절연층으로 폴리이미드와 실리콘 산화막을 사용한 박막 압력 센서의 특성 비교

민남기 · 이성래 · 전재형° · 김정완*
고려대학교, * (주)대성전기

Comparison of the Performance of Thin Film Pressure Sensors with Polyimid and Silicon Oxide as a Insulating Layer

Nam-Ki Min · Seong-Rae Lee · Jae-Hyung Chun° · Jeong-Wan Kim*

Abstract - The performance of thin film pressure sensors with polyimide and silicon oxide as a insulating layer between the stainless steel diaphragm and the Cu-Ni strain gauges is presented. The polyimide was spun on the stainless steel diaphragm and cured in an oven. The silicon oxide was deposited by rf sputtering. The thin film ,pressure sensor with silicon oxide as a insulating layer showed a better nonlinesrity and a lower hysteresis.

1. 서 론

압력 센서는 프로세스 및 공장 자동화, 자동차등에서 핵심적인 센서일뿐만 아니라, 현재는 그 사용 범위가 일부 가전제품에까지 확대되고 있다. 최근 압력 센서의 연구 개발은 반도체 또는 금속 스트레인 게이지를 사용한 다이어프램식이 주류를 이루고 있다. 금속 스트레인 게이지를 이용한 압력 센서의 경우 지금까지는 박 게이지가 널리 사용되어 왔으나, 최근에는 박막 기술을 이용한 스트레인 게이지가 주목받고 있다.[1-6] 박막 게이지의 장점은 접착제를 사용하지 않으므로 크리프 현상이 적고 안정성이 우수하며, 또한 다양한 게이지 재료를 사용할 수 있어 고온,고감도와 같은 특수 목적에 적합한 압력 센서의 제작이 가능한 점이다.

그림 1은 본 논문에서 제작한 금속 박막 압력 센서의 기본 구조를 나타낸 것으로, 주변이 고정된 원형의 스테인레스 강 다이어프램의 중심부와 주변부에 각각 2개의 Cu-Ni 박막 스트레인 게이지를 배치하고 이들을 휘트스토운 브리지로 결선한다.

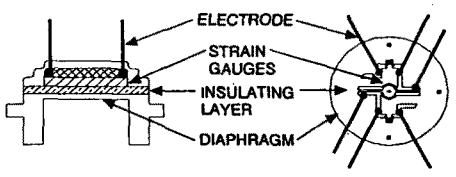


그림 1 박막 압력 센서의 기본 구조

금속 박막 압력 센서의 제작시 가장 중요한 요소중의 하나는 스테인리스 강 다이어프램과 금속 게이지사이를 분리하는 절연박막의 재료와 형성 방법이다. 절연저항이 낮거나 또는 측정중에 크게 변화하면 압력센서의 특성에 오차를 일으킨다. 일반적으로 게이지의 절연저항이 100MΩ이상으로 되면, 절연저항의 영향이 측정치에 거의 나타나지 않는 것으로 알려지고 있다.[7]

본 논문에서는 게이지 기판재료로 널리 사용되고 있는 폴리이미드(PI)와 실리콘 산화막을 사용해서 Cu-Ni 박막 압력 센서를 제작하고 그 특성을 비교하였다.

2. PI 절연막을 사용한 압력 센서의 특성

폴리이미드는 집적회로에서 층간 절연물로 이용되고 있는 절연재료이다. 여기서는 폴리이미드를 압력 센서에 적용하였을 경우 얻어지는 센서특성에 대해서만 검토한다. 스테인리스 강(SUS 631)을 가공하여 폴리싱한후 세척한 다이어프램위에 절연용 폴리이미드 PI-2723을 스핀 코우팅하였다. 코우팅후 폴리이미드는 55℃에서 120분간, 다시 400℃에서 22분간 curing하였다. curing이 끝난 폴리이미드는 짙은 갈색을 나타내었다.

폴리이미드의 막 두께는 절연저항과 게이지에 전달되는 변형에 큰 영향을 미치기 때문에 가능한한 얇고 절연저항이 높은 박막을 얻는 것이 매우 중요하다. 그림 2는 폴리이미드의 막두께와 스핀 속도의 관계를 나타낸 것으로, 폴리이미드를 2000, 3000, 4000, 5000 rpm에서 스핀 코우팅하여 막두께를 α-step으로 측정한 결과 2000 rpm에서 4.8μm, 3000rpm에서 2.6μm, 4000 rpm에서 2.1μm, 5000rpm에서 1.8μm로 되었다. 각 폴리이미드 박막의 절연 저항은 $10^9\Omega$ 이상으로 측정되었으며, 큰 차이를 보이지는 않았다. 그러나 막 두께가 얇을 수록 핀홀의 발생이 증가함을 관측할 수 있었다.

