

Ni-Cr-Al-Cu계 박막저항의 전기적 특성

Electrical Characteristic of Ni-Cr-Al-Cu Alloy Thin Film Resistors

이봉주*, 차성익**, 김철수***, 한정인***, 김종택*, 이덕출*

(Boong-Joo Lee*, Sung-Ik Cha**, Chul-Soo Kim***, Jeong-In Han***, Jong-Taek Kim*, Duck-Chool Lee*)

Abstract

In this work, we made the precision thin film resistors of NiCr alloy (74wt%Ni-18wt%Cr-4wt%Al-4wt%Cu) using DC/RF magnetron sputtering method and studied the sheet resistance and TCR(Temperature Coefficient of Resistance) etc.. of the Ni-Cr-Al-Cu alloy thin film according to the change by annealing treatment to 400°C in air and nitrogen atmosphere and the change (power, pressure, substrate temperature) of sputtering process.

Key Words : thin film resistor, Sputtering method, annealing, TCR:Temperature Coefficient of Resistance

1. 서론

첨단전자산업의 발전으로 정보통신, 우주항공 및 정밀계측분야에서 급격한 기술적인 진보를 보이고 있으며, 이에 따라 적용되고 있는 핵심 전자부품들도 고정밀화, 복합화 그리고 고효율성 및 미세조정 기능에 대한 요구의 증가로 계속적으로 발전되어오고 있다.

이중에서도 저항은 주로 전류의 흐름을 제한하여 회로의 각 소자에 목적인 전류를 공급하거나 또는 전압을 분할하는데 사용되는 대표적인 회로의 기초 부품으로 최근 저항온도계수가 낮은 고정밀 저항에 대한 요구가 대두되고 있다.

일반적으로 고정밀급 박막형 저항으로 사용되어지고 있는 NiCr계 합금 박막은 낮은 저항온도계수

(TCR), 높은 안정성 및 신뢰성의 특성을 가지므로 정밀급 저항관련 전자부품에 많이 응용되고 있으며, 최근까지 박막 제조 공정, 재료 조성 등에 따른 전기·물리적 특성에 관한 많은 연구가 행하여져 왔다.[1-12, 14] NiCr계 합금 박막에 대한 초기의 연구는 주로 증발(evaporation)방법[13]으로 박막을 제작하였으나 이 방법의 경우 Ni과 Cr의 증기압 차이 때문에 제조된 박막의 조성 재현성이 어려운 단점이 있으므로, 최근에는 주로 스퍼터(sputter)방법으로 제조된 NiCr계 박막에 대한 연구가 발표되고 있다. 또한, NiCr의 2원계 합금에 Al, Cu, Si, Mn, Mo 등의 원소를 첨가함으로써 박막의 TCR 및 비저항 특성 등 전기적 특성의 변화를 유도하기 위한 연구[2-7]가 수행되었으며, 고온에서 열처리에 의한 박막의 특성 변화에 대한 연구[7-12]가 발표되었다.

따라서 본 연구에서는 고정밀급 박막저항을 제조하기 위하여 NiCr계 합금 중 $\pm 5\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 범위의 낮은 벌크(bulk) 저항온도계수 특성을 갖는 Evanohm S 합금(74wt%Ni-18wt%Cr-4wt%Al-4wt%Cu)target으로 스퍼터를 사용하여 박막을 제조하였으며, 공기 및 N₂ 분위기에서 400°C까지 열처리에 따른 Ni-Cr-Al-Cu 합금 박막의 저항온도계수 및 저항 등 전기적 특성의 변화를 중점적으로 연구하였다.

* : 인하대학교 전기공학과 기능성박막연구실

(인천광역시 남구 용현동 253번지)

Fax: 032-863-5822

E-mail : aprilb@daum.net)

** : 주식회사 아크로센스

*** : 전자부품연구원(KETI)

2001년 1월 10일 접수, 2001년 2월 21일 1차심사완료

2001년 3월 19일 2차심사완료

2. 실험 방법

박막형성을 위해 DC/RF 마그네트론 스퍼터장치(EOS-310,APEX)를 이용하였고, 스퍼터 공정조건 및 박막저항 시편의 제조공정도는 각각 표1과 표2에 나타내었다. 실험에 사용된 Target의 경우 74wt%Ni-18wt%Cr-4wt%Al-4wt%Cu 합금을 이용하였고 기판의 경우는 일반적으로 박막용 알루미늄나(Al₂O₃) 기판을 사용하였으며, 박막의 두께, 면저항, 결정상 및 재료성분 특성 등을 분석하기 위해 glass기판을 사

