J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.
Vol. 37, No. 3, pp. 322-327 May 2024
doi: https://doi.org/10.4313/JKEM.2024.37.3.13
ISSN 1226-7945(Print), 2288-3258(Online)

Early Stage Report : Graduate Research

연속 조성 확산 증착 방법을 통한 저항 온도 계수의 튜닝

박지훈[1], 선정우[1,2], 최우진[1], 진상준[3], 김진환[3], 전동호[3],
윤생수[3], 천재일[3], 임진주[3], 조 욱[1]

[1] 울산과학기술원 신소재공학과
[2] 노스캐롤라이나주립대학 항공우주기계공학과
[3] 스마트전자㈜ 개발팀

Tuning for Temperature Coefficient of Resistance Through Continuous Compositional Spread Sputtering Method

Ji-Hun Park[1], Jeong-Woo Sun[1,2], Woo-Jin Choi[1], Sang-Joon Jin[3], Jin-Hwan Kim[3], Dong-Ho Jeon[3], Saeng-Soo Yun[3], Jae-Il Chun[3], Jin-Ju Lim[3], and Wook Jo[1]

[1] Department of Materials Science and Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST), Ulsan 44919, Korea
[2] Department of Mechanical and Aerospace Engineering, North Carolina State University, Raleigh, NC 27695, USA
[3] Department of Research and Development, SMART Electronics Inc., Ulsan 44956, Korea

(Received March 14, 2024; Revised March 21, 2024; Accepted March 22, 2024)

Abstract: The low-temperature coefficient of resistance (TCR) is a crucial factor in the development of space-grade resistors for temperature stability. Consequently, extensive research is underway to achieve zero TCR. In this study, resistors were deposited by co-sputtering nickel-chromium-based composite compositions, metals showing positive TCR, with SiO_2, introducing negative TCR components. It was observed that achieving zero TCR is feasible by adjusting the proportion of negative TCR components in the deposited thin film resistors within certain compositions. Additionally, the correlation between TCR and deposition conditions, such as sputtering power, Ar pressure, and surface roughness, was investigated. We anticipate that these findings will contribute to the study of resistors with very low TCR, thereby enhancing the reliability of space-level resistors operating under high temperatures.

Keywords: Resistor, Temperature coefficient of resistance, Continuous compositional spread, Nickel-chromium, Silicon oxide

우주용 전자제품의 연구와 발전은 그 미래 가치와 잠재력으로 인해 꾸준히 증가해 왔으며, 그에 따라 신뢰성과 안정성에 대한 수요도 크게 증가하였다 [1-4]. 그중에서도 저항기(resistor)는 전자 기기에서 전류의 양을 제어하고 전압을 분할하는 중요한 역할을 하여 우선적으로 연구되어야 하는 부품이다 [5,6]. 우주산업에서는 외부 환경의 가혹성과 사용 환경의 특이성 때문에 저항기가 시간과 온도의 변동에 대하여 절대적인 안정성을 나타내야 하므로 낮은 온도 계수(temperature coefficient of resistance, TCR)와 저항 허용 한계 및 광범위한 범위에서의 고저항이

✉ **Wook Jo; wookjo@unist.ac.kr**

Copyright ©2024 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

필요한 실정이다 [6,7]. 특히, 0에 가까운 TCR, 약칭 Zero TCR은 소자의 신뢰성을 결정하는 핵심 요소이기 때문에 우주 전자 장치에서 사용되는 저항기에 있어 가장 중요한 특성으로 주목받고 있다 [7-9].

Zero TCR을 구현하기 위해 많은 연구가 진행되었고, 그 중 양의 온도 계수(positive temperature coefficient, PTC)를 가지는 조성과 음의 온도 계수(negative temperature coefficient, NTC)를 가지는 조성을 결합하여 두 조성의 온도 계수를 상쇄하여 zero TCR을 유도하는 방법이 확인되었다 [10,11]. 기존 연구에 따르면 박막 저항기는 니켈-크롬(Ni-Cr) 기반의 합금이 주로 사용되었으며, 양의 온도 계수를 가지는 Ni-Cr 합금에 음의 온도 계수를 가지는 실리콘(Si), 망가니즈(Mn), 주석(Sn) 등을 소량 첨가하는 방식으로 Ni-Cr 합금의 양의 온도 계수 특성을 상쇄시키는 방법이 사용되었다 [12-17]. 하지만 낮은 TCR을 가지는 저항기의 개발은 주로 미국의 Vishey 및 독일의 Isabellenhütte와 같은 기업을 중심으로 이루어졌으며, 이러한 개발의 기밀성으로 인해 정확한 조성의 정보는 규명되지 않아 후속 세대의 저항기 개발에 어려움이 있다. 또한 음의 저항 계수 경향성에 대한 지식의 결여는 Zero TCR 저항기 개발 분야에서 잠재적인 소재 및 복합조성을 면밀히 탐색하는 데 제약을 가하는 요인이며, 이러한 특성을 규명하기 위한 연구의 필요성을 강조하고 있다.

