

고정밀급 박막저항을 위한 NiCr/NiCrSi박막의 제조 및 전기적 특성

Electrical Characteristics and Fabrication of NiCr/NiCrSi Alloy Film for High Precision Thin Film Resistors

이봉주^{1,a}
(Lee Boongjoo^{1,a})

Abstract

In order to acquire fundamental informations to fabricate high precision thin film resistors, NiCr/NiCrSi alloy films were prepared using Ni and Cr targets. Effect of composition on the electrical properties of the NiCr/NiCrSi alloy film were then investigated. Considering the effect of Si doping on the electrical and material characteristics, the lower TCR (temperature coefficient of resistance) values could be achieved for samples with Ni/Cr ratio of 0.8~1.5 (in a range of relative higher specific resistivity and Cr composition of 40 wt%~55 wt%) and with Si doping. Consequently, the sample prepared using a DC power showed a good TCR of -25 ppm/°C, which implies that increase of specific resistivity and decrease of TCR would be achieved more efficiently not for Ni-Cr binary material but for Si doped Ni-Cr ternary material, and not using RF power but using DC power in the 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 전자 부품들도 고정밀화, 복합화 그리고 고효율성 및 미세조정기능에 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 저항·온도계수가 낮은 고정밀 저항에 대한 요구가 대두되고 있다.

일반적으로 고정밀급 박막형 저항으로 사용되어

지고 있는 NiCr계 합금 박막은 낮은 저항·온도계수 (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[1-8]. NiCr계 합금 박막에 대한 초기의 연구는 주로 증발 (evaporation) 방법으로 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.

따라서 본 연구에서는 고정밀급 박막저항을 제조하기 위하여 NiCr계 합금박막을 제조하기 위해 co-evaporation 증착을 이용하여 NiCr박막을 합성하였으며, Cr의 함량에 따른 박막의 전기적 특성을 파악하였다. 본 논문은 NiCr을 바탕으로 한 4원계 혹은 5원계 첨가 도핑에 따른 고정밀급 박막저항을 제조하기 위한 초기연구로 진행되었다.

1. 인하대학교 전기공학과 기능성박막연구실
(인천시 남구 용현동 253)

a. Corresponding Author : aprilb@empal.com

접수일자 : 2007. 1. 30

1차 심사 : 2007. 5. 15

심사완료 : 2007. 5. 21

2. 실험 방법

박막형성을 위해 사용된 DC/RF 마그네트론 스퍼터장치(A-tech)를 이용하였다. 실험에 사용된 Target의 경우 Ni, Cr 각각 100 % 순수 타겟을 이용하여 co-evaporation을 하였다. 이때 각각의 Ni/Cr의 비율을 조절하여 최적의 비율을 선정하였으며, 이를 토대로 Si을 도핑시킨 3원계 51 wt%Ni-41 wt%Cr -8 wt%Si 합금을 이용하였다. 기판의 경우는 일반적으로 박막용 알루미늄 (Al_2O_3) 기판을 사용하였으며, 박막의 두께, 면저항, 결정상 및 재료성분 특성 등을 분석하기 위해 glass기판을 사용하였다. 알루미늄 기판은 3 "×3 "크기로 레이저 스크라이빙 (laser scribing)을 하여 사용하였다. 스퍼터에 의해 증착된 박막의 면저항 및 두께를 측정하기 위해 면저항측정기 (4-point probe, changmin tech.), 두께측정기(Dektak³, a-step)를 사용하여 측정하였다. 증착된 저항막을 패터닝 (patterning)을 하기 위해 positive PR (AZ1512)을 사용하여 500 rpm/10 sec, 5000 rpm/30 sec로 spin coater(WS-400, Laurell)로 도포한후 soft baking (100 °C, 60 sec; hot plate)을 하였으며, mask aligner(MA-6, Karl-suss)을 이용하여 40 sec 동안 노광한후 hard baking (110 °C, 80 sec; hot plate)을 하였고, 전용 developer로 현상하였다. etching의 경우는 상용화되고 있는 Cr-7K을 이용하여 박막의 두께에 따라 에칭시간의 차이를 두었다. 패터닝 후의 관찰을 위해서는 광학현미경 (Optical Stereoscope, Leica Wild M3Z)을 사용하여 분석하였다. 저항막 설계는 3가지의 저항부분으로 설계되었다. 설계시 고려되었던 사항은 다음과 같다. 일반적인 저항은 아래 식(1)과 같이 계산할 수 있다.

