-선 회절상의 변화를 나타낸 것으로, CuNi (111) 피크의 강도 증가 및 반가폭의 감소로 평균 결정립 크기가 증가함을 알 수 있다. 열처리 온도 100과 200°C에서 50시

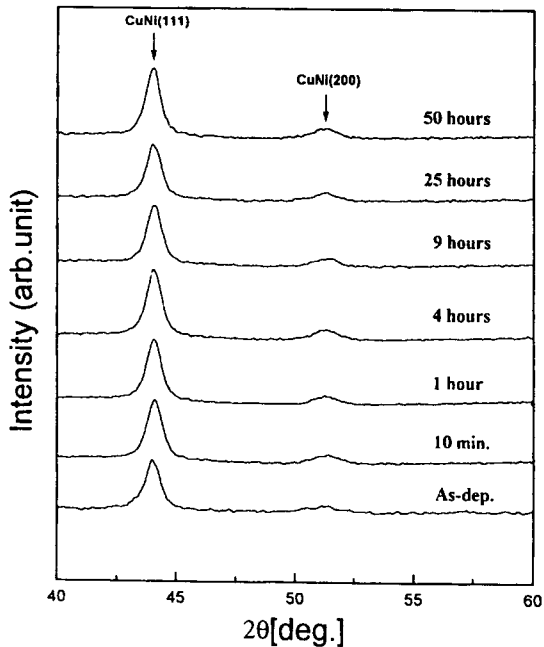


그림 8. $\text{Cu}_{53}\text{Ni}_{47}$ 박막을 200°C에서 열처리한 후 X-ray 결과.

Fig. 8. XRD patterns of $\text{Cu}_{53}\text{Ni}_{47}$ alloy films after aging at 200°C.

간 열처리후 평균 결정립 크기는 열처리전 128 Å에서 각각 139Å과 163Å으로 증가하였다.

최적 조건에서 증착한 $\text{Cu}_{53}\text{Ni}_{47}$ 박막의 열처리 온도 및 시간에 따른 비저항의 변화를 그림 9에 나타내었다. 열처리 온도가 100 °C인 경우, 열처리 시간에 따른 비저항의 변화가 매우 서서히 일어났으나, 열처리 온도가 증가할수록 비저항이 초기에는 급격하게 감소한 다음 일정치로 안정됨을 볼 수 있다. 이는 증착된 상태에서 박막 내부에 존재하는 격자 결함이 열처리를 행함에 따라 응력 완화 효과와 함께 열처리 초기에 이동 또는 소멸되어 비저항의 큰 감소를 가져오고, 그 이후 결정립 크기의 증가에 기

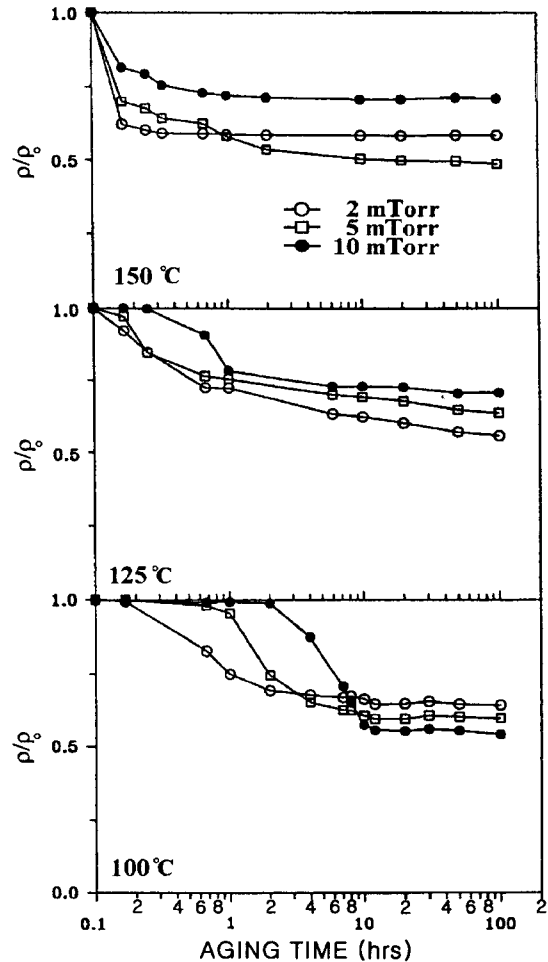


그림 9. $\text{Cu}_{53}\text{Ni}_{47}$ 박막의 열처리 온도에 따른 비저항 및 TCR의 변화. 막두께=2000Å.

Fig. 9. Variation in the resistivity with aging time for $\text{Cu}_{53}\text{Ni}_{47}$ films. Film thickness =2000Å.

인하는 비저항의 변화는 작기 때문인 것으로 생각된다. 또, 예상과는 달리 오히려 더 치밀한 박막 구조를 가지는 Ar 분압 2mTorr의 시편이 상대적으로 덜 치밀한 Ar 분압 10mTorr의 시료보다 비저항의 초기 감소가 더욱 크다. 그림 6에서 설명한 바와 같이, 2mTorr의 분압에서 제작한 시료는 전체적으로 치밀한 조직을 가지나, 10mTorr 분압에서 제작한 시편의 경우는 치밀한 조직이외도 치밀하지 못한 입계 영역이 상당부분 존재한다. 따라서, 2mTorr에서 증착한 시료가 격자 결함의 이동 및 응력 완화 효과가 큰 치밀한 조직을 상대적으로 많이 가지고 있으므로 초기 비저항의 감소가 크다고 생각된다.

