박막 잔류응력 및 제조공정에 따른 금속박막층 미세크랙 영향

조병규^{1,*} · 홍승찬¹ · 김병삼² · 천재경²

¹현대자동차 연구개발본부 전기전자재료개발팀
²쓰리나인 개발팀

Effect of a Metal Thin Film's Residual Stress and Manufacturing Process on Thin Film Micro-Crack

Byung-Kyu Cho^{1,*}, Seung-Chan Hong¹, Byung-Sam Kim², and Jae-Kyung Cheon²

¹Hyundai Motor Company, Electrical & Electronic Materials Development Team, Hwaseong 18280, Republic of Korea
²Three-nine Company, Development Team, Ansan 15616, Republic of Korea

Abstract: In recent automobile trends, the functions of opening and closing the vehicle door are accomplished by touch sensor and smart-phone NFC (Near Field Communication) systems. These convenience features are incorporated into the outdoor handle. However, this function can't be used when chrome plating is applied to this part for design purposes. To solve the problem of chrome plating, we studied a metal sputtering deposition process technology, which can preserve the metal feeling without interfering with NFC and touch sensor operation. To achieve this interface communication and sensing performance, we developed a surface treatment that can generate micro-cracks in the thin film layer. We also investigated how the door handle manufacturing process affected the shape of the micro-cracks in the thin film. Results showed that the thickness of the thin film and the target power played a crucial role in controlling the residual tensile stress in the thin film, which was one of major factors responsible for generating micro-cracks in the thin film layer. The shape of the micro-cracks in the thin film was affected by the adjacent layers of the thin film, the primer paint and UV top coat. The surface energy of the primer paint and the shear stress produced by the hardening of the UV top coat were found to affect the shape of the micro-cracks. In addition, we found that there was no change in the shape of the micro-cracks with additional heat treatment, if the residual tensile stress was sufficiently relieved by the micro-cracks formed in the thin film. The slits between the micro-cracks in the outdoor handle cover allowed the Capacitance Sensor and NFC to perform.

(Received September 16, 2019; Accepted January 3, 2020)

Keywords: sputtering, residual stress, micro-cracks, NFC, capacitance sensor, out-door handle

1. 서 론

최근 자동차 산업은 자율주행 및 편의기능의 적용이 증가하고 있고, 이에 따라 센서, 카메라, 레이더 등 감지 및 인식에 관련된 기술 경쟁이 심화되고 있다. 이 중 차량 개폐를 담당하는 자동차 키(Key)는 고전적인 기계식 방식에서 스마트 키를 거쳐 미래에는 스마트폰으로 대체될 전망이다. 미래의 차량개폐 기술은 NFC (Near Field Communication)

방식이며, NFC 안테나가 내장된 차량 아웃도어핸들에 운전자의 스마트폰을 접근 시, 서로 간의 NFC통신을 통해 차량 개폐가 가능하다. 이를 통해 누구나 별도의 키를 보유하고 있지 않아도 보안 승인된 스마트폰을 활용해 쉽게 차량 제어가 가능하며, 카셰어링 서비스 확대에 필요할 것으로 판단된다. 또한, 아웃도어핸들 NFC 안테나와 함께 정전용량센서를 동시에 탑재하여, 자동차 키를 소유한 운전자의 손이 도어에 접근 시, 자동으로 차량개폐를 가능케 하는 기능도 개발 중이다. NFC 및 정전용량센서 안테나를 외부로부터 보호하기 위한 아웃도어핸들 커버는 주로 플라스틱 복합재에 Cr도금을 활용하여 외관을 미려하게 한다.

- 조병규·홍승찬: 책임연구원, 김병삼: 대표이사, 천재경: 부장
*Corresponding Author: Byung-Kyu Cho
[Tel: +82-31-5172-3515, E-mail: cbk114@hyundai.com]
Copyright © The Korean Institute of Metals and Materials

