2002년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2002.7.10-12

고온용 박막형 스트레인 게이지 개발

최성규*, 정귀상*
* 동서대학교 정보시스템공학부

Development of Thin-Film Type Strain Gauges for High-Temperature Applications

Sung-Kyu Choi*, Gwiy-Sang Chung*
* School of Information System Eng. Dongseo University

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 %)N_2). These films were annealed for 1 hour in 2×10^{-6} Torr vacuum furnace range 500~1000℃. The optimized conditions of Ta-N thin-film strain gauges were annealing condition(900℃, 1 hr.) in 8% N_2 gas flow ratio deposition atmosphere. Under optimum conditions, the Ta-N thin-films for strain gauges is obtained a high resistivity, ρ =768.93 $\mu\Omega$cm, a low temperature coefficient of resistance, TCR = -84 ppm/℃ and a high temporal stability with a good longitudinal gauge factor, GF = 4.12.

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 박게이지(foil gauge)와는 달리 접착제를 필요로 하지 않기 때문에 크리프 현상이 적고 안정성이 우수하다. 또한, 박막기술에 의한 고수율과 저가격화가 가능하며 열적 보상이 용이하여 고온에서도 사용 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 센서의 감도가 작고, 소형화가 어렵다. 또한, 실리콘에 기반을 둔 반도체식 스트레인 게이지의 경우 높은 게이지율과 비저항값을 가지나 150℃ 이상의 온도에서는 사용할 수 없다. 현재 고온용 스트레인게이지로 SiC나 poly Si과 같은 다른 반도체 물질들이 연구되고 있으나 재현성과 선형성이 떨어진다[8].

한편, 금속에 비해 각종 세라믹들은 비교적 큰 전기저항값을 가지며 높은 응력감도와 게이지율를 가지기 때문에 박막 스트레인 게이지의 재료로써 유용하다. 특히, Ta-N은 전성 및 연성이 우수하고, 화학적으로 안정하며, 내부식성, 내진동 및 내열 특성이 있으다. 또한 박막의 제조시 화학성분의 정확한 제어가 가능하여 재현성이 우수하다는 장점이 있다. 이러한 특성으로 인해 많은 산업응용분야에 사용되어지고 있다.

본 연구는 고온에서도 사용이 가능한 스트레인게이지로서 Ta-N 박막의 특성을 분석하는데 그 목적이 있다. DC 반응성 마그네트론 스퍼터링법을 이용하여 증착시의 질소분압에 따른 Ta-N 박막형 스트레인 게이지의 전기적, 기계적 특성을 분석, 평가하였다. 또한, 최적의 증착조건하에서 제작된 Ta-N 박막 스트레인 게이지의 전류/전압/온도 특성, 출력의 직선성 등을 분석, 평가하여 금속박막형 압력센서에 응용하고자 한다.

2. 실 험

본 실험에서는 DC 반응성 마그네트론 스퍼터링법으로 Si기판 위에 질소분압을 4~16 %까지 달리하면서 Ta-N 박막을 증착하고, vacuum furnace를 이용하여 2×10^{-6} Torr의 진공도에서 500~1000℃ 범위에서 각각 1시간동안 열처리하였다. 실험에 사용된 타겟은 순도 99.9 %의 직경 4 ″ 인 탄탈륨이고, 기판은 비저항이 약 4~5 Ω · cm, 두께 430 ㎛의 p(100)으로 열산화막을 5000Å 성장된 Si기판을 사용하였다. 표 1은 Ta-N 박막의 증착 및 열처리 조건을 각각 나타낸 것이다.

표 1. Ta-N 박막의 증착 및 열처리 조건
Table. 1. Deposition and annealing conditions of Ta-N thin-films, respectively

증착조건	범위
Target	Ta 4″ diameter
DC Power	310 V, 100 mA
Substrate	Si
Target-substrate distance	8 cm
Working gas	Ar : 19 sccm N_2 : 0.8~3.6 sccm
N_2 gas flow ratio	4, 6, 8, 10, 12, 16 %
Substrate Temperature	Room Temp.(27℃)
Working pressure	4.3 mTorr
Annealing conditions	500~1000℃, 1 hr. 2×10^{-6} Torr