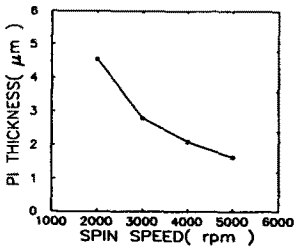
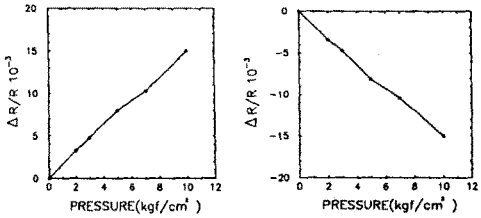


그림 2 스핀 속도와 폴리이드 막두께의 관계

그림 3은 PI 절연막위에 제작된 Cu-Ni 스트레인 게이지의 압력에 따른 저항 변화를 나타낸 것이다. 정격 압력 인가시 저항 변화률은 약 0.15%로 되었으나, 직선성은 만족스럽지 못하였다.



(a) 중심부 게이지 (b) 주변부 게이지

그림 3 스트레인 게이지의 저항 변화율

압력 센서의 감도는 압력 P와 출력 전압 V의 비(V/P)로 정의되며, 출력을 스트레인으로 나타내거나, 또는 브리지 입력 전압 1V에 대한 출력 전압(μV/V)로 표시한다. 그림 4는 브리지 입력전압 V_S=4V와 5V에 대한 출력 특성을 나타낸 것이다. 곡선으로부터 얻어진 출력 감도는 약 1.0~2.0 mV/V 범위에 분포하였다.

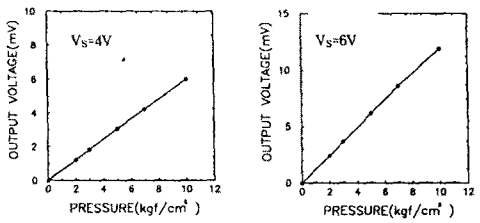


그림 4 폴리이미드를 사용한 박막 압력센서의 출력 특성

압력 센서의 정도는 비직선성과 히스테리시스에 의해서 결정된다. 비직선성은 압력을 전기 신호로 변환하는 특성의 선형 정도를 나타내는 것으로, 무압력시의 출력 전압과 정격 압력 인가시의 출력 전압을 이은 직선을 기준선으로 하고, 이 직선으로부터의 최대 편차를 최대 눈금(full scale)에 대한 %로 나타낸다. 히스테리시스는 동일 압력에서 가압과 감압시의 출력 전압차를 정격 출력에 대한 %로 측정한다.

그림 5는 출력의 비직선성과 히스테리시스 특성을 나타낸 것이다. 측정된 비직선성의 최대치는 약 4%로 매우 컸으며, 한편 그림으로부터 계산된 최대 히스테리시스는 출력 전압의 1~3%로 되어 논문에 보고된 것보다 훨씬 높게 나타났다.[3] 이러한 원인중의 하나는 스핀 코우팅된 폴리이미드 박막 두께의 불균일성에 기인하는 것으로 생각된다. .

