

질화탄탈 박막형 스트레인 게이지의 제작과 특성

정귀상[†] · 우형순 · 김순철* · 홍대선**

Fabrication and Characteristics of Tantalum Nitride Thin-Film Strain Gauges

Gwi-yang Chung[†], Hyung-Soon Woo, Sun-Chul Kim*, and Dae-Sun Hong**

Abstract

This paper describes on the characteristics of Ta-N(tantalum nitride) ceramic thin-film strain gauges which were deposited on Si substrates by DC reactive magnetron sputtering in an argon-nitrogen atmosphere (Ar-(4~16%)N₂) for high-temperature applications. These films were annealed in 2×10^{-6} Torr vacuum furnace at the range of 500~1000°C. Optimum deposition atmosphere and annealing temperature were determined at 900°C for 1 hr. in 8% N₂ gas flow ratio. Under optimum formation conditions, the Ta-N thin-film for strain gauges was obtained a high-resistivity of 768.93 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$, a low temperature coefficient of resistance (TCR) of $-84 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ and a good longitudinal gauge factor (GF) of 4.12.

Key Words : Ta-N thin-film, strain gauge, resistivity, TCR, gauge factor

1. 서 론

최근 압력센서는 가전제품을 비롯하여 자동차, 의료기기, 환경 관련 설비와 산업체의 대규모 시스템 제어에 이르기까지 그 응용분야가 광범위하다. 한편, 고온, 고압, 습도, 진동 등의 환경에서도 사용할 수 있는 소형, 경량, 저가격의 압력센서가 요구된다. 압력 혹은 하중 측정을 금속 박막형 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 게이지

율과 비저항값을 가진다. 또한, Si를 이용한 압저항형 반도체식 압력센서의 경우, 높은 게이지율과 비저항값을 가지나 100°C 이상의 온도에서는 사용할 수 없다. 현재 고온용 스트레인 게이지로 SiC나 poly-Si와 같은 반도체 물질들이 연구되고 있으나 재현성과 선형성이 떨어진다^[8].

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

본 연구는 고온에서도 사용이 가능한 Ta-N 박막형 스트레인 게이지의 특성을 분석하였다. DC 반응성 마그네트론 스퍼터링법에 의한 Ta-N 박막의 증착 및 열처리 조건에 따른 스트레인 게이지의 전기적, 기계적 특성을 분석·평가하였다. 또한, 최적의 증착 및 열처리 조건하에서 제작된 Ta-N 박막형 스트레인 게이지의 long-term stability, 전류/전압/온도 특성, 출력의 직선성 등을 분석·평가하여 세라믹 박막형 압력센서에 응용하고자 한다.

†동서대학교 메카트로닉스공학과(Dept. of Mechatronics Eng., Dongseo University)

*경남정보대학 전자정보계열(Dept. of Electronic Information, Kyungnam College of Information Technology)

**창원대학교 기계공학과(Dept. of Mechanical Design and Manufacturing, Changwon National University)

[†]Corresponding author: gschung@dongseo.ac.kr

(Received : January 14, 2004, Accepted : May 11, 2004)

2. 실험

본 연구에서는 DC 반응성 마그네트론 스퍼터링법으로 5000 Å의 열산화막이 성장된 Si기판위에 4~16%의 질소분압에 따라 Ta-N 박막을 증착한 다음, 2×10^{-6} Torr의 진공에서 500~1000°C의 열처리 온도에 따라 각각 1시간동안 열처리하였다. 표 1은 Ta-N 박막의 증착 및 열처리 조건을 각각 요약한 것이다.