본 논문에서는 연속 조성 확산법(continuous composition spread, CCS) 스퍼터링을 활용하여 양의 저항 온도계수에 대한 음의 저항 온도계수의 영향에 대한 비교 분석을 목적으로 한다. CCS 증착법은 증착 한 번에 다양한 조성을 연속적으로 확인하여 조성별 PTC와 NTC의 상쇄 정도를 분석하기에 용이하고, PTC와 NTC를 박막 상태에서 결합하여 조성을 관찰하기 적합한 방법이기 때문에 이를 증착법으로 채택하였다 [18]. 또한, 저항체 소재 중 비교적 높은 저항과 낮은 TCR 성능을 나타내는 80Ni-20Cr 합금을 모재료로 선정하였고, PTC를 가지는 Ni-Cr 합금에 NTC 성분인 실리콘을 사용하여 TCR을 제어하였다. 박막은 칩 형태의 알루미나 기판 위에 증착되었고, Ni-Cr 단일 조성으로 증착 조건에 따른 특성 변화를 우선적으로 관찰하였다. 그 후 증착된 Ni-Cr-Si 시편을 에너지 분산 X선 분광법 분석(energy-dispersive X-ray spectroscopy, EDS), 주사탐침현미경 분석(atomic force microscope, AFM), 저항 및 TCR 측정을 진행하였다.

본 실험에서는 2012 (2.0×1.2 mm^2) 규격의 알루미나 기판을 사용하였다. 알루미나 기판은 증류수, 알코올, 아세톤, IPA 순서로 연속적인 초음파 세척을 통해 표면의 유기물 및 잔류 먼지를 제거하였고, 오존 클리너를 통해 습기 제거 및 건조를 진행하였다. 세척된 기판 위에 스퍼터링 공정을 통해 증착 실험을 진행하였고, 스퍼터링 챔버 내의 기판 홀더에 부착한 후 6×10^{-6} Pa의 순수한 Ar (순도 99.999%) 분위기에서 증착을 진행하였다. 이때 스퍼터링 타겟과 기판 간의 거리는 80 mm를 유지하였으며 증착 초기 기판의 온도는 25℃를 유지하였다. 증착 조건에 따른 특성 변화를 관찰하기 위해 조성에 맞게 제조된 Ni-Cr 합금 타겟(80Ni-20Cr)을 단일 증착하였고, DC 파워, 증착 시간, Ar 기체의 유량에 따라 두께와 TCR에 미치는 영향을 조사하였다. 증착 시 사용된 Ar 기체의 유량에 따른 박막의 표면은 주사탐침현미경 분석을 통해 분석되었다. 실리콘 함량에 따른 80Ni-20Cr 박막의 특성 변화를 확인하기

