

고온 스트레인 게이지용 질화탄탈박막의 제작

Fabrication of Tantalum Nitride Thin-Film as High-temperature Strain Gauges

김재민*, 최성규**, 남효덕**, 정귀상*

(Jae-Min Kim*, Sung-Kyu Choi**, Hyo-Duk Nam**, Gwi-y-Sang Chung*)

Abstract

This paper presents the characteristics of Ta-N thin-film strain gauges as high-temperature strain gauges, which were deposited on Si substrate by DC reactive magnetron sputtering in an argon-nitrogen atmosphere(Ar-(4~16 %)N₂). These films were annealed for 1 hour in 2×10^{-6} Torr vacuum furnace range 500~1000°C. The optimized conditions of Ta-N thin-film strain gauges were annealing condition(900°C, 1 hr.) in 8% N₂ gas flow ratio deposition atmosphere. Under optimum conditions, the Ta-N thin-films for strain gauges is obtained a high resistivity, $\rho = 768.93 \mu \Omega$ cm, a low temperature coefficient of resistance, TCR=-84 ppm/°C and a high temporal stability with a good longitudinal gauge factor, GF=4.12.

Key Words : Strain gauge, Ta-N thin-film, TCR(Temperature Coefficient of Resistance), Gauge factor, Non-linearity

1. 서 론

최근의 산업분야에서는 고온에서도 사용 가능한 스트레인의 측정기구가 요구되고 있다. 항공우주산업, 재료공정, 의료 및 시스템 제어분야에서도 압력이나 진동의 측정용으로 사용되고 있다. 일반적으로 압력센서와 가속도계로 사용되는 금속박막형 스트레인 게이지는 종래의 박 게이지(foil gauge)와는 달리 접착제를 필요로 하지 않기 때문에 크리프 현상이 적고 안정성이 우수하다. 또한, 박막기술에 의한 고수율과 저가격화가 가능하며 열적 보상이 용이하여 고온에서도 사용이 가능하다[1-2]. 금속 박막형 스트레인 게이지의 재료로는 Au-Ni합금[3], Mn[4], NiCr합금[5], Bi-Sb[6], Cu-Ni계 합금[7] 등이 사용되고 있으나, 낮은 게이지율과 비저항값을 가지므로 센서

의 감도가 작고, 소형화가 어렵다. 또한, 실리콘을 이용한 반도체식 스트레인 게이지의 경우 높은 게이지율과 비저항값을 가지나 150°C 이상의 온도에서는 사용할 수 없다. 현재 고온용 스트레인 게이지로 SiC 나 poly-Si과 같은 다른 반도체 물질들이 연구되고 있으나 재현성과 선형이 떨어진다[8].

한편, 금속에 비해 각종 세라믹들은 비교적 큰 전기저항값을 가지며 높은 응력감도와 게이지율을 가지기 때문에 박막형 스트레인 게이지의 재료로써 유용하다. 특히, Ta-N은 견고하며, 화학적으로 안정하고, 내부식성, 내진동 및 내열특성이 있으며, 박막으로의 제조시 화학성분의 정확한 제어가 가능하기 때문에 재현성이 우수하다[2].

본 연구는 고온에서도 사용이 가능한 스트레인 게이지로서 Ta-N 박막의 특성을 분석하는데 그 목적이 있다. DC 반응성 마그네트론 스퍼터링법을 이용하여 증착시의 질소분압 조건 및 열처리 온도에 따른 Ta-N 박막형 스트레인 게이지의 전기적, 기계적 특성을 분석, 평가하였다. 또한, 최적의 증착 및 열처리 조건하에서 제작된 Ta-N 박막형 스트레인 게이지

* : 동서대학교 정보시스템공학부 메카트로닉스전공
(부산시 주례동 동서대학교,
Fax : 051-315-1592
E-mail : gschung@dongseo.ac.kr)

** : 영남대학교 전자공학과

지의 long-term stability, 전류/전압/온도 특성, 출력의 직선성 등을 분석, 평가하여 세라믹박막형 압력 센서에 응용하고자 한다.

2. 실험

본 실험에서는 DC 반응성 마그네트론 스퍼터링법으로 Si기판위에 질소분압을 4~16 %까지 달리하면서 Ta-N 박막을 증착하고, vacuum furnace를 이용하여 2×10^{-6} Torr의 진공도에서 500~1000°C 범위에서 각각 1시간동안 열처리하였다. 실험에 사용된 타겟은 순도 99.9 %의 직경 4" 인 탄탈륨이고, 기판은 비저항이 약 4~5 $\Omega \cdot \text{cm}$, 두께 430 μm 의 p(100)으로 열산화막을 5000Å 성장된 Si기판을 사용하였다.