Ta-N 박막형 스트레인 게이지는 lift-off법으로 제작했으며, 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°C 온도범위에서 측정했다. 그

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°C)
Working pressure	4.3 mTorr
Annealing conditions	500~1000°C, 1 hr. 2×10^{-6} Torr

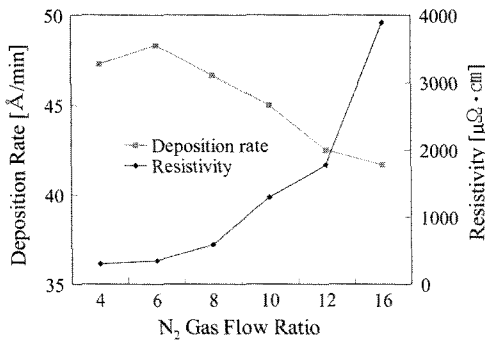


그림 1. 질소 분압비에 따라 증착된 Ta-N 박막의 증착률과 비저항 변화

Fig. 1. Variations of deposition rate and resistivity of Ta-N thin-films deposited according to N₂ gas flow ratio, respectively.

리고 게이지율(gauge factor)과 스트레인 게이지의 스트레인은 캔틸레버(cantilever)법과 strain meter를 사용하여 각각 측정했다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 Ta-N 박막의 질소 분압비에 따른 증착율과 비저항값의 변화를 각각 나타낸 것이다. 모든 박막은 1 시간동안 증착했으며 α -step과 4점 탐침기로 두께 및 면저항을 측정하여 증착률과 비저항을 구하였다. 증착률은 질소분압 6%에서 48.3 Å/min로 최대였으며, 질소분압이 증가할수록 감소하였다.

비저항의 경우, 질소분압 4~16%내에서 305.7 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ 에서 3887 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ 로 증가하였는데, 이것은 질소분압이 낮을 때는 거의 질화하지 않고 금속상으로 증착된 Ta이 질소분압이 증가함에 따라 질화가 진행되어 저항율이 매우 높은 Ta-N 특성이 박막의 성질을 지배하기 때문이라고 사료된다⁹⁾.

그림 2는 4%의 질소 분압비에서 증착된 Ta-N 박막의 표면에서 내부로의 깊이에 따른 원자 성분의 농도를 분석한 AES(Auger electron spectroscopy)의 결과를 나타낸 것이다. O와 C는 5%이하로 나타났다. Si기판 위에 증착된 Ta-N 박막은 Ta과 N가 내부에 고르게 분포된 것을 알 수 있다.

그림 3은 질소 분압비에 따른 Ta-N 박막의 XRD(X-ray diffraction) 회절 패턴을 나타낸 것이다. 6% 이하의 낮은 질소분압에서 증착된 Ta-N 박막의 XRD 패턴에서는 넓은 비정질 피크가 나타났다. 이것은 BCC-Ta (110), β -TaN0.04 (411), TaN0.1(110) 피크들의 합이라고 사료된다. 8%의 경우에서는 35.4°의 좁은 피크인 화학량론(stoichiometric)의 Ta-N 상이 나타나기 시작했

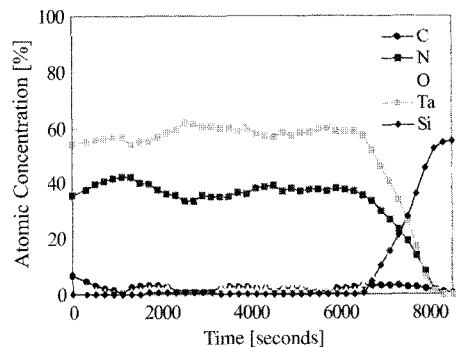


그림 2. 4%의 질소 분압비에서 증착된 Ta-N 박막의 AES Fig. 2. Auger depth profile of Ta-N thin-films deposited at N₂ gas flow ratio of 4%.