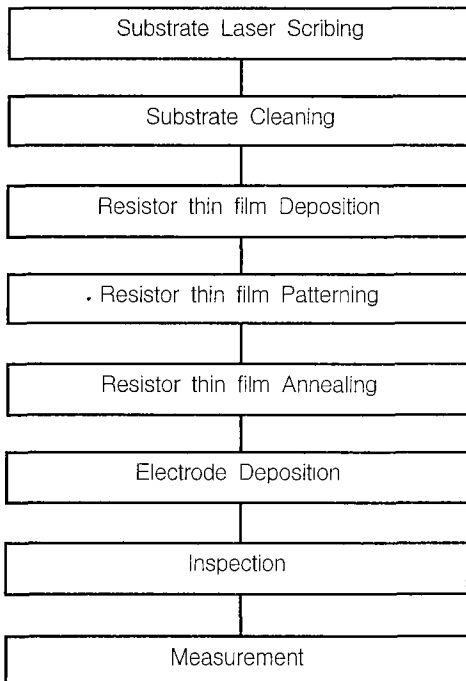
표 1. 스퍼터링 조건.

Table 1. Sputtering condition.

구 분	증 착 조 건
기판온도 (°C)	25, 200, 300
DC Power (W)	250 ~ 550
Pressure (mTorr)	5 ~ 25
Ar Gas Flow (sccm)	30 ~ 60
Annealing	150°C ~ 400°C (Air, N ₂)

표 2. 박막저항 시편의 제조공정도.

Table 2. Flow chart of thin film resistor.



용하였다. 알루미늄 기판은 3" × 3" 크기로 레이저 스크라이빙(laser scribing)을 하여 사용하였다.

박막의 미세구조 변화는 TEM(Transmission Electron Microscope, Phillips CM30)을 이용하여 관찰하였고, TEM 측정용 시편은 dimple grinder 장비를 사용하여 약 20μm의 두께로 연마하였다. 연마된 시편은 Ar-ion milling (Gatan dual ion-mill)장비를 사용하여 최종 TEM 시편을 제작하였으며, 이 시편을 가속전압 200kV하에서 미세조직 및 SAD (Selected Area Diffraction)패턴 분석을 하였다. 또한 조성분석을 위해서 XRD(X-ray Diffraction, Phillips X'PERT-MPD)와 EPMA (Electron Probe Micro Analyzer, CAMECA SX-51) 및 EDS(Energy Dispersive Spectroscopy)방법을 사용하였다. 이때 XRD측정은 Cu target을 사용하여 2θ = 20° ~ 100°의 범위로 시편을 scanning 하였고, EPMA측정은 15keV, 20nA, 20μm의 beam을 이용하였다. 스퍼터에 의해 증착된 박막의 면저항 및 두께를 측정하기 위해 면저항측정기(4-Point Probe, ChangMin Tech), 두께측정기(Dektak³, α-step)을 사용하여 측정하였다.

증착된 저항막을 패터닝(patterning)을 하기 위해 positive PR(AZ1512)을 사용하여 500rpm/10sec, 5000rpm/30sec로 spin coater(WS-400, Laurell)로 도포한후 soft baking(100°C, 60sec; hot plate)을 하였으며, mask aligner(MA-6, Karl-suss)을 이용하여 40sec 동안 노광한후 hard baking(110°C, 80sec; hot plate)을 하였고, 전용 developer로 현상하였다. etching의 경우는 상용화되고 있는 Cr-7K을 이용하여 박막의 두께에 따라 에칭시간의 차이를 두었다. 패터닝한 후의 관찰을 위해서는 광학현미경(Optical Stereoscope, LeicaWild M3Z)을 사용해 분석하였다.