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 25~1000℃의 온도범위에서 측정하였으며, 게이지율(gauge factor)은 cantilever method를 사용하여 측정하였다. 또한, 게이지의 스트레인은 strain-meter를 사용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 Ta-N 박막의 질소분압 비율에 따른 증착율과 비저항값의 변화를 각각 나타낸 것이다. 모든 박막은 1시간동안 증착 되었으며, α-step과 4-point probe로 두께 및 면저항을 측정하여 증착률과 비저항을 계산하였다. 증착률은 질소분압 6 %에서 48.3 Å/min로 최대였으며, 질소분압이 증가할수록 감소하였다. 비저항의 경우, 질소분압 4~16 %내에서 305.7 μΩ · cm에서 3887 μΩ

· ㎝로 증가하였는데. 이것은 질소분압이 낮을 때는 거의 질화하지 않고 금속상으로 증착되던 탄탈륨이 질소분압이 증가함에 따라 질화가 진행되어 저항율이 매우 높은 Ta-N 특성이 박막의 성질을 지배하기 때문이라고 생각된다[9].

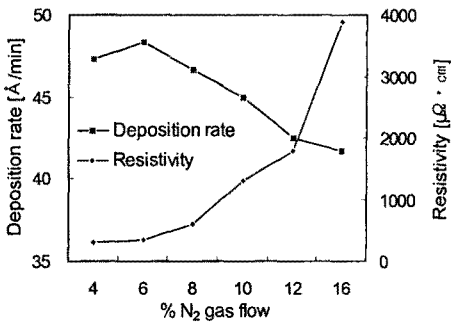

그림 1. Ta-N 박막의 질소분압비에 따른 증착률 및 비저항 변화.

Fig. 1. Variations of deposition rate and resistivity according to N_2 gas flow ratio of Ta-N thin-films, respectively.

그림 2는 제작된 Ta-N 박막의 열처리 온도에 따른 비저항값의 변화를 나타낸 것이다. 열처리 시의 진공도는 2×10^{-6} Torr이었으며, 모든 질소분압에서 600℃ 까지의 열처리 온도에서는 비저항값이 감소하였으며, 700℃ 이상의 온도에서는 점차적으로 비저항값이 증가하였다. 질소분압 8 %의 경우를 보면, 열처리전에는 592.69 μΩ · ㎝ 이었는데, 600℃, 1시간 진공열처리시에는 545.41 μΩ · ㎝로 다소 감소하였다가 900℃, 1시간에서는 768.93 μΩ · ㎝로 나타났다. 900℃ 이상의 열처리 온도에서는 거의 같은 비저항값을 나타내었다.

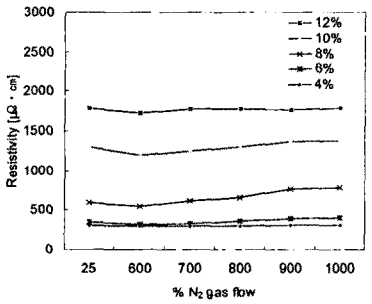

그림 2. Ta-N 박막의 질소분압비와 열처리 온도에 따른 비저항값의 변화(열처리 진공도 : 2×10^{-6} Torr).

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.

그림 3은 Ta-N 박막형 스트레인 게이지의 질소분압비율 및 열처리 온도에 따른 TCR 값의 변화를 나타낸 것이다. Ta-N 박막의 TCR은 lift-off 방법으로 스트레인 게이지 패턴을 형성한 다음, 25℃~1000℃일 때의 게이지의 저항값을 측정하여 TCR 값을 구하였다. 질소분압 4~12 %의 범위에서 증착된 Ta-N 박막형 스트레인 게이지의 TCR 값은 -36~-361 ppm/℃로 모두 음의 값을 나타내었으며, 질소분압이 증가할수록 급격히 증가하였다. 그림 3에서 질소분압 4 %와 6 %에서 각각 증착된 Ta-N 박막형 스트레인 게이지의 경우, 600℃까지의 열처리 온도에서는 점차 낮아 졌으며, 700℃ 이상에서는 오히려 양의 TCR 값을 나타내면서 점차 증가하였다. 이것은 증착된 Ta-N 박막 내에 있는 탄탈륨 금속들의 결정화가 이루어지기 때문인 것으로 사료된다. 질소분압 4 %의 경우, 700℃, 1시간의 열처리에서 -19 ppm/℃로 가장 낮은 TCR 값을 나타냈다. 질소분압 8 %에서 증착된 Ta-N 박막형 스트레인 게이지는 열처리 온도가 올라갈수록 TCR 값은 -115~-83 ppm/℃로 점차적으로 감소하였다. 그러나, 900℃ 이상에서는 거의 일정한 TCR 값을 가졌다. 또한, 질소분압 10 % 이상에서 증착된 Ta-N 박막형 스트레인 게이지는 열처리 온도가 올라갈수록 TCR 값이 급격히 증가하는 것으로 나타났다.