Ta-N 박막형 스트레인 게이지는 lift-off 방법으로 제작하였으며, 질소분압에 따른 박막의 전기적 특성은 면저항 및 두께를 각각 4점 탐침기와 α -step으로 측정하여 분석하였다. 또한, Ta-N 박막형 스트레인 게이지의 온도에 따른 저항의 온도계수(TCR: temperature coefficient of resistance)는 25~125°C의 온도범위에서 측정하였으며, 게이지율(gauge factor)은 cantilever method를 사용하여 측정하였다. 또한, 게이지의 스트레인은 strain-meter를 사용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 2는 제작된 Ta-N 박막의 열처리 온도에 따른 비저항값의 변화를 나타낸 것이다. 열처리시의 진공도는 2×10^{-6} Torr이었으며, 모든 질소분압에서 600°C까지의 열처리 온도에서는 비저항값이 감소하였으며, 700°C이상의 온도에서는 점차적으로 비저항값이 증가하였다. 질소분압 8 %의 경우를 보면, 열처리전에는 592.69 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ 이었는데, 600°C, 1시간 진공열처리시엔 545.41 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ 로 다소 감소하였다가 900°C, 1시간에서는 768.93 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ 로 나타났다. 900°C이상의 열처리 온도에서는 거의 같은 비저항값을 나타내었다.

그림 3은 Ta-N 박막형 스트레인 게이지의 질소분압 비율 및 열처리 온도에 따른 TCR값의 변화를 나타낸 것이다. Ta-N 박막의 TCR값은 lift-off 방법으로 스트레인 게이지 패턴을 형성한 다음, 25°C와 125°C일 때의 게이지의 저항값을 측정하여 TCR값을 구하였다. 질소분압 4~12 %의 범위에서 증착된 Ta-N 박막형 스트레인 게이지의 TCR값은 -36~-361 ppm/°C로 모두 음의 값을 나타내었으며, 질소

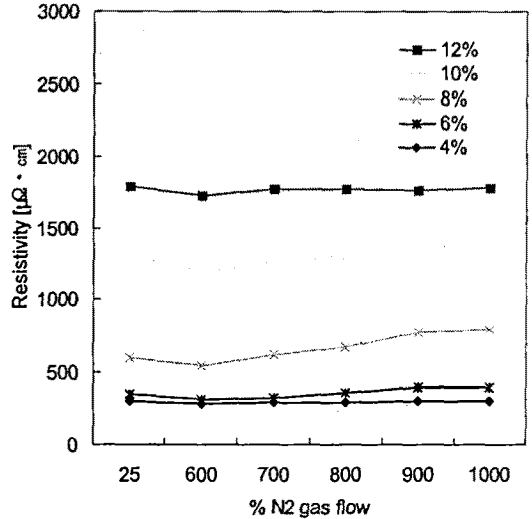


그림 2. Ta-N 박막의 질소분압비와 열처리 온도에 따른 비저항값의 변화(열처리 진공도: 2×10^{-6} Torr).

Fig. 2. Variations of resistivity according to N_2 gas flow ratio and annealing temperature of Ta-N thin-film (annealing vacuum: 2×10^{-6} Torr), respectively.

분압이 커질수록 급격히 증가하였다. 그림 3에서 질소분압 4 %와 6 %에서 각각 증착된 Ta-N 박막형 스트레인 게이지의 경우, 600°C까지의 열처리 온도에서는 점차 낮아졌으며, 700°C 이상에서는 오히려 양의 TCR값을 나타내면서 점차 증가하였다. 이것은 증착된 Ta-N 박막내에 있는 탄탈륨 금속들의 결정화가 이루어지기 때문인 것으로 사료된다. 질소분압 4 %의 경우, 700°C, 1시간의 열처리에서 -19 ppm/°C로 가장 낮은 TCR값을 나타냈다. 질소분압 8 %에서 증착된 Ta-N 박막형 스트레인 게이지는 열처리 온도가 올라갈수록 TCR값은 -115~-83 ppm/°C로 점차적으로 감소하였다. 그러나, 900°C 이상에서는 거의 일정한 TCR값을 가졌다. 또한, 질소분압 10 % 이상에서 증착된 Ta-N 박막형 스트레인 게이지는 열처리 온도가 올라갈수록 TCR값이 급격히 증가하는 것으로 나타났다.

그림 4는 Ta-N 박막형 스트레인 게이지의 질소분압에 따른 종방향 게이지율을 나타낸 것이다. 게이지율은 cantilever method를 사용하여 측정하였다. 질소분압 4~12 %의 범위에서 게이지율이 3.41에서 6.24까지 나타났는데, 질소분압이 커질수록 증가하였다.