저항막 설계는 3가지의 저항부분으로 설계되었다. 설계시 고려되었던 사항은 다음과 같다. 일반적인 저항은 아래 식(1)과 같이 계산할 수 있다.

$$R = \rho \cdot \frac{L}{tW} \tag{1}$$

여기서 ρ는 비저항(Ω·cm), L은 저항의 길이(cm), t는 저항막의 두께(cm), W는 저항막의 폭(cm)이다. 일반적으로 비저항은 면저항(R_s, Ω/□)과 막두께의 곱과 같으므로 위의 식(1)은 아래의 식(2)과 같이 쓸 수 있다.

$$R = \frac{R_s L}{W} \tag{2}$$

저항값은 막증착후 저항막의 면저항과 두께는 각각 27Ω/□와 2000Å인 경우, 총면저항이 0.5, 1, 1.5

kΩ이 되도록 3종류로 설계를 하였으며, 개별시편의 크기는 TCR 측정이 쉽도록 2mm×4mm로 정하였고, 저항막은 일자형으로 선폭 114μm, 55μm, 37μm 설계하였다. 그림 1은 각각의 단위 cell의 설계도이다.

제조된 저항박막의 저항온도계수(TCR)를 측정하기 위해 TCR chamber(4220A, S&A)을 사용하였다. 이때의 측정조건은 설정온도에서 10분을 유지하여 측정하였으며, 일반적으로 25°C에서의 저항(R₂₅)을

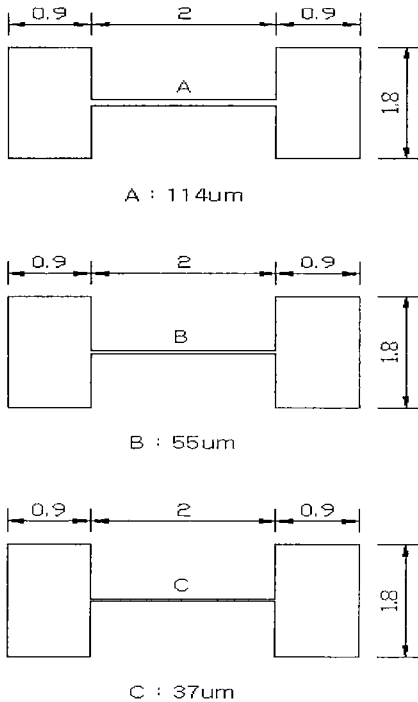


그림 1. 박막저항의 단위셀.
Fig. 1. Cell of thin film resistor.

기준으로 하여 85°C에서의 저항(R₈₅)을 측정한 후 그 값을 아래식(3)로부터 계산하였다. 여기에서 TCR은 저항온도계수, ΔR은 특정한 온도구간(25°C~85°C)에서의 저항변화량이고, ΔT는 온도구간차이다.

$$TCR[ppm/°C] = \frac{1}{R_{25}[\Omega]} \cdot \frac{\Delta R[\Omega]}{\Delta T[°C]} \quad (3)$$

3. 실험결과

3.1 Target 및 박막의 조성분석

실험의 신뢰성 확보를 위해 제조된 target 재료의

균질성 및 조성을 EPMA를 사용하여 조성을 분석하였고 미세구조는 SEM의 BSE (Back Scattered Electorn) image로 관찰하여 그 결과를 각각 그림2, 표3에 나타내었다. 그림에서 보면 4원계 Ni-Cr-Al-Cu target은 균일한 단일상(單一相)으로 되어있지 않고, Ni-rich상과 Cr-rich상의 2가지 상으로 크게 분리되어 있음을 알 수 있다. 여기서 밝은 부분은 Ni-rich상이고, 검은색으로 보이는 부분은 Cr-rich상이다. 표 3에서 보면 Ni-rich상의 경우 Ni/Cr 비율은 제조된 spec.과 큰 차이를 보이지 않고 약간

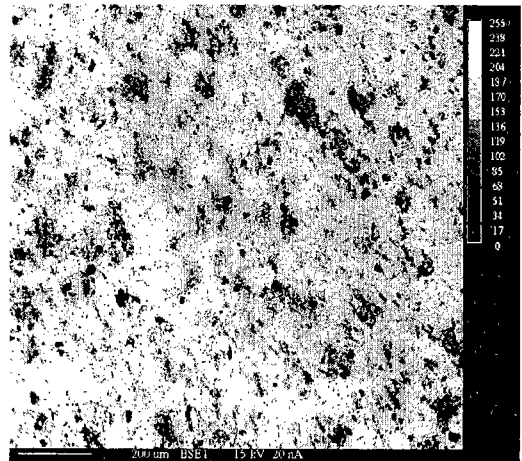


그림 2. 타겟의 BSE image.
Fig. 2. BSE image of target.

증가하였으나, Cr-rich상의 경우는 Ni/Cr비가 0.24로 제조된 조성과 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 또한, Cr-rich상의 Cu, Al 원소의 함량이 제조된 spec.에 비해 적게 함유되어 있는 것을 알 수 있다.

