

Ni-Cr계 합금을 이용한 정밀 박막저항체의 제조 및 특성

Manufacture of Precision Thin Film Resistors using Ni-Cr Alloy and Their Properties

이영화¹, 박세일^{2,a}, 김국진², 임영언¹
(Young Hwa Lee¹, Se Il Park^{2,a}, Kook Jin Kim², and Young Eon Ihm¹)

Abstract

Precision thin film resistors using evanohm R alloy were fabricated by dc magnetron sputtering method. The physical and electrical properties of the resistors were studied after treatment of thermal annealing. The crystallization of the film was increased as the annealing temperature increase. Diffusion and oxidation of Cr and Al elements were occurred into the film surface. The minimum TCR values of 10.46 ppm/°C and 10.65 ppm/°C were measured at the annealing temperatures of 200 °C and 300 °C, respectively. We are conducting additional studies to improve characteristics of our resistors for practical device application.

Key Words : Evanohm R, Thin film resistor, Temperature coefficient of resistance (TCR), Thermal annealing

1. 서 론

현재 손쉽게 접할 수 있는 많은 종류의 저항체(resistor)는 단일소자로서 뿐만 아니라 전자회로 등에서 다른 소자들과 함께 기본 구성 요소가 된다. 또한, 정보 및 통신 분야의 빠른 발전과 디지털 산업의 확대는 낮은 잡음특성, 안정된 고주파특성, 저전력 소모 등 저항 소자의 기능 향상과 소형화를 요구하게 되었고, 기존의 권선(wire-wound)형 및 막(foil)형 저항체들은 이에 만족하지 못하게 되었다. 따라서 적은 저항온도계수(Temperature Coefficient of Resistance; TCR)와 높은 정밀도 및 환경에 대한 높은 안정성을 보이며 성능비대 가격비가 우수한 박막(thin film) 저항체에 대한 요구는 필연적으로 확대되었다[1-3].

박막 저항체는 유전기판 위에 금속 저항 물질을 설계된 형상으로 형성시킨다. 이러한 박막저항체는 표준저항이 내장된 정밀 계측기기, 미세패턴 성형 기술을 이용한 모노리딕(monolithic) 집적회로, 박막형 소자와 분리 소자들로 조합된 혼성 회로, 이동통신 등의 분야와 함께 화학센서, 스트레인 게이지 등의 전기역학적 센서, 미세센서에서의 가열부 등의 다양한 센서 분야에 활용되고 있다[4,5].

본 논문에서는 Ni-Cr 2원계 합금에 Al 및 Cu 원소를 소량 첨가함으로써 저항온도계수 및 비저항 등의 전기적 특성을 향상시키기 위한 evanohm R (Ni₇₅-Cr₂₀-Al_{2.5}-Cu_{2.5}) 합금을 박막저항체 물질로 선정하였다[6-8]. 선행된 연구에서는 약 10 ppm/°C의 벌크(bulk) 저항온도계수의 재현 및 기타 물성 연구가 부족하였다[9]. 따라서, 본 연구에서는 열처리 효과에 의한 박막의 결정구조와 상변화를 조사하고 이에 따른 저항온도계수의 변화 및 비저항 변화 등 전기적 특성과의 관계를 고찰, 최소의 저항온도계수 실현을 지향하였다. 위의 결과를 토대로 고주파용 고정밀 저항체, 각종 열형 센서의 미세 저항 및 가열부로서 evanohm R 합금의 안정적 사용을 검증할 수 있었다[10,11].

1. 충남대학교 재료공학과
2. 한국표준과학연구원 전자소재그룹
(대전시 유성구 도룡동 1)
a. Corresponding Author : seilpark@kriss.re.kr
접수일자 : 2005. 9. 12
1차 심사 : 2005. 10. 6
심사완료 : 2005. 11. 5

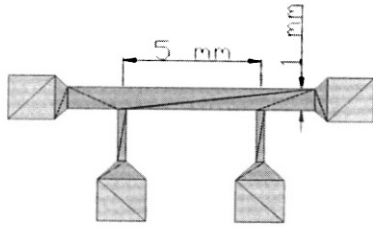


그림 1. 4-터미널 측정용 박막저항체 형상.