$$R = \rho \cdot \frac{L}{tW} \quad (1)$$

여기서 ρ 는 비저항 ($\Omega \cdot cm$), L 은 저항의 길이 (cm), t 는 저항막의 두께 (cm), W 는 저항막의 폭 (cm)이다. 일반적으로 비저항은 면저항 ($R_s, \Omega/\square$)과 막두께의 곱과 같으므로 위의 식(1)은 아래의 식(2)과 같이 쓸 수 있다.

$$R = \frac{R_s L}{W} \quad (2)$$

저항값은 막증착후 저항막의 면저항과 두께는 각각 $27 \Omega/\square$ 와 2000 Å인 경우, 총면저항이 0.5, 1, 1.5 k Ω 이 되도록 3종류로 설계를 하였으며, 개별

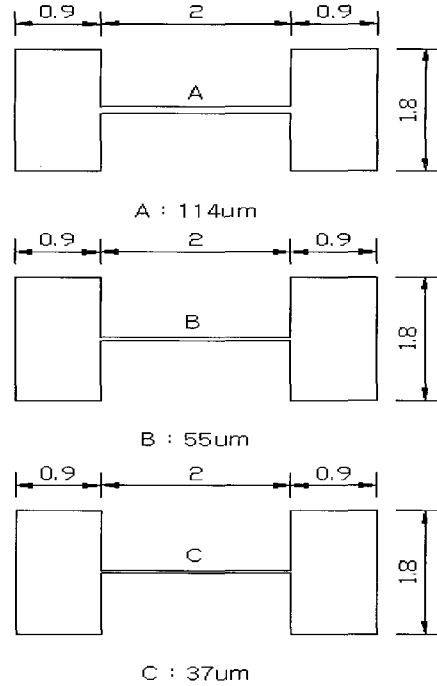


그림 1. 박막저항의 단위Cell 설계도.

Fig. 1. Cell design of thin film resistors.

시험의 크기는 저저항은도계수 측정이 쉽도록 2 mm×4 mm로 정하였고, 저항막은 일자형으로 선평 114 μm , 55 μm , 37 μm 설계하였다. 그림 1은 각각의 단위 cell의 설계도이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 2원계(Ni, Cr) 스퍼터링 증착박막

이종의 물질에 대한 동시증착 (co-evaporation) 방법에 대한 연구는 지속적으로 진행되고 있으나, 일반적으로 증착 공정제어 및 재현성적인 측면을 고려할 때 스퍼터링 방식이 많이 이용되고 있다[7, 8]. 본 연구에서는 각각의 순수한 Ni과 Cr의 타겟을 이용하여 multi sputtering M/C을 사용하여 동시에 스퍼터링을 시도하였다. 이때 사용한 두타겟의 전원은 RF(radio frequency)을 사용하였다. 이는 Ni은 자성체임으로 인해 DC을 이용한 스퍼터링시 많은 어려움이 있어, 일반적으로 RF전원을 이용하고 있으며, Cr의 전원은 Ni과의 동시 스퍼터링시 안정한 전원공급을 고려하여 각각의 전원을 RF전원으로 선택하였다.

본 연구에서는 두 타겟을 이용한 Ni, Cr의 함량의 변화에 대한 제어의 가능성을 보려 했으며, 더불어 적절한 Ni/Cr의 함량비에 대하여 알아보았다. 그림 2와 표 1은 15 mtorr, 50 sccm의 공정에서 Ni과 Cr에 각각의 RF전원을 인가할 때 제조된 박막의 EDS성분 분석의 결과를 나타낸 것이다. 그림과 표에서 볼 수 있듯이, Ni/Cr 인가전원의 비율은 증착된 박막의 Ni/Cr 성분함량의 변화와 비례함을 알 수 있었다. 이러한 결과로부터, 동시 스퍼터링에 대한 공정제어의 가능성을 볼 수 있었다. 그림 3은 Ni/Cr의 함량에 따른 면저항값에 대한 특성이다. 그림에서 볼 수 있듯이 Ni/Cr의 비가 0.8 이하(Cr : 56 wt%이상)에서는 면저항의 특정한 형태의 변화가 보이지 않지만, Ni/Cr비가 0.8 이상(Cr : 56 wt%이하)에서는 함량의 비가 증가할수록, 즉 Cr함량이 작아질수록 면저항 값이 증가하는 것을 알 수 있다. 다시말하면, Cr의 함량이 56 wt%까지는 급격히 면저항값이 감소하지만, 56 wt%이상의 함량부터는 특정한 관계가 보이지 않는다.