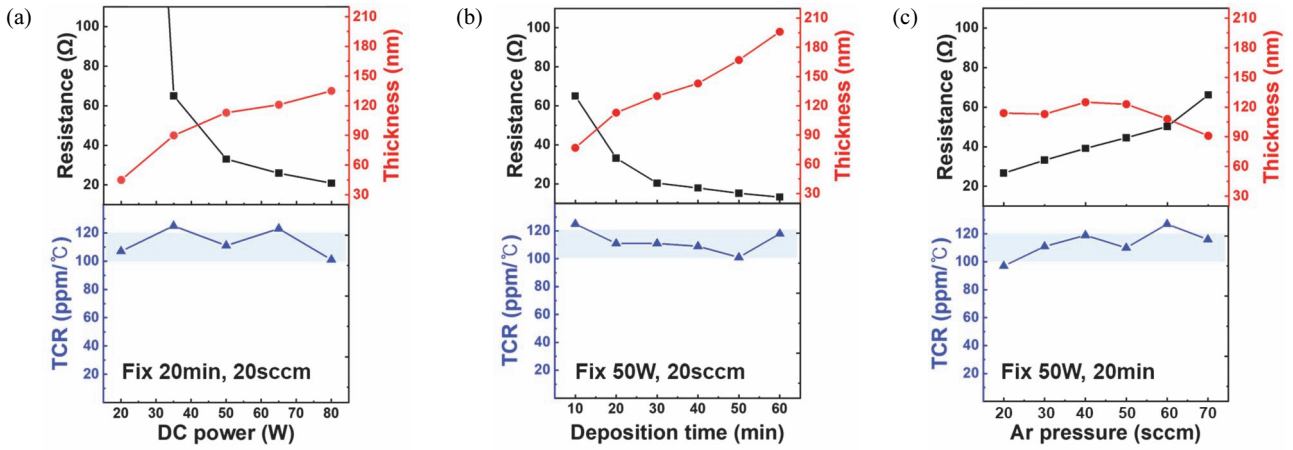

Fig. 1. Resistance and temperature coefficients of resistance (TCR) values of Ni-Cr alloy varying (a) DC power, (b) deposition time, and (c) Ar pressure, respectively.

위해 80Ni-20Cr 합금 및 Si 스퍼터링 타겟을 이용하여 증착 건으로부터 90° 오프 축으로 배치하여 동시 증착하는 연속조성확산법(CCS)으로 박막을 제작하였다. 박막의 온도별 저항은 TF analyzer 3000 (aixACCT, Germany)를 이용하여 10℃ 간격으로 측정되었고, 선형 피팅을 통해 I-V 그래프의 기울기 및 TCR이 계산되었다.

그림 1(a), (b), (c)는 Ni-Cr 합금을 DC 파워, 증착 시간, 및 Ar 유량에 따라 증착한 뒤 저항 및 TCR을 측정한 결과이다. 그림 1(a) 및 (b)에서 DC 파워와 증착 시간이 높아질수록 증착 두께가 증가하여 면저항이 감소하는 경향성이 확인되었다. 흥미로운 점은 DC 파워 및 증착 시간 조건의 변화에도 불구하고 TCR 수치가 100~120 ppm/℃ 범위 내의 수준을 나타내었고, 이는 증착 두께와 TCR 성능의 의존성이 약하다는 것을 시사한다. 반면 그림 1(c)에서는 Ar 유량이 높아질수록 증착 속도가 증가하여 증착 두께가 증가하다가, 40 sccm 이상에서 두께가 서서히 감소하는 경향을 나타내었다. 이 현상의 원인은 Ar 유량이 증가하여 챔버 내의 Ar 양이 증가하면서 이온화율이 점차 상승하고 증착 속도가 증가하는 것에 기인한다. 그러나 40 sccm 이상으로 압력이 높아짐에 따라 이온의 평균 자유행로가 줄어들어 이온화율이 낮아져 증착 속도가 다시 감소한 것으로 추정된다. 또한 압력이 일정 값 이상으로 증가하면 스퍼터링 된 입자들이 Ar 기체와 충돌하여 기판으로의 이동이 제한되어 증착 두께가 감소할 수 있다. 주목할 점은 Ar 유압이 증가함에 따라 저항 및 TCR이 증가하는 경향성을 보였다. 이러한 경향성은 두께 이외의 다른 원인에 기인한 것이라 판단하여 그림 2에서 주사탐침현미경 분석 및 에너지 분산 X-선 분광법을 통해 추가 분석을 진행하였다.

그림 2는 그림 1(c)에서 Ar 기체 유량의 변화에 따라 증착된 박막을 주사탐지현미경을 통해 관측한 결과[그림 2(a)]와 Ar pressure 증가에 따른 스퍼터 내부의 변화를 나타낸 모식도[그림 2(b)], 그리고 에너지 분산 X선 분광법을 통해 분석한 조성비를 그래프로 나타낸 것[그림 2(c)]이다. AFM을 통해 DC 파워(50 W) 및 증착 시간(20분) 고정하에 Ar 유량에 따른 표면의 거칠기를 측정한 결과, 20 sccm 조건일 때 가장 낮은 표면 거칠기를 나타냈으며 유량이 증가할수록 표면에서 단차가 급격히 커지는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 그림 2(b)와 같이 Ar 유량이 증가함에 따라 박막을 증착하는 과정에서 타겟 플라즈마와 Ar 기체 간 충돌 횟수가 증가하며, 이로 인해 챔버 내의 평균 자유행로가 낮아지고 스퍼터링 과정에서 입자가 산란 및 상호작용하는 횟수가 늘어나게 된다. 이로써 기판으로 이동하는 동안 입자가 소비하는 운동에너지가 증가하게 되며 결과적으로 표면 거칠기가 높아지고 불균일한 박막이