분석된 target을 이용하여 DC 250W, 5mTorr, Ar50sccm 공정조건으로 증착된 박막의 EPMA측정 결과 조성은 표 3과 같이 70.7wt%Ni-17.3wt%Cr-4wt%Al-4wt%Cu로 분석되어 EPMA분석의 오차범

표 3. Target 및 박막의 조성분석표.

Table 3. Alloy content of target and thin film.

		Ni	Cr	Cu	Al	Ni/Cr
Target	manuf.spec	74	18	4	4	4.11
	Ni-rich상	74.8	17.8	3.9	3.1	4.20
	Cr-rich상	18.4	76.5	2.1	3.0	0.24
thin film		70.7	17.3	4	4	4.31

위 내에서 제공된 Target과 증착된 박막의 성분분석이 일치함을 알 수 있었다.

3.2 열처리 공정에 따른 박막의 물성분석

제조된 박막의 열적안정성 및 후처리공정을 고려할 때 열처리 공정은 필수적이기 때문에, 열처리에 따른 특성분석을 위해 그림 3은 74wt%Ni-18wt%Cr-4wt%Al-4wt%Cu의 박막을 열처리를 하지 않은 박막과 300°C와 400°C에서 공기분위기로 1시간 열처리한 박막의 X선 회절 패턴들을 나타낸다. 이 패턴들의 피크(peak) 중에서 표시되지 않은 날카로운 회절 피크들은 사용된 알루미늄 기판으로부터 얻어진 것이다. 이 패턴들에서 볼 수 있는 것처럼 열처리를 하지 않은 74wt%Ni-18wt%Cr-4wt%Al-4wt%Cu 합금 박막의 결정상은 일방정(cubic) 구조를 나타내며, 공기 중 400°C에서 열처리 할 경우에 사방정(rhombohedral) 구조의 NiO상이 생긴 것을 알 수 있었다. 이는 열처리에 의한 제조된 박막의 산화현상인 것으로 판단된다.

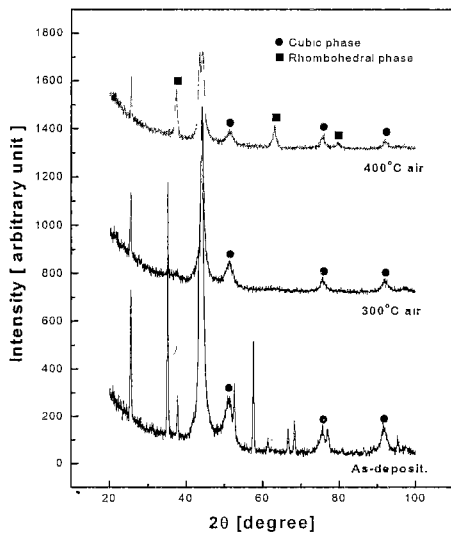


그림 3. 열처리에 의한 박막의 결정성 변화.
Fig. 3. Thin film's XRD with annealing.

그림 4는 열처리 효과를 명확히 하기 위하여 공기 중 400°C에서 1시간 열처리한 74wt%Ni-18wt%Cr-4wt%Al-4wt%Cu합금박막의 단면(cross section)의 TEM 미세구조 사진 및 전자 회절(SAD)패턴이다. 그림 4(a)에서 A부분은 합금 박막내부의 사진으로 미세한 주상(columnar) 결정구조를 나타내고 있는