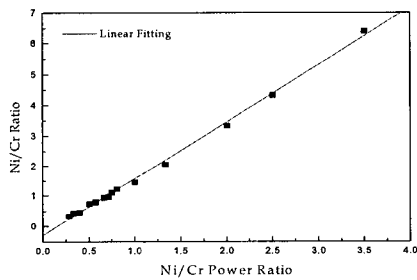


그림 2. Power변화에 따른 성분함량 변화.
Fig. 2. Variable composition ratio with RF.

표 1. Power변화에 따른 성분함량 변화.

Table 1. Variable composition ratio with RF.

Power (단위 W)			Composition (단위 wt%)		
Ni	Cr	Ratio	Ni	Cr	Ratio
100	100	1.00	56.49	43.51	1.47
100	140	0.71	46.25	53.75	0.97
100	250	0.40	29.41	70.59	0.47
100	300	0.33	28.01	71.99	0.44
100	350	0.29	23.34	76.66	0.34
150	200	0.75	49.45	50.55	1.10
150	300	0.50	39.82	60.18	0.75
200	150	1.33	64.62	35.38	2.06
200	250	0.80	51.97	48.03	1.22
200	300	0.67	45.37	54.63	0.94
200	350	0.57	41.45	58.55	0.80
250	100	2.50	79.3	20.7	4.32
300	150	2.00	74.67	25.33	3.33
350	100	3.50	85.03	14.97	6.41

그림 4는 Ni/Cr함량에 따른 비저항 값을 구한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이, Ni/Cr비가 0.8~1.5 정도에서 큰 비저항 값을 얻을 수 있으며, Ni/Cr비가 0.6정도에서 가장 작은 비저항 값이 나타났다. 이러한 결과로부터 저항소자로의 응용을 고려할 때 비저항값이 큰 영역인 0.8~1.5(Cr 함량40 wt%~55 wt%)이 좋을 것이라 생각된다.

그림 5는 Ni, Cr의 타겟을 이용한 동시 스퍼터링 조건중 대표적으로 Ni:Cr=100 W인 경우의 X-선 회절 분석법(XRD : X-Ray Diffractometry)의 결과이다. 결정구조는 조성함량에 관계없이 2θ=44°의 (111)우선방위인 입방정 (cubic)구조임을 알 수 있다. 그림 6는 Ni=100 W의 일정 power을 인가하고 Cr의 power변화에 따른 저항온도계수의 특성은 (a)에 나타내었고, Ni/Cr의 비에 따른 저항온도계수의 특성은 (b)에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 Cr의 Power가 100 W까지는 저항온도계수값이 급격히 감소됨을 알 수 있으며, 그 보다 큰 값에서의 음의 값을 가지며, 변화폭은 크지 않은 것

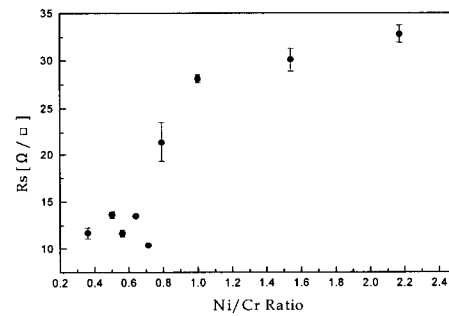


그림 3. Ni/Cr 성분함량 변화에 따른 면저항.
Fig. 3. Sheet resistance with Ni/Cr ratio.