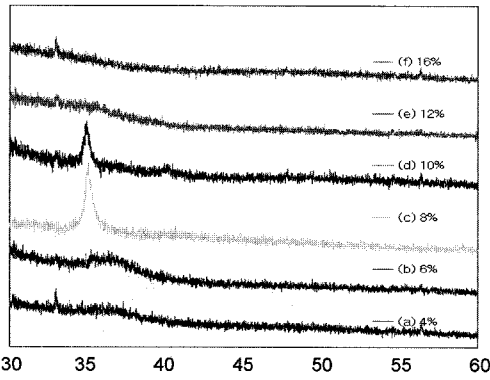


그림 3. 질소 분압비에 따라 증착된 Ta-N 박막의 XRD 패턴 변화

Fig. 3. Variations of XRD patterns of Ta-N thin-films deposited according to N₂ gas flow ratio.

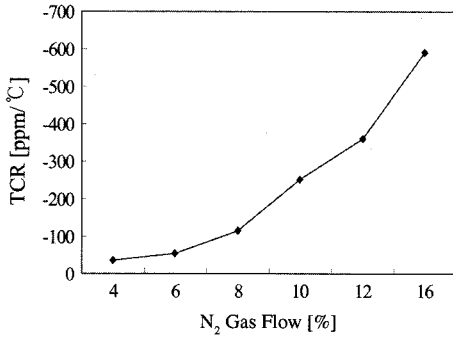


그림 4. 질소 분압비에 따라 증착된 Ta-N 박막의 TCR 변화

다. 이러한 피크는 결정질의 FCC-TaN(111)상과 유사하다. 12% 이상의 질소 분압비일 때, 비저항값은 매우 큰 값을 가졌으며 이때의 XRD 패턴은 질화로 인하여 Ta와 N의 완전한 비정질 피크를 나타냈다.

그림 4는 질소 분압비에 따라 증착된 Ta-N 박막의 TCR값 변화를 나타낸 것이다. Ta-N 박막의 TCR은 lift-off법으로 박막 저항체 패턴을 형성한 다음, 25°C와 125°C일때 게이지의 저항값을 측정하여 TCR값을 구하였다. 4~16%의 질소 분압비 범위에서 증착된 Ta-N 박막형 스트레인 게이지의 TCR값은 -36 ~ -591 ppm/°C로 모두 음의 값을 나타내었으며, 질소분압이 증가할수록 급격히 증가하였다.

그림 5는 4%의 질소 분압비에서 증착된 Ta-N 박막의 열처리 온도에 따른 SEM 이미지를 나타낸 것이다. 열처리전의 입자의 크기는 매우 작았으며, 열처리 온도가 증가할수록 결정립이 증가하는 것을 알 수 있다. 또

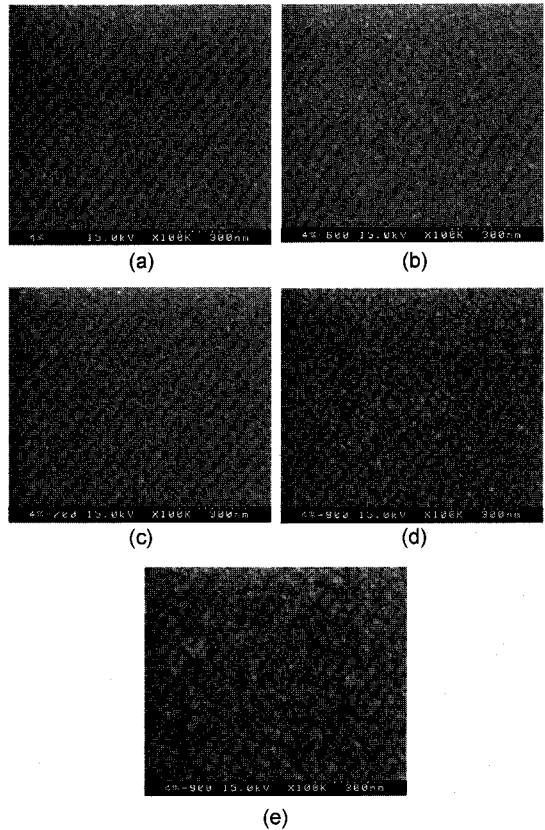


그림 5. 열처리 온도에 따른 Ta-N 박막의 SEM 사진; (a) 열처리 전, (b) 600°C, (c) 700°C, (d) 800°C, (e) 900°C(질소 분압비 : 4%)

Fig. 5. SEM images of Ta-N thin-films according to annealing temperature; (a) before annealing, (b) 600°C, (c) 700°C, (d) 800°C, and (e) 900°C (N₂ gas flow ratio : 4%).