그러나 Cr도금층은 NFC 전파 (13.56 MHz)나 정전용량센서의 전기장을 흡수 또는 반사하여 운전자의 스마트폰과 차량 간의 통신을 방해하게 된다. 이를 해결하기 위해 전파가 간섭되지 않는 영역에만 Cr도금을 적용하는 디자인을 채택하거나, Cr과 같은 금속 성분을 삭제한 도장기술이 적용되고 있다. 그러나 이러한 접근방식은 아웃도어 핸들의 디자인 제약이 생기고, 별물 사출 및 조립에 의한 제조 원가가 상승하는 문제점을 안고 있다. 본 연구에서는 이런 Cr 도금의 문제점을 해결하고자 증착 공정을 통해 전파 통신을 방해하지 않으면서 금속감을 확보할 수 있는 기술에 대해 고찰하였다. 증착 박막은 성장 방법에 따라 고유의 잔류응력을 지니게 된다. 박막 내 잔류 인장응력이 지니게 되면 미세한 크랙이 형성되게 되며, 잔류 압축응력을 지니게 되면 힐록(hillock)이라는 미세한 돌출부 혹은 박막이 찌글찌글해지는 주름이 발생하게 된다 [1,2]. 이로 인해 일 반적으로 공정변수 조절을 통한 잔류응력을 최소화하는 공정이 적용된다. 본 연구에서는 이런 현상을 역으로 이용해 박막의 공정변수 조절을 통해 잔류 인장응력을 증가시켜, 박막의 미세 크랙을 인위적으로 생성시키는 방법을 고안해 내었다. 이를 위해 증착공정 변수와 박막 내 잔류응력 간의 상관관계에 대해 분석하였으며, 아웃도어핸들 제조 공정 중 증착막과 인접한 프라이머 및 UV하드코팅 층과 미세 크랙과의 연관성도 추가 고찰하였다.

2. 실험 방법

2.1 박막 잔류응력 검증을 위한 샘플 제작

박막 잔류응력 평가를 위한 모재는 2인치 지름을 가진 실리콘 기판을 선택하였다. 실리콘 기판은 두께 편차가 매우 적고, 표면 조도가 좋아서 실리콘 기판 제조 편차에 따른 박막 응력에 미치는 영향성을 최대한 줄일 수 있어 정확한 잔류응력 측정이 가능하다. 증착 재료의 종류는 금속 질감 구현을 위해 Cr 및 Al 소재를 사용하였고 Cr 단일 증착과 Cr + Al 적층 증착 2종으로 샘플을 제작하였다. Cr증착은 금속질감을 구현하기 위해 활용되고, Al증착은 Cr증착 위에 형성시켜 Cr의 낮은 휘도를 높게 만들어 주는 역할을 한다. 증착 방식은 스퍼터링 공법을 사용하였고, 공정에 따른 잔류응력 추이를 확인하기 위해 타겟 파워, Ar 가스 주입량, 증착 두께별 샘플을 제작하였다. Al 증착의 경우, 증착 공정은 일정하게 유지 (파워밀도 8.1 w/cm³, 공정압 3 × 10⁻³ torr, 증착 두께 15 nm)한 채 Cr 증착 두께별 샘플 위에 적용하여 응력 추이를 확인하였다.

2.2 잔류 응력 평가

잔류응력은 Thin Film Stress Analyzer (FSM 500TC)를 이용하여 측정하였고, 포항공대 나노융합기술원에 평가 의뢰하였다. 증착 적용한 실리콘 기판에 레이저를 입사시켜 반사된 레이저 신호의 거리 편차를 활용하여 실리콘 기판의 곡률을 측정 후 잔류응력을 도출해내었으며, 실리콘 기판의 곡률과 증착막의 잔류응력 값을 나타내는 관계식은

$$\text{다음과 같다. } \sigma = \frac{E_s \times h_s^2}{6hf(1-V_s)R} \quad (\sigma: \text{stress, } E_s: \text{Substrate}$$

Young's modulus, h_s : Substrate thickness, h_f : Deposition thickness, V_s : Poisson's ratio, R : Radius of curvature).

이는 다른 조건이 다 동일하다고 가정할 때, 증착막 적용 후 실리콘 기판이 많이 휘면 R (곡률 반지름)이 작아지고 이는 증착막의 스트레스가 높다는 것을 의미한다. 또한 실리콘 기판이 적게 휘면 R 이 크고 즉, 스트레스가 작다는 것을 의미한다.