Fig. 1. Design of thin film resistor for 4-terminal measurement.

2. 실험 방법

2.1 박막저항 시편의 제작

Evanohm R 합금 박막 형성은 dc 마그네트론 스퍼터링 장치를 이용하였다. 우선 직경 6인치의 열산화(thermal oxidation) 실리콘(100) 웨이퍼 기판을 사용하여 그림 1과 같은 형상의 4-터미널 측정용 저항체 시편을 제작하였다. 일반적인 박막 공정에 준하여 각각의 공정결과를 분석 후 최종 적용하였고, 그림 2는 그 전체 공정의 순서를 나타낸다.

먼저 아세톤과 isopropyl alcohol (IPA)를 이용해 초기 세척된 기판에 photo lithography 패턴을 형성하고, dc 마그네트론 스퍼터링 법을 이용하여 7인치 타겟을 사용하여 두께 약 2000 Å 박막을 증착하였다. 이때 스퍼터링시 발생하는 열로 인해 감광액이 손상(burning)되는 것을 방지하기 위하여 기판은 공정중 약 5 °C로 지속 냉각시켰다. 스퍼터링 시의 초기 진공도는 10^{-7} Torr 이하로 하였으며 공정시의 진공도는 2 mTorr, 캐리어 가스로는 Ar 가스를 사용하였다. 합금이 증착된 기판은 전용의 제거액(remover)을 이용한 lift-off 방식으로 저항 박막 패턴을 형성시켰다.

다음은 와이어 본딩 전극 형성을 위하여 다시 photo lithography 패턴을 형성하고, 기저층으로는 Ti(300 Å)를, 그 위에 Au(2000 Å)를 차례로 전자선(e-beam) 진공 증착하였다. 패턴 형성은 역시 lift-off 방식을 택하였다.

제작이 완료된 박막 저항은 전용의 열처리로를 이용하여 질소 분위기 약 400 Torr 하에서 각각 200 °C, 300 °C, 400 °C 및 500 °C로 1시간씩 열처리 하였다.

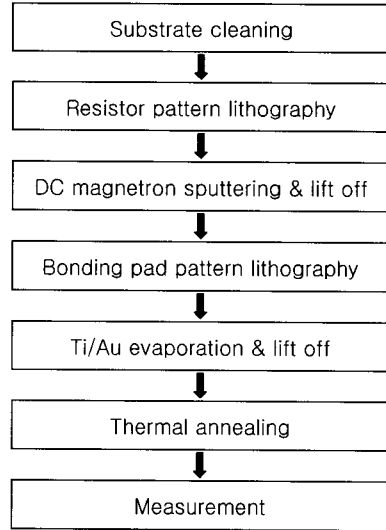


그림 2. 박막저항체의 제조 공정.

Fig. 2. Process for the fabrication of thin film resistors.

2.2 특성평가

물질의 기본적인 성질은 구성하고 있는 원자의 종류와 양, 원자의 배열 상태에 의존하므로 물질의 성질을 이해하기 위해서는 구성 물질들의 결정구조에 대한 정보가 필요하다. 우선 열처리에 따른 박막의 조성 분석을 위하여 x-선 회절법을 이용하였다. 측정은 Cu 타겟을 사용하여 $2\theta = 30^\circ - 90^\circ$ 범위에서 $\theta/2\theta$ 스캔하였고, 이때의 전압 및 전류량은 약 40 kV 및 100 mA 였다. 추가적으로 결정구조 변화와 결정립계면 등의 자세한 정보를 박막 단면의 transmission electron microscopy (TEM) 명시야상($\times 500$ k) 및 회절패턴을 통해 조사하였다. 또한 표면의 조직변화와 형상을 관찰하기 위하여 atomic force microscopy (AFM)을 이용하였으며, 측정시 열처리 온도별로 각각 $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ 면적을 태핑모드, 10 $\mu\text{m/s}$ 스캔 속도로 시행하였다. 박막 깊이 에 따른 물질의 성분비 변화는 Auger electron spectroscopy (AES)를 통해 살펴보았으며, 측정 박막을 Ar 이온으로 60초간 스퍼터링 후 표면 스캔을 반복하는 방식으로 기판(SiO_2)의 에너지 피크가 나올 때까지 계속하였다.