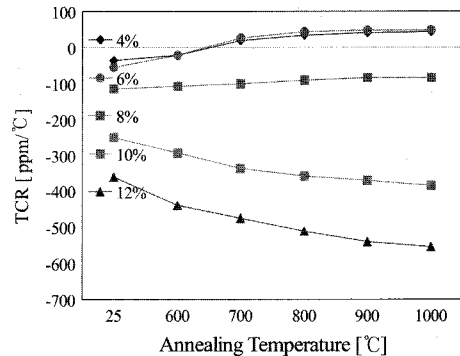


그림 6. Ta-N 박막형 스트레인 게이지의 질소 분압비와 열처리 온도에 따른 TCR값의 변화

Fig. 6. Variations of TCR of Ta-N thin-film strain gauges according to N₂ gas flow ratio and annealing temperature, respectively.

한, 열처리 온도에 따른 Ta-N 박막의 결정 상태를 분석한 XRD 회절패턴에서도 Ta(410), TaN (100)상의 피크가 나타나기 시작하는 700°C에서는 입자의 크기가 다소 증가한 것을 알 수 있으며, 900°C에서 확실히 나타났다.

그림 6은 질소 분압비에 따라 증착된 Ta-N 박막형 스트레인 게이지의 열처리 온도에 따른 TCR값의 변화를 나타낸 것이다. Ta-N 박막의 TCR은 lift-off법으로 스트레인 게이지 패턴을 형성한 다음, 25°C와 125°C일 때의 게이지의 저항값을 측정하여 TCR값을 구하였다. 4~12%의 질소 분압비에서 증착된 Ta-N 박막형 스트레인 게이지의 TCR값은 -36 ~ -361 ppm/°C로 모두 음의 값을 나타내었으며, 질소 분압비가 증가할수록 급격히 증가하였다. 4%와 6%의 질소 분압비에서 각각 증착된 Ta-N 박막형 스트레인 게이지의 경우, 600°C까지의 열처리 온도에서는 TCR값이 점차 낮아졌으며 700°C이상에서는 오히려 양의 TCR값을 나타내었다. 이것은 증착된 Ta-N 박막내에 있는 Ta 금속들의 결정화가 이루어지기 때문으로 사료된다. 4%의 질소 분압비의 경우, 700°C, 1시간의 열처리에서 -19 ppm/°C로 가장 낮은 TCR값을 나타냈다. 그리고 8%의 질소 분압비에서 증착된 Ta-N 박막형 스트레인 게이지는 열처리 온도가 올라갈수록 TCR값이 -115 ~ -83 ppm/°C로 점차적으로 감소하였다. 그러나, 900°C이상에서는 거의 일정한 TCR값을 가졌다. 또한, 10% 이상의 질소 분압비에서 증착된 Ta-N 박막형 스트레인 게이지는 열처리 온도가 올라갈수록 TCR값이 급격히 증가하는 것으로 나타났다.

그림 7은 8%의 질소 분압비에서 증착된 Ta-N 박막형 스트레인 게이지의 열처리 온도에 따른 종방향 게이지율을 나타낸 것이다. 열처리 전의 게이지율은 4.23 였지만, 600°C까지의 열처리 온도에서는 4.25로 약간 증가하였으며 700°C 이상에서는 점차적으로 감소하였다.