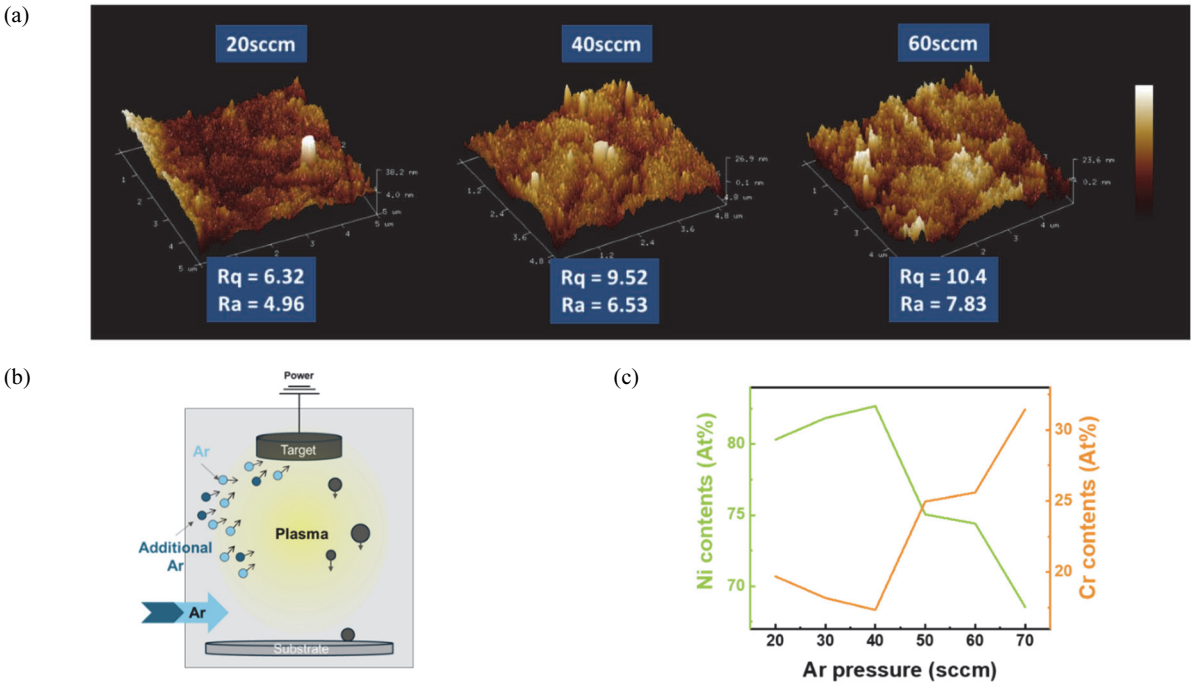

Fig. 2. (a) Thickness of the deposited Ni-Cr thin film observed via atomic force microscopy (AFM) as the Ar pressure rate varied (20, 40, and 60 sccm) and (b) the scheme within the sputter changes as the Ar pressure increases. (c) Atomic percent ratios of Ni and Cr contents in the deposited thin film shown in Fig. 1(c), as measured by energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS).

형성될 수 있음을 시사한다. 또한, 그림 2(c)의 EDS 분석을 통해 Ar 기체의 유량이 증가하면서 박막의 Ni-Cr 비율이 80:20에서 변화하는 것을 관찰하였다. 이는 Ar 유량이 증가할수록 커지는 단차 때문에 증착될 때 80Ni-20Cr 스퍼터링 타겟의 본래 비율로 온전히 증착되지 않아 40 sccm 이상에서는 10% 이상 Ni와 Cr의 비율이 달라지는 것을 확인하였다. 또한, 상온에서 Cr 금속의 저항이 Ni에 비해 높기 때문에 두께의 변화가 크지 않음에도 불구하고 Ar 유량이 증가할수록 저항값이 상승하였고, 기존 100~110 ppm/℃ 정도의 TCR을 가지는 80Ni-20Cr 비율이 깨져 TCR 또한 늘어나는 경향을 보인 것으로 추측된다. 위의 결과를 종합하여 표면 거칠기가 가장 낮고 80Ni-20Cr의 비율을 유지하는 조건인 20 sccm 조건을 연속조성확산법(CCS) 조건으로 채택하여 실험을 진행하였다.