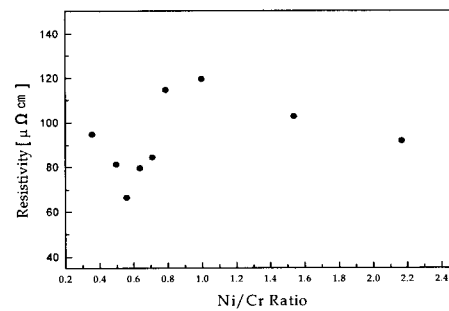


그림 4. Ni/Cr 성분함량 변화에 따른 비저항.
Fig. 4. Resistivity with Ni/Cr compositions.

을 볼 수 있다. 즉 그림 2과 표 2의 EDS분석 결과를 통해 생각하면, 100 W까지의 power는 Cr의 함량이 약 40 wt% (Ni/Cr 함량비=1.5)가 되는 지점임을 알 수 있으며, 100 W보다 큰 power는 Cr의 함량이 40 wt%보다 큰 함량임을 알 수 있다. 이와 같은 결과로부터 Ni/Cr의 2원계 합금을 이용한 박막의 경우, Cr의 함량이 증가함에 따라 저항온도계수값은 감소함을 알 수 있고, Cr의 함량이 40 wt%이상의 값에서는 음의 저항온도계수값을 얻을 수 있으며, 그 보다 더 많은 Cr의 함량에서의 저항온도계수값의 변화율은 크지 않았다.

이러한 결과와 그림 4의 Ni/Cr 함량에 따른 비저항 특성을 볼 때, 박막저항으로써의 필요충분 조건인 비저항이 높고 저항온도계수 값이 작은 특성은 Cr의 함량이 약 40-54 wt% 정도가 좋을 것으로 생각된다.

3.2 3원계(Ni, Cr, Si) 스퍼터링 증착박막

2원계 타겟에 의해 제조된 박막의 특성을 토대로, 비저항의 증가 및 낮은 온도저항계수 특성을 위하여 일반적으로 소량의 불순물을 첨가하고 있다. 그중 가장 많이 사용되는 불순물로는 Si, Mo, Al등을 이용하는데, 이는 소량의 불순물에 의한 metastable phase형성이 용이한 결과로 알려지고 있다[1-6]. 그중 낮은 온도저항계수 측면을 고려하여 본 연구에서는 Negative한 저항온도계수 특성을 가진 Si에 대한 첨가를 고려하여, Ni-Cr-Si에 대한 특성을 보았다. 이때의 3원계 조성함량은 2원계 특성결과로부터 비저항 값이 큰 영역인 Ni/Cr 비가 0.8에서 1.5정도가 되는것중 Ni-Cr-Si = 51-41-8 wt%의 특정 조성으로 선택하였다. Ni/Cr의 조성에 Si의 불순물 효과를 보기 위하여, 미국의

Cerac社에서 입수되는 타겟인 점을 고려하여 1종류만을 선택하였다.

그림 7와 8은 3원계 타겟의 공정조건을 위해 Power변화와 증착시간에 따른 두께와 면저항을 본 결과이다. power에 따른 특성을 보고자 진공도는 8 mtorr로 선정하였는데, 이는 사용된 multi sputtering M/C에서 플라즈마가 안정하게 뜰 수 있는 가장 낮은 진공도를 본 결과 DC power의 경우 8 mtorr이었고, RF Power의 경우 5 mtorr이기 때문에 진공도는 8 mtorr로 선정하였다. 그림 6에서 볼 수 있듯이 같은 진공도내에서의 두께변화를 본 결과 RF power에 비하여 DC power을 이용한 경우, 더 두껍게 증착되고 있음을 알 수 있었고, RF나 DC 모두 전형적인 스퍼터링의 선형성을 볼 수 있었다. 또한 그림 7에서의 면저항 특성을 보면 증착시간에 따른 면저항은 두께의 증가로 인한 감소현상을 볼 수 있으며, 같은 power의 크기에서 RF power에 비하여 DC power의 경우가 면저항이 큰 것을 알 수 있다. 즉 두 그림으로부터 알 수 있