2.3 제조공정 별 아웃도어핸들 제작 및 제품 분석

잔류응력 평가결과를 활용하여, 잔류 인장응력을 극대화한 증착공정 조건을 통해 증착층 미세 크랙을 형성한 아웃도어핸들 실 부품을 제작하였다. 아웃도어핸들 표면처리의 공정 순서는 플라스틱 모재 → 하도 프라이머 도장 → 진공 증착 → UV 경화용 클리어 하드코팅 순으로 진행된다. 하도 프라이머는 사출물의 매끄럽지 않은 조도를 레벨링 해주는 효과를 내며, 모재와 금속박막의 부착력을 높여주는 역할을 한다. 또한 UV경화용 클리어 하드코팅은 외부 환경으로부터 박막을 보호해주는 역할로써 적용된다. 이렇게 아웃도어핸들 제조 공정 별 샘플을 제작하였고, 제조 공정 별 증착막에 형성된 크랙 상태를 광학현미경 통해 분석하였다.

2.4 송수신 감지성능 평가

아웃도어핸들 감지성능 평가 전, 시편 단위로 성능평가로 검증하였다. 평가는 규격화된 감지봉으로 정확한 위치에 근접할 수 있는 자동화 지그를 자체 제작하여 평가 진행하였다. 시편 하단에 정전용량센서를 장착하고 전기장을 형성시켜, 접근하는 감지봉이 어느 정도의 감지 거리를 확보할 수 있는지를 평가하였다. 시편평가 진행 이후, NFC 및 정전용량센서가 정상적으로 작동되는지 단품 평가 진행하였으며, 자동차 실 사용조건 고려하여 스키장갑, 빗물 등이 접촉 시에도 작동되는지를 확인하였다.

Fig. 1. (a) Deposition layer's residual tensile stress at different Cr Target Power (Deposition thickness 100 nm, Ar gas 240 sccm) (b) Deposition layer's residual tensile stress at different Ar gas (t: Deposition Thickness) (c) Deposition layer's residual tensile stress at different deposition thickness (Target Power 28 KW, Ar gas 240 sccm)

3. 결과 및 고찰

3.1 증착 공정 변수별 박막의 잔류응력 영향성 분석

그림 1은 Cr 스퍼터링 증착 공정 변수별 제작된 금속박막의 잔류응력 평가 결과이다. 그림 1(a)와 같이 증착 공정 중 Cr타겟 파워 변수에 따른 잔류응력을 측정하기 위해 증착 두께 및 Ar 가스 주입량을 동일하게 고정한 채 타겟 파워 별 샘플을 제작하여 평가를 진행하였다. 그 결과, 인가전력이 증가할수록 잔류 인장응력이 점점 증가함을 확인할 수 있었다. 이는 인가전력이 커질수록 Ar 가스가 Cr타겟에 부딪히는 힘이 세지고, 이로 인해 운동에너지가 큰 Cr 입자들에 의해 기판에 nucleation seed로 작용하는 개수가 많아진다. 이러한 많은 개수의 seed가 성장함에 따라 서로 간 상호작용이 많아져 응력이 커지는 것으로 판단된다 [3,4]. 반면 그림 1(b)와 같이 증착 챔버 내 Ar 가스 주입량에 따른 박막의 잔류응력을 확인해 본 결과, Cr 박막 잔류응력은 Ar 가스 주입량과 큰 영향성이 없는 것으로 확인되었다.

그림 1(c)에는 증착 두께에 따른 Cr 박막의 잔류응력 추이 변화를 나타내었다. 타겟 파워 28 KW, Ar 240 sccm로 고정한 채, Cr 증착 두께별로 샘플의 잔류응력을 측정한 결과, 두께가 증가할수록 잔류 인장응력이 급격히 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 박막의 잔류응력은 증착 두께와 상관성이 높다고 말할 수 있다. 이러한 결과는 증착 박막의 성장단계로 고찰해 볼 수 있는데, 박막의 성장은 크게 3가지 단계로 나눌 수 있다. 1단계는 박막의 핵(nuclei) 생성단계로 증착막과 기판 간 표면 장력에 의해 압축응력을 형성하게 된다 [5,6]. 그 이후 2단계로 핵과 핵이 결합하면서 결정립을 형성하게 되고, 질량을 가지는 결