그림 3(a), (b)는 Ni-Cr 기반 PTC 소재에 실리콘 NTC의 영향을 알아보기 위해 Ni-Cr과 Si 스퍼터링 타겟을 동시에 사용한 연속조성확산법의 모식도이고, 그림 3(c)는 마스크를 쓰여 증착된 박막을 광학 현미경을 통해 관찰한 사진이다. 또한 각 타겟에 적용된 DC 파워는 PTC와 NTC를 혼합하여 Zero TCR을 유도하기 위해, 앞선 실험을 통해 확인된 결과를 참조하여 각 성분에 대한 스퍼터링 타겟의 DC 파워를 보정하였다 (i.e. Ni-Cr 스퍼터링 타겟은 50 W, Si 스퍼터링 타겟은 20 W). 시편은 알루미나 기판에 Ag 전극을 증착한 박막에 마스크를 쓰인 뒤 증착 후 그림 3(c)와 같이 2.0×1.2 mm^2 크기에 맞추어 커팅하였고, 알루미나 기판이 놓여 있던 위치에 따라 Ni-Cr-Six (x=1, 2, ⋯, 9)로 분류하였다. 이때, 마스크는 타겟 증착 시에 전극이 타겟에 의해 완전히 가려지는 것을 방지하기 위해 사용되었다. 또한, 이는 후술할 저항과 TCR 측정에 있어서 일관된 측정값을 유지하였고, 광학현미경 사진에서 전극의 번짐이나 기판에 큰 손상이 없었기 때문에 동시 증착 과정이 문제없이 진행됐다는 것을 시사한다. 그림 3(d)는 에너지 분광 X선 분광법을 통해 각 조성의 Ni, Cr, Si 비율을 분석한 결과이다. 일부 구간에서 Ni과 Cr의 비율이 일정하지 않은 모습을 보였지만, 이는 동시 증착 과정에서 양쪽 스퍼터링 타겟에 걸린 파워 및 증착되는 시편의 위치가 다르기 때문에 모든 지점에서 일정한 환경을 유지하기 어려웠던 것으로 보인다. 하지만 그림 1(c)와 2(b)를 비교한 결과에서 Ni과 Cr 사이의 비율이 8:2에서 벗어났음에도 불구하고 TCR이 100~120 ppm/℃ 수준의 PTC 성질을 유지하였다. 전체적인 그래프 경향성에서 Ni-Cr 타겟에서 멀어질수록 Si 비율은 높아지는 모습을 확인하였기 때문에, 이