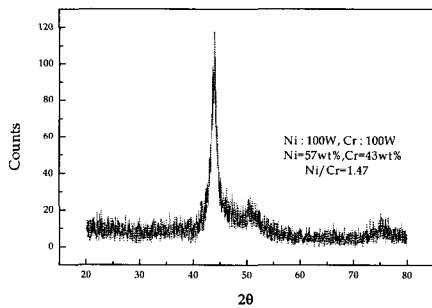
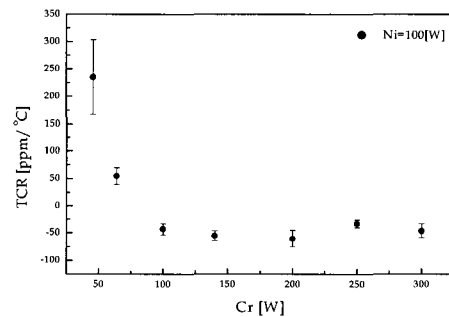
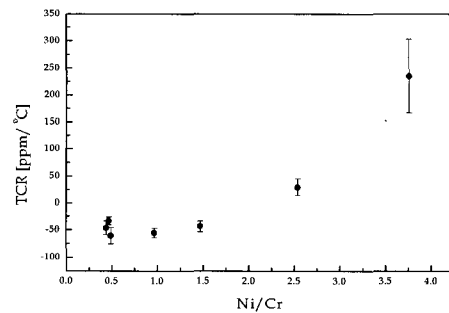


그림 5. Ni/Cr 성분함량 변화에 따른 XRD.
Fig. 5. XRD with Ni/Cr compositions.



(a) Cr축 인가 power에 따른 TCR(Ni=100 W)



(b) Ni/Cr 비에 따른 저항온도계수

그림 6. Ni/Cr 성분함량 변화에 따른 TCR.
Fig. 6. TCR with Ni/Cr compositions.

는 결론은 DC power는 RF power에 비하여 증착율이 커서 두꺼운 막의 증착을 이룰 수 있지만, 치밀한 막의 성장이 어려워 면저항 증가된 것으로 생각된다. 이때의 비저항 값을 계산한 결과 두께가 약 1000 Å 정도를 기준하면, RF power의 경우 비저항은 172 $\mu\Omega\text{cm}$ 이며, DC power의 경우 비저항 209 $\mu\Omega\text{cm}$ 의 값을 얻을 수 있었다. 이는 NiCr의 2원계 합금타겟을 이용한 박막의 결과와 비교할 때, Ni/Cr의 비가 1.2정도의 값에서는 2원계 (Ni/Cr)의 경우 100~120 $\mu\Omega\text{cm}$ 정도값에 비하여 큰 값으로 Si의 첨가에 따른 불순물의 효과로 비저항값이 증가된 것으로 생각된다.

그림 9은 8 mtorr, 30 sccm의 공정조건에서 power의 변화에 따른 결정분석을 위한 XRD분석 결과이다. 그림에서 볼수 있듯이 RF power로 제작된 박막이 DC power로 제작된 박막에 비하여 피이크의 강도 (intensity)가 약간 작으며, 약간 광폭화 현상을 볼 수 있으나, 그 정도는 아주 작다. 그러나, 이와 같은 강도의 감소 및 광폭화 현상은 grain

의 미세한 구조로 설명된다. 즉 상기의 power에 따른 면저항 및 두께의 특성과 동일 하게 RF power를 이용하는 경우가 DC power를 이용하는 경우에 비하여 얇고 치밀한 박막이 제조됨을 알 수 있다.

그림 10은 power의 변화 및 기판의 온도 증가에 따른 제작된 박막의 저항온도계수의 특성이다. 이때의 제조공정에서는 최적의 저항온도 계수값을 위해 RF power (a)을 이용한 경우 RF 250 W, 5 mtorr, 30 sccm 조건이었고, DC power (b)을 이용한 경우 DC250 W, 8 mtorr, 30 sccm이었다. 그림에서 보면 Power의 종류에 관계없이 저항온도 계수의 특성은 기판의 온도가 증가함에 따라 100 $^{\circ}\text{C}$ 온도에서는 급격한 저항온도계수 값이 감소하였으나, 점차 그 값이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 초기의 기판온도 증가에 따른 박막의 제조시 치밀한 구조의 형성으로 인한 저항온도계수가 감소되었으나, 온도의 증가로 인한 산화가 진행되어 다시 저항온도 계수값은 증가하는 것으로 생각된다. Power