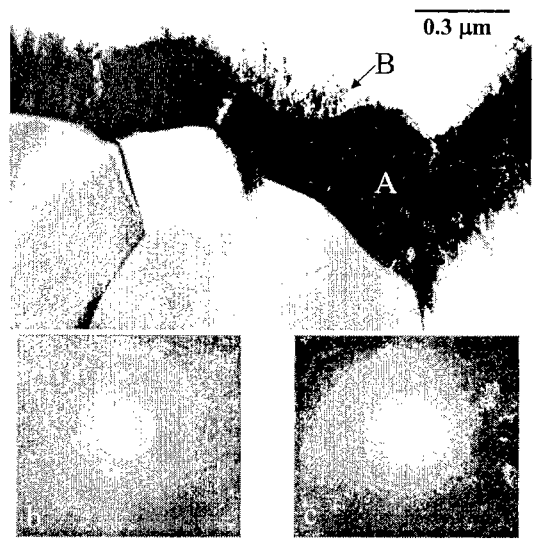


그림 4. 공기중에서 열처리한 박막의 TEM, SAD.
(a)TEM 미세구조사진 (b)A부분의 SAD
(c)B부분의 SAD

Fig. 4. TEM, SAD with annealing in air
(a)TEM, (b)SAD of A part
(c)SAD of B part

것을 볼 수 있으며, 박막 표면의 B부분은 증착된 박막표면에 산화층이 생성된 것을 알 수 있다[9,10]. A부분과 B부분을 EDS로 분석한 결과, A부분에 비하여 B부분에서 Ni성분이 아주 높게 나타났다. 또한 A, B부분의 결정구조를 알기 위해 그림 4(b)과 (c)의 SAD 패턴을 분석한 결과 A부분은 cubic상이고 B부분은 NiO의 rhombohedral상으로 나타났다. 따라서, 400°C에서 열처리한 74wt%Ni-18wt%Cr-4wt%Al-4wt%Cu 박막은 그림 3의 X선 회절분석 결과와 일치하게 cubic상의 합금박막과 표면에 NiO 산화층으로 이루어져 있는 것을 알 수 있어, 열처리에 따라 박막표면에 Ni의 산화현상이 진행된 것을 알 수 있다[12].

3.3 스퍼터 공정변화에 의한 전기적 특성

스퍼터의 증착시간에 따른 두께변화 특성을 그림 5에 나타내었다. 이 때의 박막 제조조건은 250W, 25mTorr, Ar 50sccm으로 제조하였다. 그림에서 보면 전형적인 스퍼터 증착율이 선형적인 특성을 나타내었으며, 약 400Å/min의 증착율을 보였다.

그림 6은 250W, 25mTorr, 50sccm의 공정조건으로 알루미늄 기판과 glass 기판을 이용하여 제작한

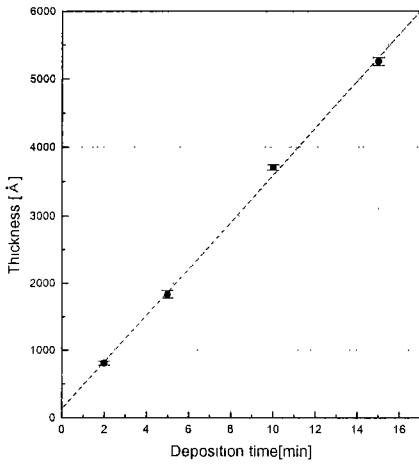


그림 5. 증착시간에 따른 박막두께.
Fig. 5. Thickness with deposition time.

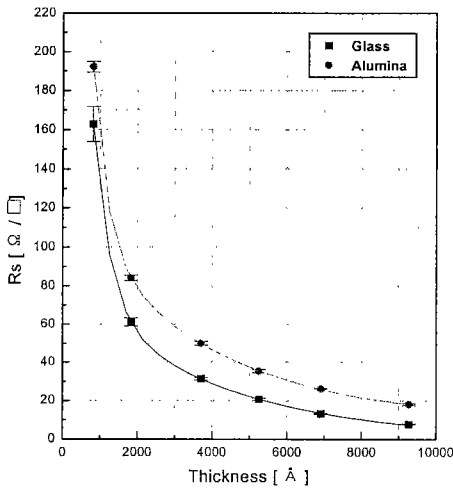


그림 6. 기판종류에 따른 면저항 특성.
Fig. 6. Sheet resistance about substrate.

박막의 두께에 따른 면저항 변화를 나타낸다. 그림에서 보면 박막의 면저항 값은 박막의 두께증가에 따라 매우 민감하게 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 박막두께가 2000 Å까지 급격하게 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 glass기판의 경우보다 알루미나 기

판에 증착한 박막의 경우 면저항 값이 크게 나타났으며, 알루미나 기판이 glass 기판에 비해 표면조도 (roughness)가 크기 때문인 것으로 생각된다.

압력 25mTorr, Ar 50sccm, 10min의 조건으로 power변화에 따른 면저항 및 두께특성은 그림 7에 나타내었다. 그림에서 보면 박막의 두께는 power의 증가에 따라 증착시간에 따른 두께 특성과 같이 직선적인 특성을 볼 수 있으며, 면저항 특성은 그림 7과 같이 지수함수적으로 감소하는 경향을 보이고 있고 power가 250W까지는 급격히 감소하다가 변화폭이 적어지는 현상을 나타내어 제조공정중 power 조건은 DC 250W로 선정하였다.