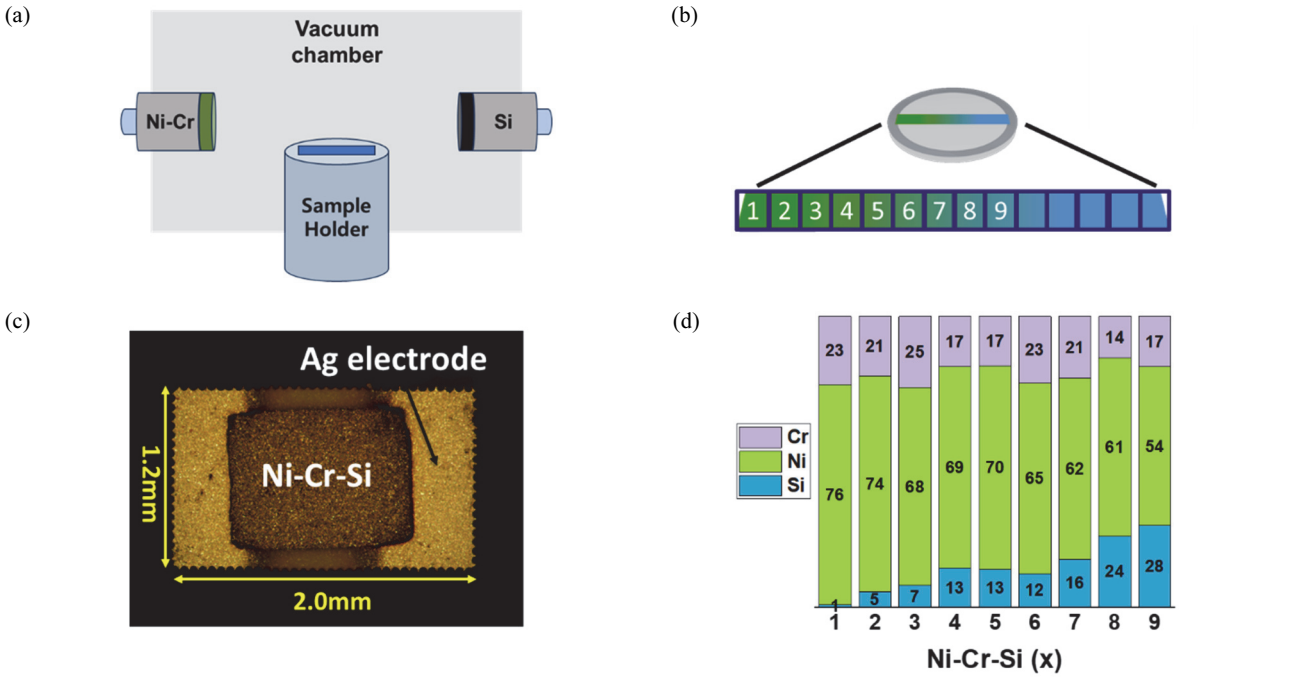

Fig. 3. (a) The schematic representation of continuous compositional spread (CCS) sputtering utilizing a Ni-Cr target on the left and a SiO_2 target on the right, (b) illustration of sample numbering (x=1~9) corresponding to the sample position during deposition, (c) a resistance chip cut into a size of 2.0×1.2 mm^2 with sequential deposition of Ag electrode and Ni-Cr-Si and (d) atomic percent ratio of Ni, Cr, and Si in the Ni-Cr-Si x thin film measured using energy-dispersive X-ray spectroscopy.

는 후술할 저항과 TCR 측정에서 본 실험에서 의도한 PTC와 NTC 혼합의 경향성 파악에 큰 영향을 주지는 않았다고 사료된다.

그림 4는 Ni-Cr-Si 시편의 저항 및 TCR을 나타낸 결과이다. 저항은 TF analyzer 3000 (aixACCT, Germany)를 이용하여 10℃ 간격으로 측정되었고, 25℃에서 125℃까지 10도 단위로 해당 온도의 저항을 측정한 뒤 TCR을 계산하였다. Ni-Cr-Si1부터 Ni-Cr-Si9 시편의 모든 조성에 대하여 저항 측정이 진행되었으며, 각각 PTC와 NTC의 성질을 가지는 조성 중 가장 Zero TCR에 근접한 조성을 1개씩 선정하여 온도에 따른 저항 데이터를 그래프화하였다. 그림 4(a), (b)에서 각 저항은 측정된 모든 온도 구간대에서 150 Ω 정도의 저항을 가졌으며, 온도에 대하여 저항이 선형적으로 변하는 1차함수 형태의 그래프를 나타내었다. 이는 저항기의 실사용 시 요구되는 125℃까지의 범위에서 온도에 대한 변화량이 일정 수준으로 유지된다는 것을 보여준다. 또한 PTC와 NTC라는 성질의 차이에도 불구하고, 온도에 따른 저항의 변화가 큰 변화 없이 선형적이라는 점으로 미루어 보아, Zero TCR 부근에서 Si와 Ni-Cr의 동시 증착이 잘 진행되었음을 알 수 있다. 그림 4(c)는 Ni-Cr-Si1부터 Ni-Cr-Si9까지 측정된 저항을 통해 TCR을 계산하여 이를 도식화한 것이다. TCR의 계산식은 식 (1)과 같다 [19].

$$\frac{R_F - R_I}{R_I} \times (T_F - T_I) \times 10{,}000\ [ppm/℃] \quad (1)$$

(T_I: 시작 온도, T_F: 마지막 온도,
R_I: 초기 온도에서의 저항 수치,
R_F: 목표 온도에서의 저항 수치)

측정 결과 Si 함량이 늘어날수록 Ni-Cr-Si 저항기의 TCR 수치는 감소하는 경향성이 나타났고, Ni-Cr-Si9 조성의 경우 -2,000 ppm/℃의 수치를 나타내었다. 이러한 결과는 PTC 저항에 NTC 성분을 혼합할 때, 온도 증가에 따른 저항 변화가 상쇄되는 효과를 유도하는 연구의 목적을 잘 나타낸다. 또한 Ni-Cr-Si2 및 Ni-Cr-Si3 시편은 각각 PTC와 NTC 조성에서 Zero TCR에 가장 근접한 TCR 수치를 보였는데, 이들은 각각 Si 함량이 5.13 at% 및 7.35 at%로 측정되었다. 비록 CCS 공정이 점진적으로 확산되는 조성을 확인하기에는 좋은 방법이나, 시편별로 조성을 세밀하게 조작할 수는 없었기 때문에 Zero TCR을 가지는 특정 조성을 얻는 데 한계가 있었다. 하지만 Si 함량이 늘어날수록 복합소재가 PTC에서 NTC로 바뀌는 경향성이 명확히 드러났고, PTC인 합금 조성에 NTC 성분을 적절히 혼합함으로써 TCR을 개선할 수 있다는 가능성을 제시한다. 본 실험에서 Si 5.13 at% 및 Si 7.35 at%의 조성 사이에 Zero TCR이 나타날 것으로 예상되어 6 at% 수준의 Si