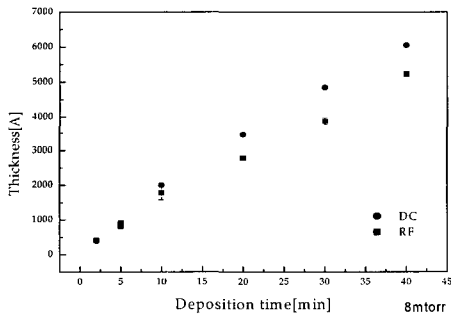


그림 7. 증착시간과 Power에 따른 두께 특성.
Fig. 7. Thick. with power and deposition time.

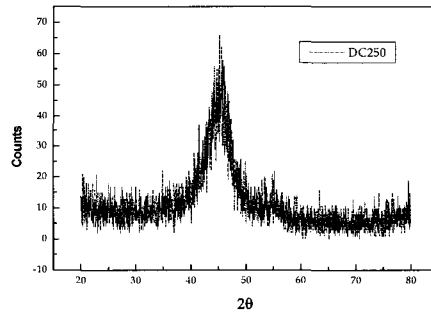


그림 9. DC/RF Power변화에 따른 XRD.
Fig. 9. XRD with DC/RF power.

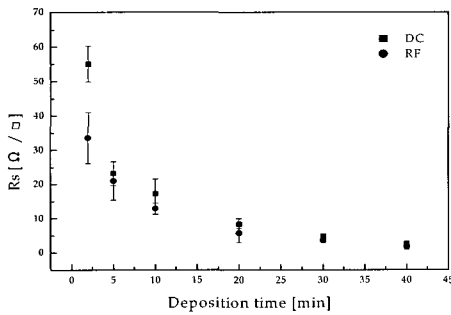
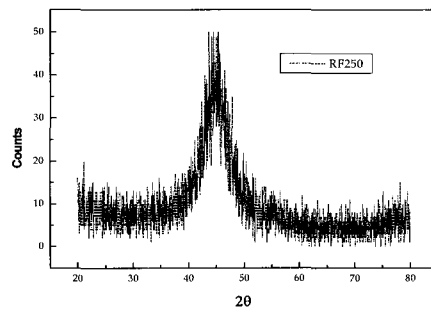


그림 8. 증착시간과 Power에 따른 면저항 특성.
Fig. 8. Rs with power and deposition time.



의 변화를 생각할 때 초기의 저항온도 계수값에서 RF power을 이용한 경우가 저항온도 계수값이 작음을 알 수 있는데, 이는 상기의 결과들과 동일하게 RF Power로 인한 박막의 치밀성의 결과로 인해 얻어진 결과라 말할 수 있다.

일반적으로 AFM(atomic force microscope)은 물질의 표면 연구에 있어 표면의 입체적인 정보뿐만 아니라, angstrom 단위까지의 표면의 원자배치를 아주 간단하게 파악할 수 있고 표면의 처리없이 자연상태 그대로 관찰이 가능하다. 그림 11은 AFM을 RF 250 W, 5 mtorr, 30 sccm 증착조건에서 기판온도증가에 따른 증착된 막의 표면조도(roughness)를 본 결과이다. 100 $\mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ 의 크기를 기준으로 하여 측정한 결과 RMS root-mean-square)값은 기판온도가 25 $^{\circ}\text{C}$, 100 $^{\circ}\text{C}$, 200 $^{\circ}\text{C}$, 300 $^{\circ}\text{C}$ 로 증가함에 따라, 각각 4.56, 3.25, 2.54, 2.44 nm로 감소됨을 알 수 있었다. 이러한 결과는 기판온도의 증가로 인해 박막의 미세구조는 치밀해 지고 grain의 증가로 인하여 박막표면이 안정화

되는 현상으로 생각할 수 있다. 저항온도계수가 낮은 값을 가진 박막저항을 제조하기 위해서는 제조공정중 열처리공정이 필수적이다. 이는, 온도에 따른 저항값의 변화폭이 작은 특성을 가진 소자의 제조공정시 열충격을 거친 경우, 온도에 대한 신뢰성 있는 특성이 보존되어 일반적인 박막저항 제조시 필수적으로 이용되고 있다.