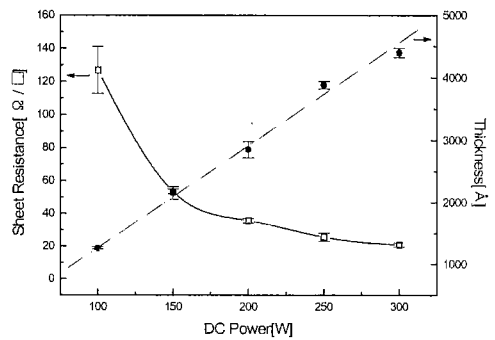


그림 7. Power에 따른 막두께 및 면저항 특성.
Fig. 7. Thickness and Rs with power.

그림 8과 9는 74wt%Ni-18wt%Cr-4wt%Al-4wt%Cu 조성의 target을 사용하여 압력 25mTorr, Ar 50sccm, DC 250W로 약 15분간 스퍼터 한 공정 조건으로 제작된 박막의 면저항 및 TCR 특성과 공기 중과 N₂ 분위기에서 1시간 열처리하였을 때의 변화를 각각 나타낸 것이다. 면저항 측정결과 저항 박막의 면저항 특성은 질소 분위기 중에서 열처리에 의해 350°C까지 비교적 일정한 값을 유지하고 있으나, 공기 중에서 열처리 한 경우에는 300°C이상에서 크게 증가하는 것을 알 수 있었다. 이러한 현상은 공기 중에서 열처리 할 경우 300°C이상의 온도에서 일어날 수 있는 저항 박막의 산화현상과 밀접한 관계가 있을 것으로 생각된다. 그림 9의 TCR 결과를 보면, 열처리 온도 증가에 따라 일반적으로 TCR이 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나, 질소 분위기에서 열처리 한 경우에는 온도 증가에 따라 TCR 값이 선형적으로 증가하지만, 공기 중에서 열처리 한 경우에

는 300°C보다 높은온도에서 TCR 값이 급격히 증가하는 현상을 나타내었다[7,9].

이것은 면저항 특성결과와 같이 공기 중에서 열처리 한 경우 300°C보다 높은 온도에서는 산화현상에 따른 면저항 값의 급격한 증가 현상과 밀접한 관계가 있을 것으로 추정된다.

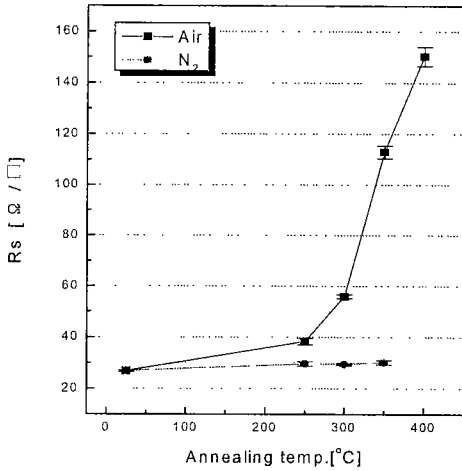


그림 8. 열처리 조건에 따른 면저항 특성.
Fig. 8. Rs with annealing treatment.

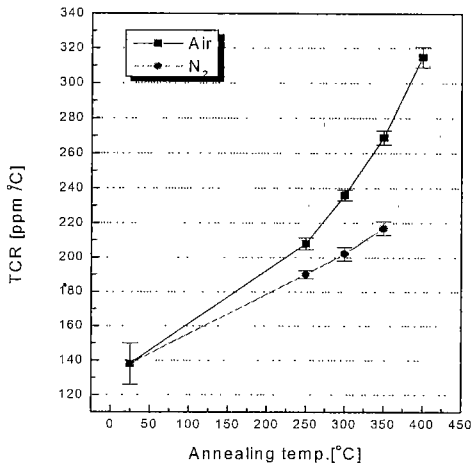


그림 9. 열처리 조건에 따른 TCR 특성.
Fig. 9. TCR with annealing treatment.