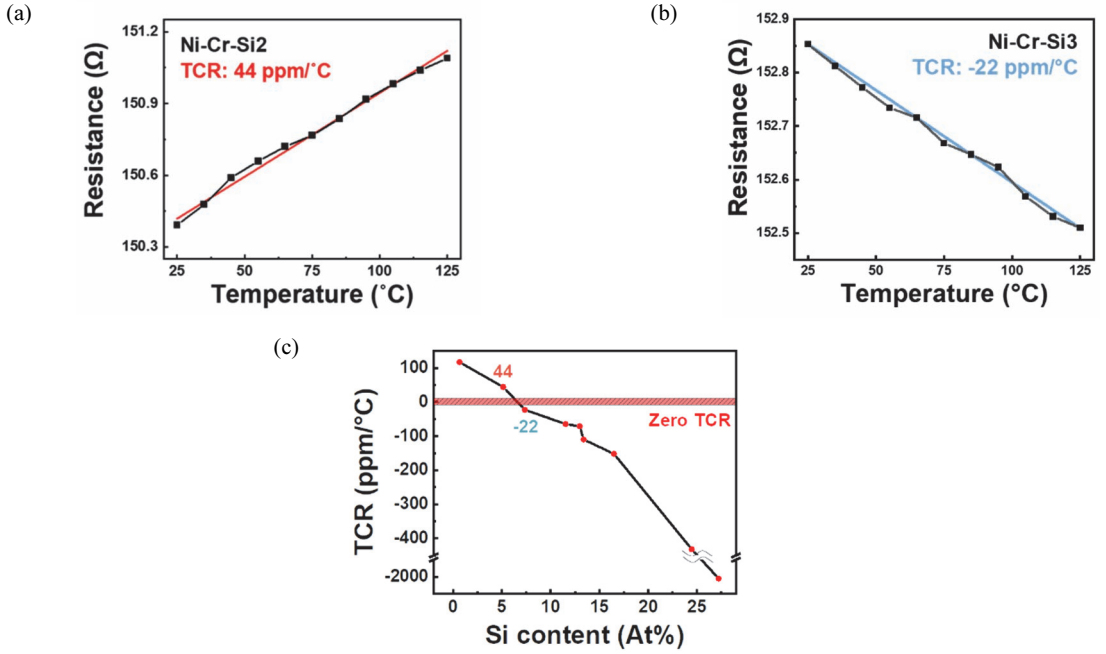

Fig. 4. Resistance and TCR as functions of temperature, measured at 5°C intervals from 25°C to 125°C for (a) Ni-Cr-Si2 and (b) Ni-Cr-Si3, representing PTC and NTC resistors, respectively. (c) TCR values measured at temperature intervals depicted in Figs. 4(a) and (b) for the entire Ni-Cr-Six sample set (x=1~9).

를 80Ni-20Cr 조성에 첨가하였을 때 Zero TCR을 달성할 수 있을 것으로 유추된다. 보다 정확한 조성을 파악하기 위해 X선 형광 분광법 및 추가 분석이 필요할 것으로 사료된다.

본 연구에서는 80Ni-20Cr 합금 및 Si 스퍼터링 타겟을 사용하여 연속조성확산법을 통해 PTC 및 NTC 특성을 가지는 Ni-Cr-Si 복합소재를 제작하고 조성에 따른 전기적 특성을 분석하였다. 먼저 스퍼터링 증착 조건의 영향을 규명하기 위해 80Ni-20Cr의 단일 증착을 진행하였고 조건별 저항 및 TCR을 분석하였다. DC 파워 및 증착 시간이 높아질수록 면저항이 감소하고 두께가 증가하는 경향성이 확인되었으며, Ar 기체 유량이 증가할수록 표면 거칠기가 증가하고 Ni-Cr 비율 8:2에서 벗어나는 것으로 나타났다. 특히 TCR은 모든 조건에서 100~120 ppm/℃ 수준으로 나타났으며 이는 증착 두께 및 TCR 간의 의존성이 상대적으로 약함을 시사한다. 또한 연속조성확산법을 통해 PTC 타겟으로부터 NTC 타겟까지 점진적으로 Si 함량이 증가하는 시편을 제작하였고, 광학현미경을 통해 전극 번짐 및 기판 손상이 없는 것을 확인하였다. 연속조성확산법으로 얻은 Ni-Cr-Si 조성에서 Si 함량이 증가함에 따라 TCR 값이 감소하는 경향성이 나타났다. 특히 Si 5.13 at% 및 7.35 at% 조건에서 Zero TCR에 근접한 결과를 얻었으며, 이는 PTC와 NTC 성질을 혼합하여 TCR을 개선할 수 있는 가능성을 제시한다. 향후 저항체 소자의 제조 및 응용 분야에서의 적용에 도움이 될 것으로 사료된다.