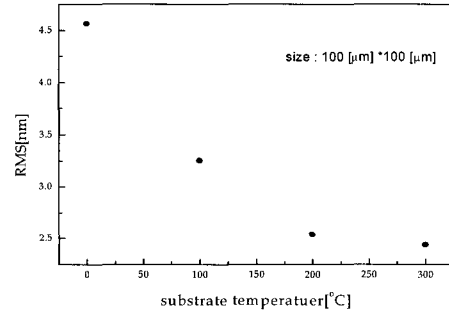
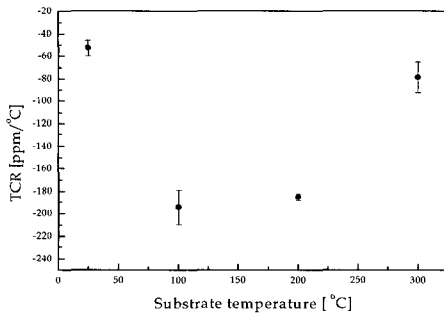
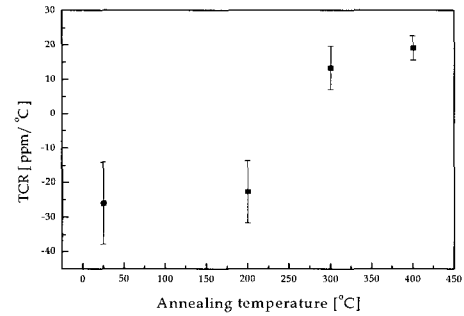


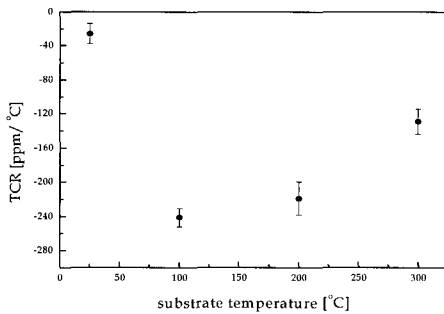
그림 11. 기판온도에 따른 저항온도계수.
Fig. 11. TCR with substrate temperatures.



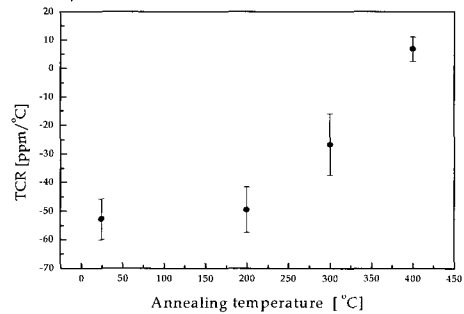
(a) RF 250 W, 5 mtorr



(a) DC250 W, 8 mtorr



(b) DC 250 W, 8 mtorr



(b) RF250, 5 mtorr

그림 10. DC/RF Power 및 기판온도에 따른 TCR.
Fig. 10. TCR with DC/RF and substrate temp.

그림 12. Power 및 열처리온도에 따른 TCR.
Fig. 12. TCR with power and annealing temp.

그림 12은 공기중에서 1시간동안 열처리 한 경우, 열처리 온도에 따른 저항온도계수특성 본 것이다. (a)의 경우 DC 250 W, 8 mtorr, 30 sccm로 증착한 박막이고, (t)의 경우 RF 250 W, 5 mtorr, 30 sccm로 증착된 박막의 결과이다. 그림에서 보면, 각각의 특성은 power의 변화에 상관없이 열처리 온도가 증가함에 따라 박막의 저항온도 계수값은 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 제조된 박막이 열처리 과정을 통하여 열에 의한 산화현상으로 저항온도 계수값이 증가된 것으로 생각된다.