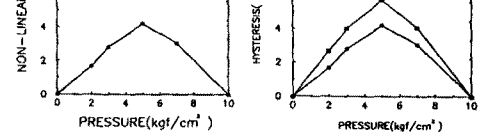


그림 5 폴리이미드를 사용한 박막 압력센서의 비선형성과 히스테리시스 특성

3. 실리콘 산화막을 사용한 압력센서의 특성

실리콘 산화막은 RF 스퍼터링에 의해서 제작하였다. 그림 6은 상온에서 Ar 주입량을 10 sccm으로하고 증착한 산화막의 전압에 따른 절연저항 변화를 나타낸 것이다. Ar 분압이 1 mtorr에서 증착한 시편은 2 mtorr에서 증착한 시편보다 두께가 약 700 Å 두꺼우나 반면 절연저항은 약 4.5배정도 큰값을 나타내었다. 또 Ar 분압이 1 mtorr에서 증착한 시편은 5 mtorr에서 증착한 시편보다 두께가 약 3400 Å 얇은 반면 절연저항은 약 100배정도 큰값을 나타내었다. 한편, 인가전압에 따른 초기 절연저항의 감소량은 1 mtorr는 74%, 2 mtorr는 84%, 5 mtorr에서는 98%로 되어 2와 5 mtorr에서 증착한 시편보다 1 mtorr에서 증착한 시편이 더욱 치밀하게 성막된 것으로 생각된다. 따라서, 본 논문에서는 Ar 주입량 10 sccm, Ar 분압 1 mtorr의 조건에서 산화막을 증착하였으며, 이때 막두께는 1.7 ㎛, 절연저항은 4.6 $\times 10^8$ Ω이었다.

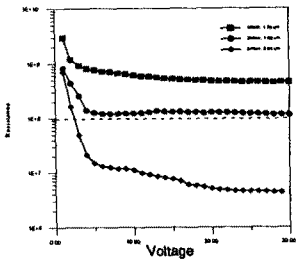


그림 6 여러 Ar분압에서 증착한 실리콘 산화막의 절연저항 변화. Ar 주입량 : 10 sccm.

그림 7은 Ar 주입량을 10 sccm으로 증착한 실리콘 산화막의 Ar 분압에 따른 산소의 조성 변화를 FT-IR로 관찰한 결과이다. 모든 박막에 대해 SiO_2의 주 피크인 1075/cm에서 동일하게 주 피크가 형성되었음을 알 수 있으며, 주피크의 분포는 SiO 피크인 1000/cm와 Si_2O_3 피크인 1045/cm에 걸쳐 넓게 형성된 것으로 보아 박막형성시 상당량의 산소 결핍이 발생된 것으로 생각된다. 그러나 각 분압에 따른 적외선 분광곡선의 주 피크 위치와 반가폭이 동일하여 모든 시편의 화학양론비는 동일한 것으로 생각된다. 또한, RBS을 이용하여 각 박막의 산소의 조성을 분석한 결과, 모든 박막이 동일한 화학양론비를 갖고있는 것을 확인하였다. 그러므로 증착도중 분압변화에 의한 산소결핍량의 변화는 일어나지 않는 것으로 추측된다.

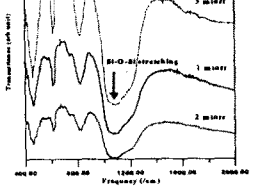
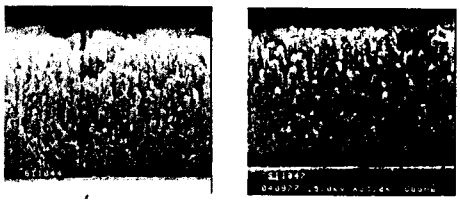


그림 7 10 sccm에서 증착한 SiO_2 박막의 Ar 분압에 따른 적외선 분광곡선

그림 8은 Ar 주입량을 10sccm으로하고 여러 Ar 분압에서 증착한 산화막의 단면을 SEM으로 관찰한 결과이다. 증착 압력이 증가할수록 Thornton의 SZM(Structure Zone Model)에서와 같이 증착되는 원자의 그림자 효과가 증가하게 되므로, 낮은 증착압력에서는 치밀한 미세구조를 갖는 박막이 형성되며, 증착압력이 높아질수록 열린 계면이 많아지며 주상정 형태의 박막이 형성된다. 1 mtorr에서 증착한 박막은 주상정 결정으로 성장하는 것을 볼 수 있으며, 결정이 성장하는 도중 주상정 결정이 끊어지면서 주상정 결정과 주상정 결정 사이의 공간에 또다른 주상정 결정이 성장하게 되어 매우 치밀한 박막구조로 성장되었음을 확인하였다. 그러나 5 mtorr에서 증착한 박막은 1 mtorr, 2 mtorr에서 증착한 박막과는 달리 주상정 결정이 끊어지지 않고 끝까지 하나의 주상정 결정으로 성장하여 주상정 결정사이에 약 20~30 nm정도의 큰 공간이 형성 되어있음을 볼수 있다. 그러므로 박막에 전류를 인가하였을때 이러한 공간으로 누설전류가 흘러 절연특성을 저하시키는 것으로 생각된다.