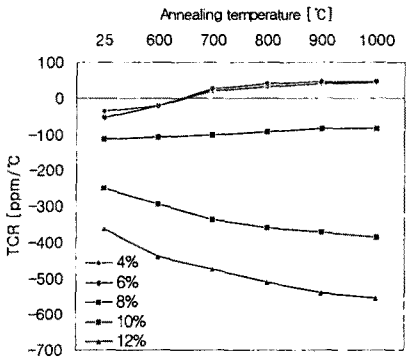

그림 3. Ta-N 박막형 스트레인 게이지의 질소분압 및 열처리 온도에 따른 TCR 값의 변화(열처리 진공도 : 2×10^{-6} Torr).

Fig. 3. Variations of TCR according to N_2 gas flow ratio and annealing temperature of Ta-N thin-film strain gauge(annealing vacuum : 2×10^{-6} Torr).

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

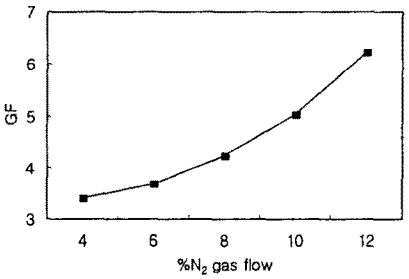

그림 4. Ta-N 박막형 스트레인 게이지의 질소분압에 따른 게이지율.

Fig. 4. Variations of gauge factor according to N_2 gas flow ratio of Ta-N thin-film strain gauge.

그림 5는 질소분압 8 %에서 증착된 Ta-N 박막형 스트레인 게이지의 열처리 온도에 따른 종방향 게이지율을 나타낸 것이다. 열처리 전의 게이지율은 4.23이었는데, 600℃까지의 열처리 온도에서는 4.25로 약간 증가하였으며, 700℃ 이상에서는 점차적으로 감소하였다.

그림 6은 질소분압 8 %에서 증착한후, 900℃, 1시간 진공 열처리한 Ta-N 박막형 스트레인 게이지의 스트레인에 따른 저항변화율을 나타낸 것이다. 스트레인 게이

지 인장 응력의 증가와 감소, 그리고 압축 응력의 증가

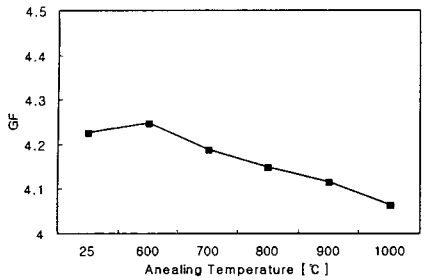

그림 5. Ta-N 박막형 스트레인 게이지의 열처리온도에 따른 게이지율(질소분압 : 8 %, 열처리 진공도 : 2×10^{-6} Torr).

Fig. 5. Variations of gauge factor according to annealing temperature of Ta-N thin-film strain gauge(N_2 gas flow ratio : 8 %, annealing vacuum : 2×10^{-6} Torr).

와 감소 각각에 따른 각각의 저항변화율을 나타낸 것이다. 외부의 인가 응력이 낮을 경우에는 스트레인 게이지의 비선형성이 다소 크게 나타났으나, 어느정도의 응력 이상에서는 저항변화율이 거의 선형적으로 변하는 것을 알 수 있다. 3.57 %FS 이하의 비선형성과 낮은 히스테리시스를 나타내었다.