시편의 전기적 특성은 면저항 및 저항온도계수를 통해 조사하였다. 먼저, 면저항은 4-탐침법으로 2000 Å 두께의 박막을 열처리 온도별로 측정 비교하였다. 또한 고정밀 저항의 중요 변수인 저항온

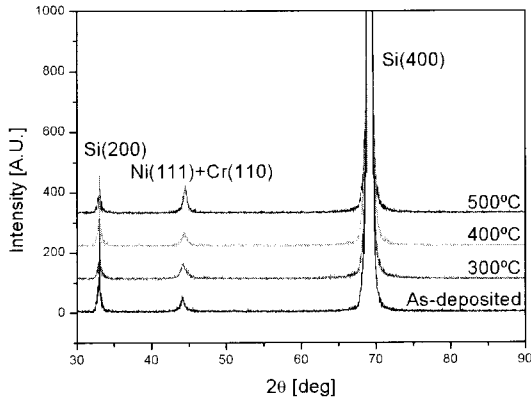


그림 3. 열처리에 따른 박막의 x-선 회절 패턴.
 Fig. 3. XRD patterns of thin films for various annealing temperatures.

도계수는 온도의 증감에 따른 물질의 저항값 변화를 수치화 한 것으로, 식 (1)과 같이 나타낸다. 본 연구에서는 가열판 위에 시편을 고정하여 25 °C - 125 °C 범위로 15분당 5 °C씩 온도를 증감시켰고, 각각의 설정온도에서 10분을 유지하며 4-터미널 방식으로 박막저항을 측정하였다.

$$TCR(T) = \frac{1}{R(T)} \cdot \frac{\Delta R(T)}{\Delta T} \quad (1)$$

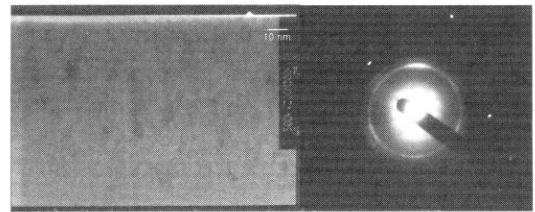
3. 실험 결과

3.1 열처리에 따른 박막저항체의 물성분석

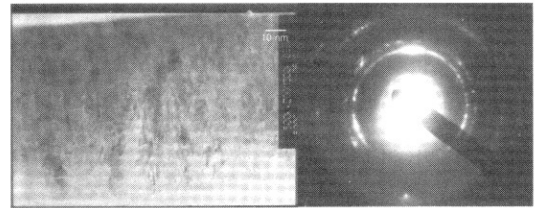
열처리에 따른 시편의 결정화도 및 성분 분석을 위하여 측정된 x-선 회절 패턴($30^\circ < 2\theta < 90^\circ$)은 그림 3과 같다. 주 피크인 Ni(111) ($I/I_0=100$) 및 Cr(110) ($I/I_0=100$) 피크는 $2\theta=44^\circ$ 근처에서 중첩되어 분리되지 않았고, Si(400, 200) 기판 피크를 제외한 다른 결정 피크는 관찰 되지 않았다.

시편의 열처리 온도가 500 °C로 점차 증가하면서, 약간의 주피크 강도 증가 및 반치폭 감소가 관찰되었다. 또한 Al, Cu 등의 소량 원소는 피크가 검출되지 않았다. 따라서 전체적인 박막의 상태는 비정질 상에서 부분적인 결정질화 상태로 보이며, 열처리 온도 증가에 따른 결정질 증가가 예상된다.