(a) 1 mTorr (b) 2 mtorr

(c) 5 mtorr

그림 8 여러 Ar분압에서 증착한 실리콘 산화막의 SEM 사진
(Ar 주입량 : 10 sccm)

그림 9는 제작한 압력 센서의 대표적인 출력 특성을 나타낸 것이다. 출력 특성으로부터 계산된 감도는 약 1.6mV/V로, 폴리이미드를 절연막으로 사용한 압력 센서와 큰 차이는 없었다.

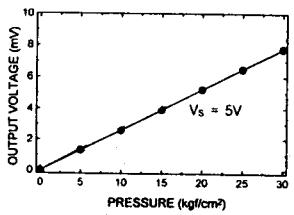
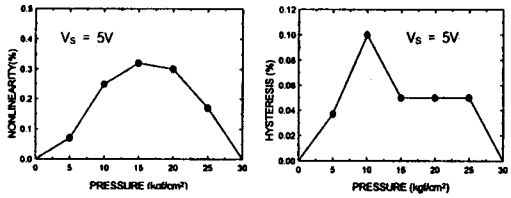


그림 9 실리콘 산화막을 사용한 박막
압력 센서의 출력 특성.

그림 10은 브리지 입력 전압이 Vs=5V일 때 출력 전압의 비직선성과 히스테리시스를 나타낸 것으로, 최대 비직선성은 약 0.35%FS, 히스테리시스는 0.1%이하로 측정되어, 산화막을 사용한 박막압력 센서의 특성이 폴리이미드를 사용한 압력 센서에 비해 대폭적으로 향상됨을 알 수 있다.



(a) 비직선성 (b) 히스테리시스

그림 10 실리콘 산화막을 사용한 박막 압력 센서의
비직선성과 히스테리시스 특성

5. 결 론

본 논문에서는 스테인리스 강 다이어프램과 스트레인 게이지사이를 각각 폴리이미드와 실리콘 산화막으로 절연시킨 박막 압력 센서를 제작하고 그 특성을 비교 고찰하였다. 스트레인 게이지 재료로는 Cu-Ni 박막이 사용되었다.

폴리이미드는 스핀 코우팅 및 curing한 후 최종 절연저항은 $10^8\Omega$이상으로 나타났다. 실리콘 산화막은 RF 스퍼터링에 의해서 형성하였고, 절연저항은 증착조건에 따라 크게 변화하였다. Ar 주입량 10 sccm, Ar 분압 1 mtorr의 조건에서 증착한 산화막의 두께는 1.7 ㎛, 절연저항은 $4.6\times10^8\ \Omega$으로 되었다.

폴리이미드를 절연층으로 사용한 압력센서의 출력 감도는 1.0~2.0mV/V, 최대 비직선성은 4%, 히스테리시스는 1-3%이였다. 반면, 실리콘 산화막을 사용한 박막 센서의 출력 감도는 약 1.6 mV/V, 최대 비직선성은 0.35%, 히스테리시스는 0.1%로 되어 폴리이미드에 비해 실리콘 산화막을 사용한 박막 압력 센서의 특성이 훨씬 우수하였다.

참고 문헌

[1] 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, no.3, pp.521-524, 1993.

[2]W.Hongye, L.Kun, A.Zhichou, W.Xu and H.Xun, "Ion-beam sputtered thin-film strain-gage pressure transducers," Sensor and Actuators A, vol.35, pp.265-268, 1993.

[3] T. Bravo, A. Tersalvi and A.Tosi,"Comparison of SiO_2 and polyimide as a dielectric layer on stainless steel in thin-film pressure sensor manufacture," Sensors and actuators A, vol.32, pp.611-615, 1992.

[4]I. Ayerdi, E. Castano, A. Garcia-Alonso, F.J. Gracia, "Characterization of tantalum oxynitride thin films as high-temperature strain gauges," Sensors and Actuators A, vol.46-47, pp.218-221, 1995.

[5]大倉 征,"スパッタ型 ひずみゲージと壓力 變換器," 計測技術, 1987, vol.1, pp.54-59.

[6] K. Rajanna, S. Mohan, M.M. Nayak and N. Gunasekaran, "Thin-film pressure transducer with manganese film as the strain gauge," Sensors and Actuators A, vol.24, pp.35-39, 1990.

[7]高橋 實, ひずみ 測定 入門, 1993, 大成社.