4. 결 론

RF 스퍼터로 증착한 Cu-Ni 합금 박막과 그것을 이용해 제작한 압력 센서용 스트레인 게이지의 구조 분석 및 전기적 특성을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Cu-Ni 박막 특성에 가장 큰 영향을 미치는 파라미터는 Ni 조성과 Ar 분압이었다. Cu-Ni 합금 박막의 조성에 따른 비저항과 TCR의 변화는 전용 고용체계에서 첨가원소의 효과로 인한 $\rho_i = 2.77x_i(1 - 0.01x_i)$ 형태의 조성-비저항 곡선을 나타내었으며, $Cu_{53}Ni_{47}$ 에서 최대 비저항($95.6 \mu \Omega \text{cm}$)과 최소 TCR($25.6 \text{ppm}/^\circ\text{C}$)이 얻어졌다. 따라서 본 논문에서는 스트레인 게이지를 위한 Cu-Ni 박막의 최적 조성으로 $Cu_{53}Ni_{47}$ 를 선택하였으며, 이때 게이지율은 약 1.9이다.

2. Ar 분압이 높아질수록 비저항과 게이지율은 증가하고 TCR이 감소하였다. 그러나 기판온도를 증가시키면, 비저항과 게이지율이 감소하고 TCR이 증가하여 스트레인 게이지에 요구되는 조건과 반대의 특성을 나타내었다.

3. Ar 분압이 작을수록 열처리에 따른 비저항의 초기 감소가 더 크게 일어났으며, 모든 열처리 온도에서 수시간 후에는 일정한 비저항값으로 안정되었다.

* 본 연구는 통상 산업부의 공업기반기술개발사업에 의해서 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. K. Bethe and D. Schon, "Thin-film strain gauge

transducer," Philips Tech. Rev., vol.39, pp.94-101, 1980.

2. S.Sampath and K.V. Ramanaiyah, "Behaviour of Bi-Sb alloy thin film as strain gauges," Thin-Solid Films, vol.137, pp.199-205, 1986.

3. K. Rajana and S. Mohan, "Longitudinal and transverse strain sensitivity of gold film," J. of Material Science Letter, vol.6, pp.1027-1029, 1987.

4. J.F. Lei, H. Okimur and J.O. Brittain, "Evaluation of some thin film transition metal compounds for high temperature resistance strain gauge application," Materials Science and Engineering A, vol.111, pp.145-154, 1989.

5. H. Konishi, T. Suzuki and M. Utsunomiya, "Constantan thin film strain gauge load cell," Tech. Digest of the 9th sensor symposium, pp.149-152, 1990.

6. K. Rajanna and S. Mohan, "Thin-film pressure transducer with manganese film as the strain gauge," Sensors and Actuators A vol.24, pp. 35-39, 1990.

7. K. Rajanna, S. Mohan, M.M. Nayak, N. Gunasekaran, and A.E. Muthunayagam, "Pressure Transducer with Au-Ni Thin-Film Strain Gauges," IEEE Trans. Electron Devices, vol 40, no.3, pp.521-524, 1993.

8. W. Hongye, L. Kun, A. Zhichou, W. Xu and H. Xun, "Ion-beam sputtered thin-film strain-gage pressure transducers," Sensors and Actuators A. vol.35, pp.265-268, 1993.

9. H. Grange, C. Maeder, C. Bieth, S. Renard and G. Delapierre, "Thin film strain gauges on polymers: main characteristics," Sensors and Actuators, A. vol.46-47, pp.213-217, 1995.

10. I. Ayerdi, E. Castano, A. Garcia-Alonso, F.J. Gracia, "Characterization of tantalum oxynitride thin films as high-temperature strain gauges," Sensors and Actuators A, vol.46-47, pp.218-221, 1995.

11. T. Bravo, A. Tersalvi and A. Tosi, "Comparison of SiO_2 and polyimide as a dielectric layer on stainless steel in thin-film pressure sensor manufacture," Sensors and Actuators A, vol.32, pp.611-615, 1992.

12. J.Pople, in A.L. Window and G.S. Holister(eds), strain gauge technology, Applied science publishers, London, p.256, 1982.
13. B.D. Cullity, Elements of X-ray diffraction, 2nd ed., Addison-Wesley Publishing Company, Inc., ch.12, p.376, 1987.
14. K. Kuwahara, S. Nakahara and A. Nishimura, "Elastoresistance effect in thin films of Cu-Ni," Jpn. J. Appl. Phys., vol.6, p.267, 1967.

저자소개



민남기

1950년 7월 12일생. 1974년 2월 25일 고려대학교 전기공학과 졸업. 1976년 2월 25일 고려대학교 대학원 졸업(석사). 전기전자 재료공학전공. 1979년 3월-'84년 8월 동국대학교 전기공학과 조교수. 1989년 8월 Cincinnati 대학교(미국) 전자공학과 졸업.

반도체소자 및 센서 전공. 1990년 3월-현재 고려대학교 제어계측 공학과 교수. 연구분야: 반도체소자, 마이크로센서, 마이크로머시닝,



김정환

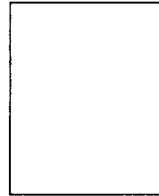
1968년 3월 12일생. 1995년 2월 수원대학교 공대 전자재료과 졸업(학사). 현재 대성전기(주) 기술연구소 프로젝트팀 연구원.



이성래

1954년 2월 23일생. 1979년 고려대학교 공대 금속공학과 졸업. 1983년 Univ. of Notre Dame대학원 재료공학과 졸업(Ph.D.). 1988년 3월-1991년 2월 고려대학교 공대 부교수. 1991년 3월-현재 동 대학교 정교수. 1992년 1월-1993년 1월

Argonne National Lab. Visiting Scientist.



조원기

1967년 5월 5일생. 1990년 고려대학교 공대 금속과 졸업. 1996년 동 대학교 대학원 금속공학과 졸업(석사). 현재 멀티 미디어 연구소 연구원.