그림 4는 열처리 온도에 따른 박막 단면의 투과전자현미경(TEM) 명시야상($\times 500$ k)을 나타내며 각 회절패턴을 추가하였다. 열처리 전 시편의 경우



(a)



(b)

그림 4. (a) 열처리 전, 및 (b) 500 °C 열처리 후 박막 단면의 투과전자현미경 사진.

Fig. 4. TEM white field images and diffraction patterns of thin film cross-section for various annealing temperatures: (a) as-deposited and (b) 500 °C.

결정화도가 작고 결정립이 미세하여 결정질이 선명하게 드러나 보이지 않는다. 열처리 온도가 500 °C로 증가하면서 박막의 결정화가 진행됨에 따라, 결정립은 크기가 커지고 선명하게 관찰되는 것을 볼 수 있다. 평균적인 결정립의 크기는 열처리 전 상태에서는 수 nm 이하이고, 500 °C 열처리 시편에서는 10 nm 정도로 약간 증가한 것으로 보인다.

일반적인 다결정 구조 물질의 투과전자현미경 회절패턴은 고리의 형태를 보이며, 결정화가 진행됨에 따라서 선명한 점들로 구성되는 것을 관찰할 수 있다. 본 연구에서의 회절패턴은 열처리 전 시편의 경우 다결정질의 가는 링들이 관찰되며, 500 °C 열처리 시편의 경우 링을 구성하고 있는 점들의 개수가 줄어들어 더욱 선명한 점들의 패턴이 관찰되는데, 이것은 박막 결정립이 열처리에 따라 성장하며 전체적으로는 결정립 수가 줄어들기 때문으로 간주된다. 그러나 여전히 약간의 비정질 요소가 남아 있는 것으로 보이며, 전반적으로는 결정립들의 크기가 미세한 다결정질로 추정된다.

그림 5 및 표 1은 열처리 온도별 시편 표면의 AFM 영상 및 평균 거칠기 값을 나타낸다. 위 결

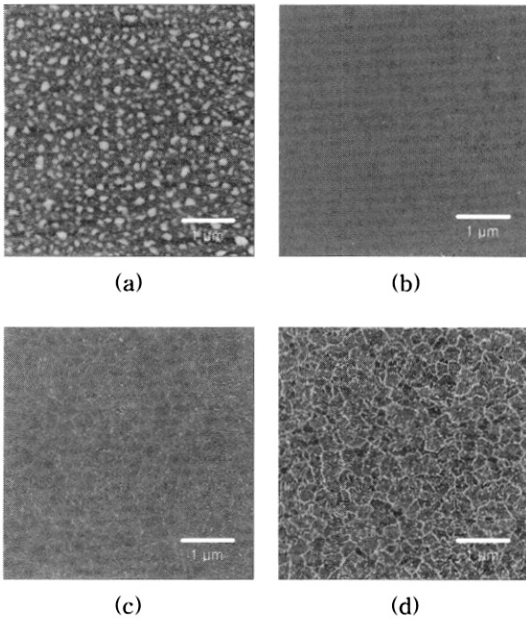


그림 5. (a) 열처리 전, (b) 300 °C, (c) 400 °C 및 (d) 500 °C 열처리 후 박막 표면의 원자 현미경 사진.

Fig. 5. AFM images of thin film surfaces for various annealing temperatures: (a) as-deposited, (b) 300 °C, (c) 400 °C, and (d) 500 °C.

표 1. 열처리 온도별 표면 거칠기.

Table 1. Surface roughnesses for various annealing temperatures.

Annealing temperature [°C]	As-deposited	300	400	500
Roughness (rms) [Å]	21.56	2.35	6.75	22.01

과에서 열처리 전 시편은 약 21.56 Å의 평균 거칠기를 갖는다. 그러나 300 °C 열처리 시편에서는 조직의 재정렬로 인한 가장 낮은 약 2.35 Å의 평균 거칠기 값을 보인다. 이후 열처리 온도가 증가하면서 500 °C 열처리 시편에서는 균열 및 기공 등의 거칠기 요소가 증가하여 약 22.01 Å의 증가된 거칠기 값이 관찰된다. 이는 열처리로 내부 및 시편 표면의 잔류 산소로 인한 표면 산화 및 응력의 증가에 따른 결과로 사료된다.