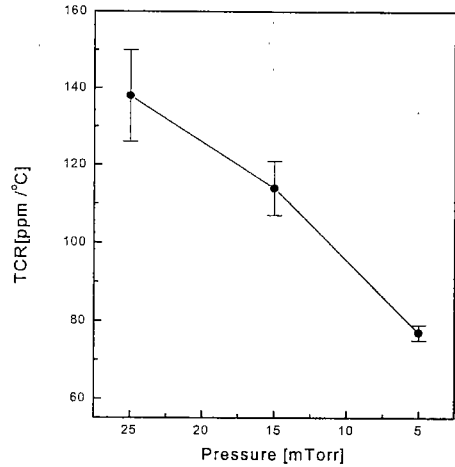
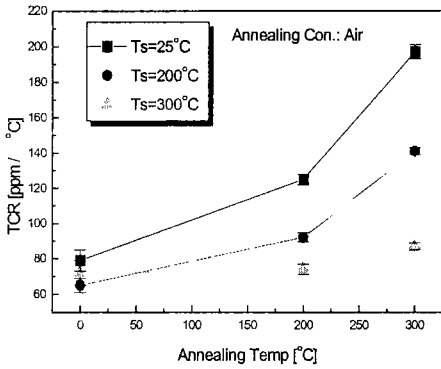


그림 10. 스퍼터 압력에 따른 TCR 특성.
Fig. 10. TCR with sputtering pressure.

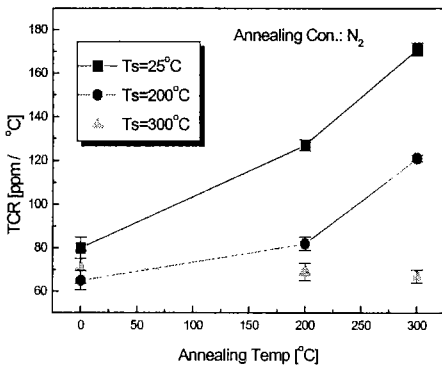
그림 10은 DC 250W, Ar 50sccm 조건에서 스퍼터 압력의 변화에 따른 TCR값의 변화를 본 것이다. 그림에서 보면 진공도가 25mTorr, 15mTorr, 5mTorr일 때, 138, 114, 77ppm/°C로 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 박막증착시 산소함량의 감소때문인 것으로 판단된다. 이와 같은 결과로 TCR값의 최소화를 위한 진공도는 낮을수록 좋은 것을 알 수 있어, 사용한 장비의 최적 진공도는 5mTorr로 설정하였다.

일반적으로 기판온도의 증가에 의한 실험은 박막의 접착상태, 성막구조적인 측면을 위하여 많이 시도되고 있다. 이에 기판온도변화에 따른 TCR 값의 변화 특성을 그림 11에 나타낸 것이다.

그림은 제조공정 DC 250W, 5mTorr, 50sccm에서 기판온도의 변화에 의해 제조된 것을 공기분위기와 질소분위기중에서 1시간동안 annealing 시킨 시료의 특성변화를 나타낸 것이다. 공기중에서 열처리한 결과를 보면, 기판온도가 증가할수록 열처리온도의 증가에 따른 TCR값의 변화폭이 작아짐을 알 수 있다 [2]. 이는 기판온도가 증가함에 따라 TCR값의 감소는 기판온도에 따른 thermal stress와 기판온도의 상승으로 인한 박막형성시 미세구조가 치밀하고 안정된 결과로 판단된다. 기판온도의 변화에 따라 제작된 시편을 열처리한 경우 기판온도가 상온에서 제조된 경우, 열처리에 의한 TCR값은 급격한 증가를 보이고 있고, 기판온도가 증가함에 따라 열처리에 따른 TCR값의 변화폭은 줄어들고 있음을 알 수 있다.



(a) 공기중 열처리에 의한 TCR



b) 질소중 열처리에 의한 TCR

그림 11. 기판온도 및 열처리에 의한 TCR.

Fig. 11. TCR with annealing and substrate temp.

또한 공기중에서 열처리한 경우는 300°C에서 급격한 변화를 보이고 있으며, N₂분위기에서 열처리한 경우는 공기중에서 열처리한 경우에 비하여 변화폭이 적은 것을 알 수 있다. 이는 열처리에 따른 면저항 특성과 같은 결과로 열처리에 따른 산화현상 및 기판온도에 의한 thermal stress 관계인 것으로 판단된다. 이와 같은 결과는 열처리시 산화의 영향을 줄이기 위해 N₂분위기로 열처리하는 것이 좋을 것이라 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 고정밀급 박막저항을 제조하기 위한 초기연구로써 74wt%Ni-18wt%Cr-4wt%Al-4wt%Cu 합금 Target을 이용하여 박막공정변화(power, 압력, 기판온도)에 의한 물성 및 전기적 특성을 본 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) Ni-Cr-Al-Cu 합금 Target과 증착된 박막의 물성분석을 통해 증착된 박막은 선정된 조성과 같은 것을 알 수 있었다.