ORCID

Wook Jo https://orcid.org/0000-0002-7726-3154

감사의 글

이 논문은 2023년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(NRF-2021M1A3B2A01078712).

REFERENCES

[1] N. Venkat, T. D. Dang, Z. Bai, V. K. McNier, J. N. DeCerbo, B. H. Tsao, and J. T. Stricker, *Mater. Sci. Eng. B*, **168**, 16 (2010). doi: https://doi.org/10.1016/j.mseb.2009.12.038

[2] A. Bensoussan and E. Suhir, *Proc. 2013 IEEE Aerospace Conference* (IEEE, Big Sky, USA, 2013) p. 1. doi: https://doi.org/10.1109/AERO.2013.6496831

[3] E. Suhir, *J. Appl. Math. Mech.*, **98**, 824 (2018). doi: https://doi.org/10.1002/zamm.201700271

[4] A. J. Wileman, S. Aslam, and S. Perinpanayagam, *Prog. Aerosp. Sci.*, **127**, 100739 (2021). doi: https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2021.100739

[5] P. L. Kirby, *Thin Solid Films*, **50**, 211 (1978). doi: https://doi.org/10.1016/0040-6090(78)90107-4

[6] B. J. Lee, B. H. Lee, and D. C. Lee, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **42**, 1405 (2003). doi: https://doi.org/10.1143/JJAP.42.1405

[7] C. C. Lukose, G. Zoppi, and M. Birkett, *Proc. 39th International Microelectronics and Packaging IMAPS Poland 2015 Conference* (IOP Publishing Ltd, Gdansk, Poland, 2016) p. 012003. doi: https://doi.org/10.1088/1757-899X/104/1/012003

[8] O. J. Gregory and X. Chen, *Proc. SENSORS, 2007 IEEE* (IEEE, Atlanta, USA, 2007) p. 624. doi: https://doi.org/10.1109/ICSENS.2007.4388476

[9] I. Krylov, Y. Qi, V. Korchnoy, K. Weinfeld, M. Eizenberg, and E. Yalon, *Appl. Phys. Lett.*, **117**, 041902 (2020). doi: https://doi.org/10.1063/5.0012739

[10] B. Fu and L. Gao, *Scripta Mater.*, **55**, 521 (2006). doi: https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2006.05.031

[11] K. Chu, S. C. Lee, S. Lee, D. Kim, C. Moon, and S. H. Park, *Nanoscale*, **7**, 471 (2015). doi: https://doi.org/10.1039/C4NR04489D

[12] J. Rölke, *Electrocomponent Sci. Technol.*, **9**, 51 (1981). doi: https://doi.org/10.1155/APEC.9.51

[13] E. Schippel, *Thin Solid Films*, **144**, 21 (1986). doi: https://doi.org/10.1016/0040-6090(86)90066-0

[14] F. B. Chang and L. N. Kang, *Thin Solid Films*, **185**, 341 (1990). doi: https://doi.org/10.1016/0040-6090(90)90097-W

[15] W. Brückner, St. Baunack, D. Elefant, and G. Reiss, *J. Appl. Phys.*, **79**, 8516 (1996). doi: https://doi.org/10.1063/1.362531

[16] B. J. Lee, G. B. Park, D. H. You, and D. C. Lee, *Proc. 2003 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena* (IEEE, Albuquerque, USA, 2003) p. 72. doi: https://doi.org/10.1109/CEIDP.2003.1254797

[17] B. J. Lee, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **21**, 57 (2008). doi: https://doi.org/10.4313/JKEM.2008.21.1.057

[18] H. Deng, S. Yuan, X. Yang, J. Zhang, J. Khan, Y. Zhao, M. Ishaq, W. Ye, Y. B. Cheng, H. Song, and J. Tang, *Prog. Photovoltaics: Res. Appl.*, **26**, 281 (2018). doi: https://doi.org/10.1002/pip.2980

[19] S. Gong, Z. H. Zhu, and Z. Li, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **19**, 5113 (2017). doi: https://doi.org/10.1039/C6CP08115K