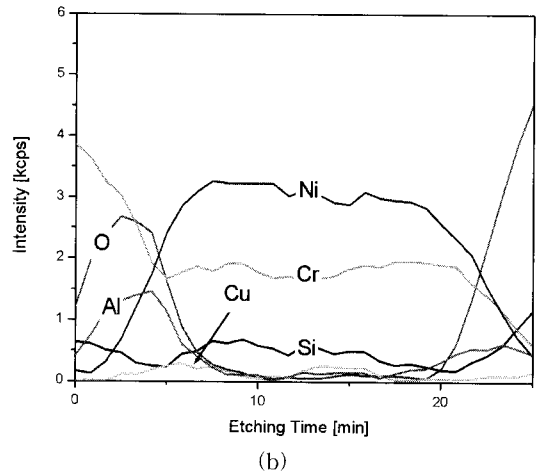
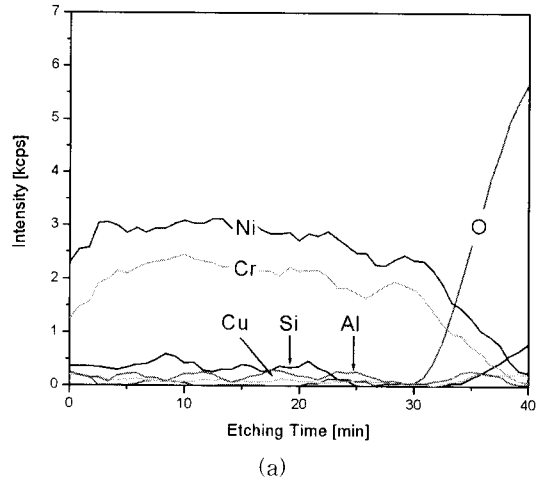


그림 6. (a) 열처리 전 및 (b) 500 °C 열처리 후 박막의 AES 깊이 분석.

Fig. 6. AES depth profiles of thin film for some annealing temperatures: (a) as-deposited and (b) 500 °C.

증착된 박막의 깊이 및 열처리 온도에 따른 성분비의 변화를 나타낸 AES 결과는 그림 6과 같다. C나 N 원소는 검출되지 않아서 그래프에서는 제외하였다. 열처리 전 시편 (a)의 경우, 표면에서 기관의 SiO₂가 검출되는 깊이까지는 Ni와 Cr이 주요 성분비를 차지하고 있고, Al과 Cu가 소량 검출되었으며, 표면에서의 O는 검출되지 않았다. 또한, 500 °C 열처리 시편의 깊이 프로파일 (b)에서는 표면의 Al 원소량이 급격히 증가되어 Cr과 더불어 Cr₂O₃, Al₂O₃ 산화층을 형성한 것으로 보이며, Ni는 박막 내부에서의 상대적 성분비가 증가한 것으

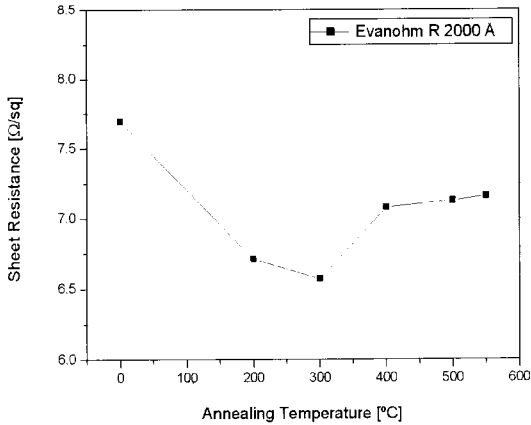


그림 7. 열처리 온도에 따른 시편의 면저항 변화.
Fig. 7. Sheet resistance of thin film as a function of annealing temperature.