이상의 결과를 종합할 때, 비저항 값의 증가 및 저항온도 계수값이 감소될 위해서는 조성의 선택시 불순물 효과를 얻을 수 있는 Ni과 Cr의 2원계 보다는 3원계 조성이 좋고, 스퍼터링 공정 조건에서는 power의 경우 RF를 이용하는 것보다는 DC power을 이용하는 것이 더 좋은 특성을 얻을 것이라 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 고정밀급 박막저항을 제조하기 위한 초기연구로써 Ni과 Cr 타겟을 이용하여 각각의 합성비율에 따른 특성을 보았으며, 이를 근거로 Si 도핑에 따른 전기적 특성 및 물성을 본 결과 다음과 같다.

1) 2원계 NiCr박막

- co-evaporation을 이용하여 Ni과 Cr의 원하는 비율의 합성박막 제조는 가능하다.
- 면저항의 경우 Cr의 함량이 56 wt%까지는 급격히 면저항값이 감소하지만, 56 wt%이상의 함량부터는 특정한 관계가 보이지 않는다. 또한 Ni/Cr비가 0.8~1.5 정도에서 큰 비저항 값을 얻을 수 있으며, Ni/Cr비가 0.6정도에서 가장 작은 비저항 값이 나타났다. 이러한 결과로부터 저항소자로의 응용을 고려할 때 비저항값이 큰 영역인 0.8~1.5 (Cr 함량 : 40 wt%~55 wt%)이 좋을 것이라 생각된다.

2) 3원계 NiCr 박막

- 3원계 (51 wt%Ni-41 wt%Cr-8 wt%Si) 합금 박막의 경우, RF와 DC power을 이용하여 제조한 경우, 각각 비저항은 172 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ 와 209 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ 를 얻었고, 이때 저항온도계수값은 -52 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ 와 -25 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ 를 얻어 제조시 DC Power를 이용하는 것이 좋은 결과를 얻었다.

- 비저항 값의 증가 및 저항온도 계수값이 감소될 위해서는 조성의 선택시 불순물 효과를 얻을 수 있는 Ni과 Cr의 2원계 보다는 Si이 도핑된 3원계 조성이 좋고, 스퍼터링 공정 조건에서는 power의 경우 RF를 이용하는 것보다는 DC power을 이용하는 것이 더 좋은 특성을 얻을 것이라 생각된다.

본 연구에서는 고정밀급 박막저항을 제조하기 위하여 NiCr계 합금박막을 제조하기 위해 co-evaporation증착을 이용하여 NiCr박막을 합성하였으며, Cr의 함량에 따른 박막의 전기적 특성을 파악하였다. 본 논문은 NiCr을 바탕으로 한 4원계 혹은 5원계 첨가 도핑에 따른 고정밀급 박막저항을 제조키 위한 초기연구로 진행되었다.

참고 문헌

- [1] K. Matsuda, "Super precision metal film resistors", National Tech. Rep., Vol. 26, No. 2, p. 283, 1980.
- [2] E. Schippel, "Modification test of vacuum deposition Ni/Cr films with Mn and Si for thin film resistors", Kristall und Technik, Vol. 15, No. 8, p. 917, 1980.
- [3] M. A. Bayne, "Al-doped Ni-Cr for temperature coefficient of resistance control in hybrid thin-film resistors", J. Vac. Sci. Technol., Vol. A4, No. 6, p. 3142, 1986.
- [4] D. M. Buczek, "Thin-film NiCr resistor", J. Vac. Sci. Technol., Vol. 15, No. 2, p. 370, 1978.
- [5] M. V. Swain, "R-curve behavior in a polycrystalline alumina material", J. Mat. Sci. Lett., Vol. 5, p. 1313, 1986.
- [6] J. H. Mooij and M. de jong, "Structural and properties of sputtered CrNi films", The journal of vacuum science and technology, Vol. 9, p. 446, 1972.
- [7] J. A. Thornton, "The microstructure of sputter-deposited coatings", J. Vac. Sci. Technol., Vol. A4, No. 6, p. 3095, 1986.
- [8] 이봉주, "낮은 저항온도계수를 갖는 박막 저항체 제작 및 신뢰성 특성평가", 전기전자재료학회논문지, 20권, 4호, p. 352, 2007.