정립 간의 인력이 작용하여 전체 박막은 잔류 인장응력을 형성하게 된다. 이는 인력에 의해 기판이 안쪽으로 휘게 되고, 기판의 복원력에 의해 박막은 잔류 인장응력이 발생한 것으로 설명할 수 있다 [7,8]. 마지막 3단계로 이러한 결정립이 증가하면서 결정립 간의 척력이 발생하여 그에 대한 반대되는 복원력으로 증착막은 압축응력을 가지게 된다. 제작된 샘플은 2단계에서 3단계 박막 성장단계로 진행되는 과정임을 확인할 수 있다 [9,10]. 그림 2은 타겟 파워 28 KW, Ar 240 sccm로 고정한 채, Cr 박막 두께별로 XRD (OL103)를 이용하여 결정립 크기를 측정한 결과 값이다. XRD평가는 한국기초과학지원연구원에 의뢰하였다. 그림 2(a)와 같이 증착 두께가 증가할수록 XRD 패턴의 반치폭이 점점 줄어들음을 확인할 수 있다. 즉, 제작된 증착 두께가 두꺼워질수록 그림 2(b)와 같이 결정립 크기가 커지는 것으로 확인되고, 이에 따라 그림 2(c)와 같이 잔류 인장응력이 줄어드는 현상을 보인다. 이는 결정립이 증가할수록 서로 결합하고 그에 따라 단위 부피 당 결정립계 면적이 줄어드는 것으로 보인다. 즉, 결정립 간의 상호작용이 감소하면서 잔류 인장응력이 감소하는 현상이 나타난 것으로 판단된다 [11-13].

Cr+Al 박막의 경우, Cr박막 위로 Al이 적층되는 구조이다. Al 층을 적용하는 이유는 Cr 대비 휘도 개선이 가능하여 금속 질감 확보에 유리하기 때문이다. Al의 증착 조건은 동일하게 유지하며, Cr 증착 두께를 변수로 사용하였다. 제작된 Cr + Al 박막에 대한 잔류 인장응력 측정결과, Cr 박막 대비, Cr + Al 박막이 더 낮은 잔류 인장응력을 가진 것을 확인할 수 있었다 (그림 3). 이는 높은 잔류 인장응력을 가지고 있는 Cr증착막이 낮은 잔류 인장응력을 가진 Al증착막과 결합하여 전체 증착막의 응력이 해소된 것

Fig. 2. (a) Grain size measurement from XRD method (b) Deposition layer's grain size at deposition thickness (c) Deposition layer's residual tensile stress at different deposition thickness

Fig. 3. Residual tensile stress at different deposition thickness (Target Power 28 KW, Ar gas 240 sccm)

으로 판단된다.

3.2 도어핸들 제조공정별 크랙 영향성 분석

증착 공정변수에 따른 금속박막의 잔류 인장응력의 영향

성을 앞서 고찰하였다. 잔류 인장응력은 박막 내 미세크랙과 밀접한 관련이 있다. 추가로 아웃도어핸들 제조공정에 따른 박막 내 미세크랙 형상 영향성도 확인해 보았다. 도어핸들 공정은 플라스틱 모재위에 프라이머 도장, 금속 스퍼터링 증착, UV 하드코팅 순으로 진행된다. 제조 공정별 박막의 미세크랙에 미치는 영향성을 검증하기 위한 샘플의 증착 공정조건은 모두 동일한 조건으로 진행하였다. 그림 4와 같이 프라이머 도장의 종류에 따라 박막 내 미세 크랙 형상과 프라이머 도장 간의 상관관계를 규명하기 위하여 프라이머층의 표면에너지 확인하기 위한 접촉각 평가를 진행하였다. 스포이트를 통해 물을 떨어뜨려 프라이머 표면에 형성되는 물방울과 도장 표면 간 각도를 측정하여, 수분 접촉각을 확인하였다. 그 결과, 프라이머 도장 종류에 따라 수분 접촉각이 차이가 있음을 확인할 수 있었다 (그림 5). 수분 접촉각이 작은 프라이머일수록 박막 내 크랙이 잘 생긴다는 것을 알 수 있다. 이러한 현상을 고찰해보면 프라이머층에 접하는 수분 접촉각이 작을수록, 표면에 에너지가 높고 이러한 높은 표면에너지를 가진 프라이머 층

(A: 우레탄 아크릴레이트계, B: 폴리에스터 아크릴레이트계, C: 에폭시 아크릴레이트계)