로 보인다. 따라서 evanohm R 박막 시편은 열처리 온도의 증가에 따라, Cr 및 Al의 표면으로의 확산과 산화로 인해 박막의 프로파일이 표면으로부터 Cr_2O_3 , Al_2O_3 산화층과 내부의 Ni-Cr-Al-Cu 층으로 나뉘어 지는 것으로 추정된다.

3.2 박막저항의 전기적 특성

(1) 면저항

그림 7은 4-탐침법으로 측정된 열처리에 따른 면저항 측정 결과를 나타낸다. 열처리 전 시편의 경우에는 약 7.69 Ω/sq 정도의 면저항 값을 가지며 300 °C로 열처리한 시편은 약 6.57 Ω/sq 로 가장 낮은 값을 보인다. 이는 열처리에 따른 결정립계 내의 원자 재배열 및 결정화, 그리고 결정립계의 크기 증가로 나타나는 현상으로 보인다. 그러나 400 °C 이상의 열처리 시편의 경우에는 표면 산화 반응으로 인하여 다시 면저항 값이 증가하는 경향을 보인다. 300 °C 시편의 경우 계산된 비저항은 $131.44 \mu\Omega \cdot cm$ 로서 벌크 상태의 비저항과 유사한 값을 보였다.

(2) 저항온도계수(TCR)

다음은 온도 변화에 따른 저항값의 변화율 즉, 저항온도계수를 조사하였다. 측정된 TCR 결과를 그림 8에 나타내었다. TCR 값은 열처리 전 시편의 경우 73.3 ppm/°C을 보이고 200 °C 와 300 °C 에서 각각 10.46 ppm/°C 및 10.65 ppm/°C로써 최하의 값을 보이다가 다시 점차로 증가하여 400 °C,

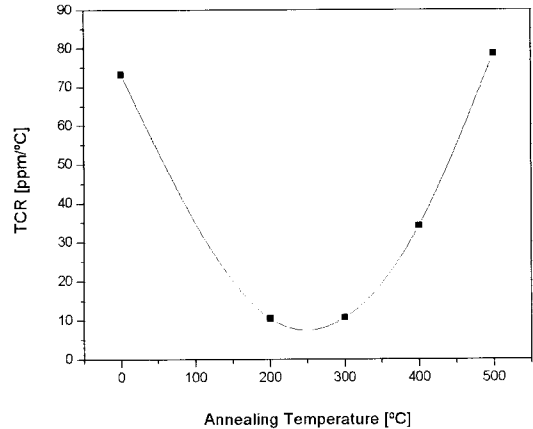


그림 8. 열처리 온도에 따른 저항온도계수.
Fig. 8. TCR of thin film as a function of annealing temperature.

500 °C 의 경우 각각 34.23 ppm/°C 및 78.5 ppm/°C 값을 보인다. 열처리 온도가 증가하면서 박막 내부의 결정질 재배열이 진행되고, 표면의 산화 및 결정립계면에서의 불순물의 재분포 등의 요인에 따른 TCR 값의 감소요인이 발생하여 200 °C와 300 °C 사이에서는 최소값을 보이지만, 그 이상의 온도에서는 결정립의 지속적인 성장과 표면으로의 Al 및 Cr 원소의 확산과 함께 산화가 진행, 내부의 결정질화는 더욱 진행되어 TCR 값은 다시 증가하게 되는 것으로 생각된다. 이러한 결과로부터 저항온도계수는 결정의 구조 변화와 결정립의 크기, 불순물, 산화 등의 복합적 기구를 갖는 것으로 이해된다.

4. 결론

본 연구에서는 Ni-Cr계 evanohm R 합금을 사용하여 낮은 저항온도계수를 갖는 고정밀 박막저항을 개발하여 열처리 온도에 따른 물성분석과 전기적 특성을 조사하였다.