2) 스퍼터를 이용하여 Ni-Cr-Al-Cu 저항박막을 형성할 때 기판의 조도가 클수록 면저항은 높아지고, 박막형성시 박막내의 산소함량이 적을수록 TCR 값이 낮아진다. 질소분위기에서 열처리 하는 경우 열처리온도에 따라 면저항 및 TCR 값은 선형적으로 증가하나 그 증가량은 적다. 그러나, 공기중에서 열처리를 한 경우 산화현상에 따른 면저항 및 TCR 값이 300°C보다 높은 온도에서 급격히 증가한다. 이는 열처리온도에서 박막표면의 NiO산화층의 형성으로 인한 면저항 및 TCR 값이 증가되는 것으로 판단된다.

3) 저항박막 형성시 기판의 온도가 증가함에 따라 thermal stress와 미세구조가 변화함을 알 수 있으며, 기판온도가 증가할수록 미세구조는 치밀하고 안정화 된다. 기판온도가 증가하면 TCR 값은 작아지고, 기판온도가 증가함에 따라 열처리에 따른 TCR 값의 변화폭은 줄어들고 있음을 알 수 있다. 이는 열처리에 따른 산화현상 및 기판온도에 의한 thermal stress의 관계로 판단된다.

참고 문헌

- [1] N.G.Dhere and D.G.Vaoide, "Composition and temperature coefficient of resistance of Ni-Cr thin films", Thin Solid Films, Vol.59, No.33, 1979.
- [2] A.P.Bhatt C.A.Luck and D.M.Stevenson, "D.C. sputtering of Ni-Cr thin film resistors", Proc. of the 1984 International symp. on microelectronics, pp.370, 1984.
- [3] K.Matsuda, K.Sato, T.Doi, K.Ogata and K.Konishi, "Super precision metal film

- resistors", National Tech. Rep., Vol.26, No.2, pp.283, 1980.
- [4] W.E.Isler and L.A.Kitchman, "Influence of deposition and processing parameters on the TCR of Ni-Cr-Cu-Al alloy film resistors", IEEE Trans. on Parts, Materials & Packaging, PMP-5 (3), pp.139, 1969.
- [5] E.Schippel, Kristall und Technik, "Modification test of vacuum deposition Ni/Cr films with Mn and Si for thin film resistors", Vol.15, No.8, pp.917, 1980.
- [6] M.A.Bayne, "Al-doped Ni-Cr for temperature coefficient of resistance control in hybrid thin-film resistors", J. Vac. Sci. Technol., A4(6), pp.3142, 1986.
- [7] J.H.Mooij and M.dejong, "Structural and electrical properties of sputtered CrNi films", J. Vac. Sci. Technol., Vol.9, No.1, pp.446, 1972.
- [8] A. Belu-Marian et. al., "Electrical properties and structural defects of Ni-Cr thin films", Thin Solid Films, Vol.139, No.15, 1986.
- [9] M.I.Birjega, C.A.Constantin, I.TH.Florescu and C.Sarbu, "Crystallization of amorphous sputtered 55%Cr-45%Ni thin films", Thin Solid Films, 92, 315, 1982.
- [10] D. M. Buczek, "Thin-film NiCr resistor", J. Vac. Sci. Technol., Vol.15, No.2, pp.370, 1978.
- [11] M.Kotai, I.Trifonov and M.Czermann, "Segregation phenomena in thin film NiCr layers", Vacuum, Vol.33(1/2), No.49, 1983.
- [12] W. Pitschke and W.Bruckner, "Phase formation process of sputtered NiCr(37:63) thin films", Fresenius J. Anal. Chem., Vol.361, pp.608, 1998.
- [13] 이덕출, 이봉주, 김형권, "진공증착중합법에 의해 제조된 폴리이미드 박막의 플라즈마 처리에 의한 표면의 변화" 전기전자재료학회논문지, Vol.11, No.5, pp.340-346, 1998.
- [14] 하홍주, 장두진, 조정수, 박정후, "IC용 초정밀 박막저항소자의 제조와 특성연구", 전기전자재료학회지, Vol.8, No.1, pp.13, 1995.