그림 8은 8%의 질소 분압비에서 증착한 후, 900°C, 1시간 진공 열처리한 Ta-N 박막형 스트레인 게이지의 스트레인에 따른 저항변화율을 나타낸 것이다. 스트레인에 게이지에 인장 응력을 증가할 경우와 감소할 경우 그리고 압축 응력을 증가할 경우와 감소할 경우 각각의 저항변화율을 나타낸 것이다. 외부의 인가 응력이 낮을 경우에는 스트레인 게이지의 비선형성이 다소 크게 나타났으나, 어느 정도의 응력을 인가할 경우 저항변화율이 거의 선형적으로 변하는 것을 알 수 있다. 3.57%FS 이하의 비선형성과 낮은 히스테리시스를 나타내었다.

그림 9는 8%의 질소 분압비에서 증착한 후, 900°C,

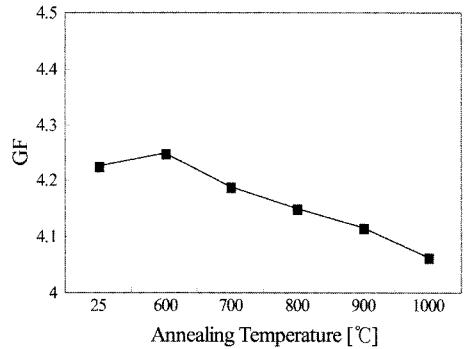


그림 7. Ta-N 박막형 스트레인 게이지의 열처리 온도에 따른 게이지율 변화(질소 분압비 : 8%)
Fig. 7. Variation of gauge factor of Ta-N thin film strain gauge according to annealing temperature (N₂ gas flow ratio : 8%).

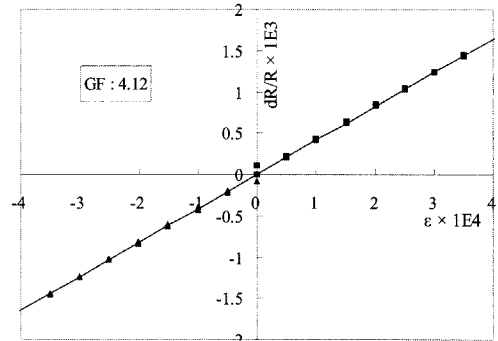


그림 8. Ta-N 박막형 스트레인 게이지의 응력에 따른 저항 변화율(질소 분압비 : 8%).
Fig. 8. Resistance change ratio of Ta-N thin-film strain gauges according to longitudinal strain (N₂ gas flow ratio : 8%, annealing conditions : 900°C, 1 hr).

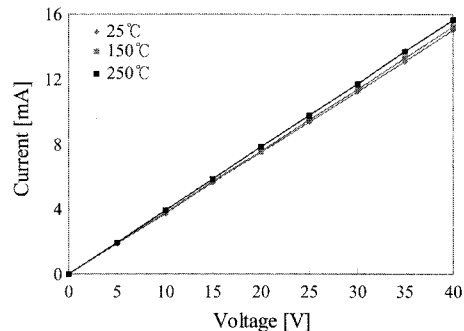


그림 9. 온도에 따른 Ta-N 박막형 스트레인 게이지의 전류-전압 특성(질소 분압비 : 8%).
Fig. 9. I-V characteristics of TaN thin-film strain gauges according to temperature (N₂ gas flow ratio : 8%).

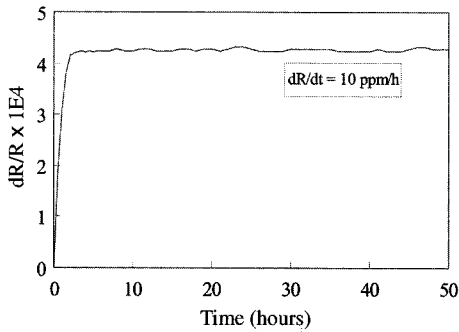


그림 10. Ta-N 박막형 스트레인 게이지의 aging effect(질소 분압비 : 8%)

Fig. 10. Aging effect of Ta-N thin-film strain gauges (N_2 gas flow ratio : 8%).