제작된 박막저항체는 열처리 온도에 따라 내부의 결정화가 진행되는 것을 알 수 있다. 시편의 면저항은 박막의 결정화에 따라, 300 °C 열처리의 경우 가장 작은 값인 약 6.57 Ω/sq를 보였으나 열처리 온도 상승과 함께 표면의 산화 등이 원인이 되어 면저항 값이 증가하는 경향을 보였다. 표면의 상태는 300 °C 열처리 시편에서 가장 우수한 것

로 판명되었으며, 또한 AES 분석 결과, 표면으로 Cr, 및 Al이 확산되면서 산화반응이 일어나는 것이 관찰되었다.

저항온도계수는 200 °C 및 300 °C 열처리 시편에서 가장 작은 값 10.46 ppm/°C 및 10.65 ppm/°C을 보이며 열처리 온도 증가에 따라 다시 증가하는 경향이 나타난다. 따라서 evanohm R 박막저항은 200 °C와 300 °C 사이의 열처리 온도에서 가장 최적화 된 저항특성을 갖고 있으며, 박막의 저항온도계수는 재료의 재결정화와 표면산화, 결정립 성장 및 소량 성분비를 갖는 불순물 등의 복합적 원인에 의존한다고 할 수 있다.

결론적으로, 열처리 세부 조건의 확립과 산화반응 및 미소 첨가 원소의 조절 외, 다양한 스퍼터링 공정 등의 추가 연구를 통해 더욱 정밀하고 신뢰도 높은 박막저항을 개발하여, 각종 미세 소자의 가열부 및 고주파 대역의 저항체에 널리 적용할 수 있을 것이다.

감사의 글

도움을 주신 (주) KMC 류제천 박사님, 김동진 박사님 그리고 전상진군에게 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] B. J. Lee, D. C. Lee, and C. S. Kim, "Electrical properties of sputtered Ni-Cr-Al-Cu thin film resistors with Ni and Cr contents", J. Kor. Phys. Soc., Vol. 40, No. 2, p. 339, 2002.
- [2] D. W. Braudaway, "Precision resistors: a review of material characteristics, resistor design, and construction practices", IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. 48, No. 5, p. 878, 1999.
- [3] I. H. Kazi, P. M. Wild, T. N. Moore, and M. Sayer, "The electromechanical behavior of nichrome (80/20 wt.%) film", Thin Solid Films, Vol. 433, p. 337, 2003.
- [4] M. Ohring, "The materials science of thin films", Academic Press, p. 463, 1992.
- [5] F. Wu, A. W. McLaurin, K. E. Henson, D. G. Managhan, and S. L. Thomasson, "The effects of the process parameters on the electrical and microstructure characteristics of the CrSi thin resistor films: part I", Thin Solid Films, Vol. 332, p. 418, 1998.
- [6] M. A. Bayne, "Al-doped Ni-Cr for temperature coefficient of resistance control in hybrid thin-film resistors", J. Vac. Sci. Tech. A, Vol. 4, No. 6, p. 3142, 1986.
- [7] L. Tóth, Á. Barna, and G. Sáfrán, "In situ transmission electron microscopy annealing of NiCr thin films with simultaneous Hall-voltage measurement", J. Vac. Sci. Tech. A, Vol. 5, No. 4, p. 1856, 1986.
- [8] M. Naka, T. Shibayanagi, M. Maeda, M. Mori, and H. Mori, "Thermal stability of nanostructured Cr-Ni alloys", Vacuum, Vol. 73, p. 619, 2004.
- [9] 이봉주, 차성익, 김철수, 한정인, 김종택, 이덕출, "Ni-Cr-Al-Cu계 박막저항의 전기적 특성", 전기전자재료학회논문지, 14권, 4호, p. 328, 2001.
- [10] 이영화, 권성원, 김국진, 박세일, 임영언, "Evanohm R 합금 히터를 사용한 크로멜-콘스탄탄 다중접합 열전변환기의 제작 및 특성", 센서학회지, 13권, 1호, p. 35, 2004.
- [11] 이영화, 노성철, 나필선, 김국진, 이광철, 최용문, 박세일, 임영언, "실리콘 미세 가공을 이용한 열전형 미소유량센서 제작 및 특성", 센서학회지, 14권, 1호, p. 22, 2005.