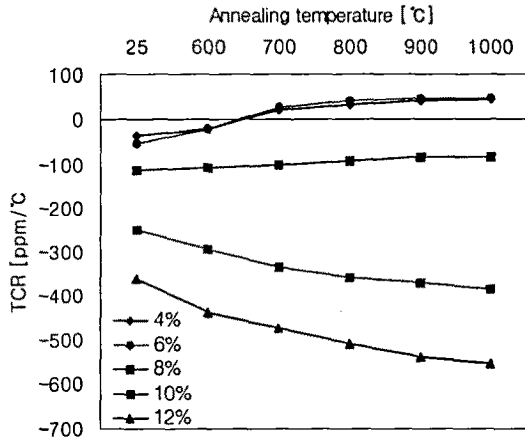


그림 3. Ta-N 박막형 스트레인 게이지의 질소분압 및 열처리 온도에 따른 TCR값의 변화(열처리 진공도 : 2×10^{-6} Torr).

Fig. 3. Variations of TCR according to N₂ gas flow ratio and annealing temperature of Ta-N thin-film strain gauge (annealing vacuum : 2×10^{-6} Torr).

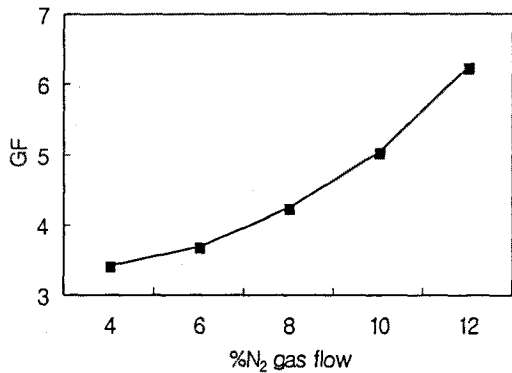


그림 4. Ta-N 박막형 스트레인 게이지의 질소분압에 따른 게이지율.

Fig. 4. Variations of gauge factor according to N₂ gas flow ratio of Ta-N thin-film strain gauge.

그림 6은 질소분압 8%에서 증착한후, 900°C, 1시간 진공열처리한 Ta-N 박막형 스트레인 게이지의 스트레인에 따른 저항변화율을 나타낸 것이다. 스트레인 게이지에 인장 응력을 증가시와 감소시 그리고 압축 응력을 증가시와 감소시의 각각의 저항변화율을 나타낸 것이다. 외부의 인가 응력이 낮을 경우에

는 스트레인 게이지의 비선형성이 다소 크게 나타났으나, 어느정도의 응력이상시엔 저항변화율이 거의 선형적으로 변하는 것을 알 수 있다. 3.57%FS이하의 비선형성과 낮은 히스테리시스를 나타내었다.

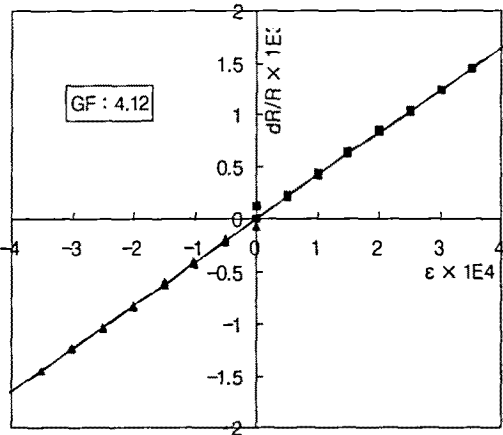


그림 6. Ta-N 박막형 스트레인 게이지의 응력에 따른 저항변화율(질소분압 : 8%, 900°C, 1시간 열처리).

Fig. 6. Relative resistance change of Ta-N thin-film strain gauge according to longitudinal strain (N₂ gas flow ratio : 8%, annealing condition : 900°C, 1 hr.).

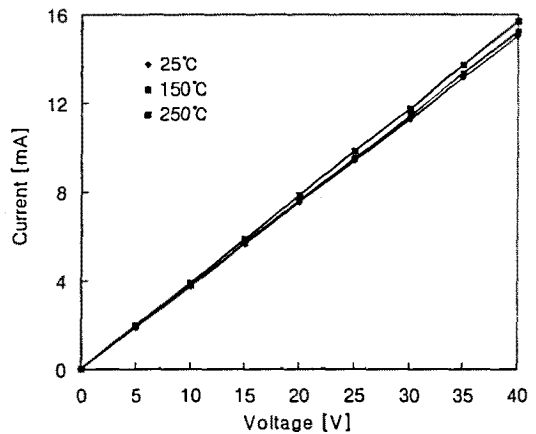


그림 7. TaN 박막형 스트레인 게이지의 전류/전압/온도 특성(질소분압 : 8%, 900°C, 1시간 열처리).

Fig. 7. I/V/T Characteristics of TaN thin-film strain gauge (N₂ gas flow ratio : 8%, annealing condition : 900°C, 1 hr.).