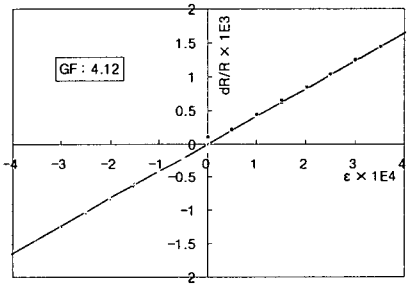

그림 6. Ta-N 박막형 스트레인 게이지의 응력에 따른 저항변화율(질소분압 : 8 %, 900℃, 1시간 열처리).

Fig. 6. Relative resistance change of Ta-N thin-film strain gauge according to longitudinal strain (N_2 gas flow ratio : 8 %, annealing condition : 900℃, 1 hr.).

그림 7은 질소분압 8 %에서 증착한후, 900℃, 1시간 진공열처리한 Ta-N 박막형 스트레인 게이지의 25, 150, 250℃에서의 전류/전압/온도 특성을 각각 나타낸 것이다. 저항은 측정 동안 일정하게 유지하였으며, 이 온도가 증가할수록 전류특성이 저하되는 금속 전도 메커니즘과 일치한다. Ta-N 박막의 높은 비저항값과 negative TCR 값은 전도전자의 평균자유행정이 매우 작기 때문이다[10].

그림 8은 8 %의 질소분압 및 2×10^{-6} Torr의 진공도에서 900℃, 1시간동안 열처리한 Ta-N 박막형 스트레인 게이지와 200℃에서 시간에 따른 long-term ability를 나타낸 것이다. dR/dT가 10 ppm/hr 미만으로써 오랜시간 거의 일정한 변화율을 나타내었다.

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

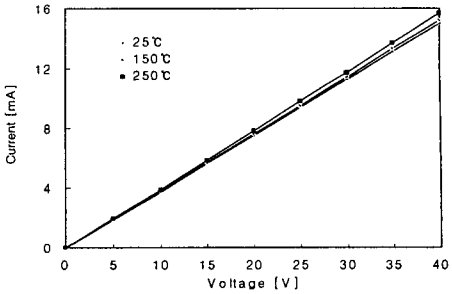

그림 7. TaN 박막형 스트레인 게이지의 전류/전압/온도 특성(질소분압 : 8 %, 900℃, 1시간 열처리).

Fig. 7. I/V/T Characteristics of TaN thin-film strain gauge(N_2 gas flow ratio : 8 %, annealing condition : 900℃, 1 hr.).

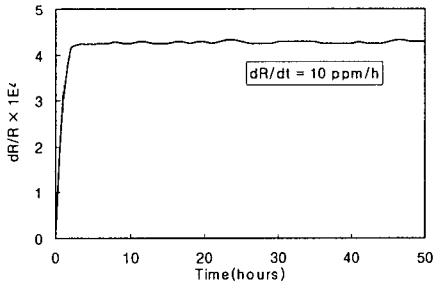

그림 8. Ta-N 박막형 스트레인 게이지의 aging effect (질소분압 : 8 %, 900℃, 1시간 열처리).

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

진공도에서 900℃, 1시간 열처리한 Ta-N 박막형 스트레인 게이지가 가장 이상적인 것으로 나타났다. 이러한 최적의 조건에서 제작한 Ta-N 박막형 스트레인 게이지는 비저항 768.93 $\mu\Omega$㎝, TCR -84 ppm/℃, 종방향 게이지율 4.12의 양호한 값을 얻었다. 따라서, Ta-N 박막형 스트레인 게이지는 세라믹박막형 압력센서에 유용하게 응용할 수 있는 것으로 기대된다.

[참 고 문 헌]

[1] I. Obieta et al., Sensors & Actuators A, 41, 521(1994).
[2] I. Ayerdi et al., Sensors & Actuators A, 46, 218(1995).
[3] K. Rajanna et al., IEEE Trans. Electron Devices, 40, 521(1993).
[4] K. Rajanna et al., Sensors & Actuators A, 24, 35(1990).
[5] W. Hongye et al., Sensors & Actuators A, 35, 265(1993).
[6] S. Sampath et al., Thin-Solid Films, 137, 199(1986).
[7] H. Konishi et al., Tech. Dig. of the 9th Sensor Sympo. 149(1990).
[8] V. Mosser et al., Sensors & Actuators A, 28, 113(1991).
[9] Y. Tanaka et al., Thin-Solid Films, 240, 238(1991).
[10] I. Ayerdi et al., Sensors & Actuators A, 41, 435(1994)