1시간 진공 열처리한 Ta-N 박막형 스트레인 게이지의 25°C, 150°C, 250°C에서의 전류-전압 특성을 각각 나타낸 것이다. 저항은 측정동안 일정하게 유지하였다. 이 현상은 급속 전도 메커니즘과 일치한다. Ta-N 박막의 높은 비저항값과 negative TCR값은 전도전자의 평균자유행정이 매우 작기 때문이라고 사료된다^[10].

그림 10은 8%의 질소 분압비와 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 이 10 ppm/hr 미만으로써 오랜 시간동안 거의 일정한 저항변화율을 나타내었다.

4. 결 론

본 연구에서는 DC 반응성 마그네트론 스퍼터링법으로 4~16%의 범위의 질소 분압비와 진공 열처리 온도에 따른 Ta-N 박막형 스트레인 게이지의 특성을 분석·평가하였다. 측정 및 분석결과에서 비저항값, TCR 및 GF를 고려할 경우, 8%의 질소 분압비에 증착한 다음, 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 게이지의 비저항은 $768.93 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ 이며 TCR은 $-84 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ 그리고 종방향 게이지율은 4.12의 값을 얻었다. 따라서, Ta-N 박막형 스트레인 게이지는 세라믹

박막형 압력 및 하중센서, 진동센서 등에 유용하게 응용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었습니다.

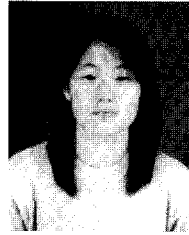
참고 문헌

- [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, G. 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. Muthun ayagam, "Pressure transducer with Au-Ni thin-film strain gauges", *IEEE Trans. on 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 gauge", *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 Sympo.*, pp. 149-152, 1990.
- [8] V. Mosser, J. Suski, and J. Goss, "Piezoresistive pressure sensors based on polycrystalline silicon", *Sensors & Actuators A*, vol. 28, pp. 113-132, 1991.
- [9] Y. Tanaka, T. Ikeda, and M. Kelly, "Structure and properties of $(\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x)\text{N}$ films prepared by reactive sputtering", *Thin-Solid Films*, vol. 240, pp. 238-241, 1991.
- [10] I. Ayerdi, E. Castano, A. Gracia, and F. J. Gracia, "Ceramic pressure sensor based on tantalum thin-film", *Sensors & Actuators A*, vol. 41-42, pp. 435-438, 1994.



정 귀 상

- 1982년 2월 영남대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
- 1985년 2월 영남대학교 전자공학과 졸업 (공학석사)
- 1992년 2월 일본 도요하시기술과학대학 졸업(공학박사)
- 1993년 ~ 현재 동서대학교 정보시스템공학부 교수
- 주관심분야 : Si, SOI, SiC 및 SiCN-M/NEMS, 압전 및 SMA 액추에이터



우 형 순

- 2003년 2월 동서대학교 화학공학과 졸업 (공학사)
- 2004년 ~ 현재 동서대학교 대학원 정보시스템공학부 석사 과정 중
- 주관심분야 : 압력센서, SiC 및 SiCN-M/NEMS, polymer-MEMS



김 순 철

- 1984년 영남대학교 기계공학과 졸업 (공학사)
- 1987년 영남대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학석사)
- 현재 창원대학교 대학원 기계공학과 (박사수료)
- 1987 ~ 1998년 삼성중공업
- 현재 경남정보대학 조교수
- 주관심분야 : 로봇제어, 생산자동화, 인공지능



홍 대 선

- 1982년 서울대학교 기계공학과 졸업 (공학사)
- 1986년 KAIST 기계공학과 졸업(공학석사)
- 1995년 KAIST 기계공학과 졸업(공학박사)
- 현재 창원대학교 기계설계공학과 부교수
- 주관심분야 : 생산자동화, 인공지능, 로봇