그림 7은 질소분압 8%에서 증착한후, 900°C, 1시간

간 진공열처리한 Ta-N 박막형 스트레인 게이지의 25, 150, 250°C에서의 전류/전압/온도 특성을 각각 나타낸 것이다. 저항은 측정동안 일정하게 유지하였으며, 이 현상은 금속 전도 메커니즘과 일치한다. Ta-N 박막의 높은 비저항값과 음의 TCR값은 전도전자의 평균자유행정이 매우 작기 때문이다[10].

그림 8은 8%의 질소분압 및 2×10^{-6} Torr의 진공도에서 900°C, 1시간 열처리한 Ta-N 박막형 스트레인 게이지의 200°C에서 시간에 따른 long-term stability를 나타낸 것이다. dR/dt 가 10 ppm/hr 미만으로써 오랜 시간동안 거의 일정한 저항변화율을 나타내었다.

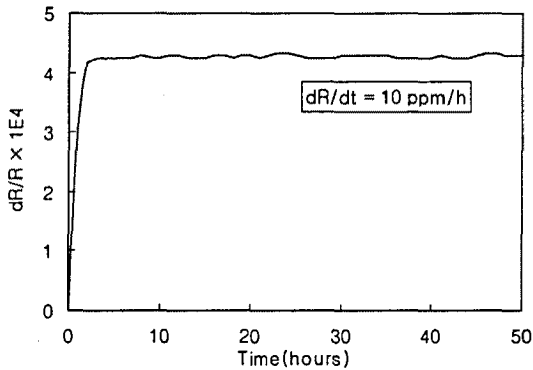


그림 8. Ta-N 박막형 스트레인 게이지의 aging effect (질소분압 : 8%, 900°C, 1시간 열처리).

Fig. 8. Aging effect of Ta-N thin-film strain gauges (N_2 gas flow ratio : 8%, annealing condition : 900°C, 1 hr.).

4. 결 론

본 연구에서는 DC 반응성 마그네트론 스퍼터링법으로 증착시의 4~16%의 범위의 질소분압 및 열처리 온도에 따른 Ta-N 박막형 스트레인 게이지의 여러 특성을 분석·평가하였다. 측정 및 분석결과에서 비저항값, TCR 및 GF를 고려하여 8%의 질소분압 및 2×10^{-6} Torr의 진공도에서 900°C, 1시간 열처리한 Ta-N 박막형 스트레인 게이지가 가장 이상적인 것으로 나타났다. 이러한 최적의 조건에서 제작한 Ta-N 박막형 스트레인 게이지는 비저항 $768.93 \mu \Omega \text{cm}$, TCR $-84 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$, 종방향 게이지율 4.12의 양호한 값을 얻었다. 따라서, Ta-N 박막형 스트레인 게이지는 세라믹박막형 압력센서에 유용하게 응용할 수 있는 것으로 기대된다.

5. 참고 문헌

- [1] I. Obieta and F. J. Gracia, "Sputtered silicon thin film for piezoresistive pressure microsensors", *Sensors & Actuators A*, vol. 41, pp. 521~688, 1994.
- [2] I. Ayerdi, E. Castano, Garcia-Alonso and F. J. Gracia, "Characterization of tantalum oxynitride thin films as high-temperature strain gauges", *Sensors & Actuators A*, vol. 46-47, pp. 218~221, 1995.
- [3] 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, pp. 521~524, 1993.
- [4] K. Rajanna and S. Mohan, "Thin-film pressure transducer with manganese film as the strain gauge", *Sensors & Actuators A*, vol. 24, pp. 35~39, 1990.
- [5] W. Hongye, L. Kun, A. Zhichou, W. Xu and H. Xun, "Ion-beam sputtered thin-film Strain gauge pressure transducers", *Sensors & Actuators A*, vol. 35, pp. 265~268, 1993.
- [6] S. Sampath and K. V. Ramanaiah, "Behaviour of Bi-Sb alloy thin-film as strain gauges." *Thin-Solid Films*, vol. 137, pp. 199~205, 1986.
- [7] H. Konishi, T. Suzuki and M. Utsunomiya, "Constantan thin-film strain gauge load cell", *Tech. Dig. of the 9th Sensor Symposium*, pp. 149~152, 1990.
- [8] V. Mosser, J. Suski, and J. Goss. "Piezo-resistive pressure sensors based on polycrystalline silicon", *Sensors & Actuators A*, vol. 28, pp. 113~132, 1991.
- [9] Y. Tanaka, T. Ikeda, M. Kelly, "Structure and properties of $(\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x)\text{N}$ films prepared by reactive sputtering". *Thin Solid Film*, vol. 240, pp. 238-241 (1991).
- [10] I. Ayerdi, E. Castano, A. Gracia, F. J. Gracia, "Ceramic pressure sensor based on tantalum thin-Film", *Sensor and Actuator A*, vol. 41-42, pp. 435-438, 1994.