Fig. 4. The change of crack shape as a function of primer paint type

Primer paint	A	B	C
Optical Microscope Image
Contact Angle Between surface and water	68.1°	73.2°	79.9°

Fig. 5. Water contact angle as a function of primer paint type

Thermal treatment	No treatment	80 °C, 20 Minutes	80 °C, 40 Minutes	80 °C, 60 Minutes
Optical Microscope Image

Fig. 6. Crack shape at different thermal treatment

에 적용된 나노 단위의 Cr입자는 이탈하지 않고 표면에 안착할 가능성이 크다는 것을 의미한다. 따라서 높은 표면 에너지에 의해 증착 핵의 개수가 늘어나게 되고 그에 따라 성장한 박막 결정립 개수가 많아지면서 결정립계 간 상호작용으로 의해 높은 인장 잔류응력과 그로 인한 많은 크랙을 형성한 것으로 판단된다 [13]. 반면에 수분 접촉각이 높은 프라이머 층은 낮은 표면에너지로 인해 타겟으로부터 날아오는 Cr 입자들의 운동에너지가 충분하지 않으면 기판에 안착하지 않고, 이탈될 가능성이 크다. 즉, 충분한 에너지를 가진 Cr 입자만 기판 위에 핵으로 작용할 수 있고, 이에 따라 표면에너지가 높은 프라이머 대비, 상대적으로 작은 결정립 개수로 인해 박막의 잔류 인장응력이 크지 않은 것으로 판단된다 [14-18].

다음으로는 금속 박막에 형성된 크랙이 열처리로 형태가 변하는지 확인해 본 결과, 열처리를 통해서 추가적인 크랙이 형성되지 않음을 확인할 수 있었다 (그림 6). 이러한 현상은 플라스틱 모재에 증착막이 형성되었을 때, 크랙이 발생되면서 박막 내 잔류하던 인장응력이 완전히 해소되었기 때문에 열처리에 의한 크랙 형태의 변화가 발생하지 않은 것으로 판단된다 [19].

아웃도어핸들 마지막 공정인 UV 하드코팅에 의해 증착층 크랙이 변화하는지 확인해보았다. 그 결과, UV하드코팅 도포 이후 미세크랙이 더 활성화되고, 크랙 폭도 커짐

	Before UV hard coating	After UV hard coating
Optical Microscope Image

Fig. 7. The change of Crack shape after UV hard coating

을 확인할 수 있었다 (그림 7). 이는 UV 하드코팅 경화 과정에서 수축, 팽창에 의한 금속박막과 UV 하드코팅 간 계면에서 전단응력이 발생하고 이러한 힘으로 크랙이 추가 생성 및 확장된 것으로 판단된다 [20].

3.3 감지성능과 미세크랙의 상관성 검증

아웃도어핸들의 실 부품 감지성능 평가하기 전, 시편을 통해 성능을 검증하였다. 평가는 규격화된 감지봉으로 정확한 위치에 근접할 수 있는 자동화 지그를 제작하고, 샘플 하단부에 정전용량센서를 장착하여, 발생하는 전기장의 감지 성능과 오감지 측정에 대해 평가 진행하였다. 전기장 영역 이외에 감지봉을 접촉 시켰을 시, 센서가 인지하게 되면 오감지가 발생하였다고 판단한다. 평가 결과, 현재 사용되는 크롬도금 적용 시편은 감지 거리가 0 mm이고, 오감지도 발생하였다. 그러나 크랙이 형성된 증착을 적용한 샘플의 경우, 증착을 적용하지 않은 부품과 비슷한 정도의

Table. 1. The result of capacitor performance test

	Plastic substrate	Cr plating	Cr deposition (+crack)	Cr + Al deposition (+crack)
Detecting distance	5.16 mm	0 mm	5.0 ~ 5.3 mm	4.9 ~ 5.1 mm
Mis-detection Test	OK	NG	OK	OK

	#1	#2	#3
Test OK
Number Of Crack	222 ea	216 ea	208 ea
Test NG
Number Of Crack	160 ea	164 ea	169 ea

Fig. 8. The comparison of test OK and NG sample

감지 거리를 확보할 수 있었다. 이는 증착 크랙의 slit을 통해 전기장 투과가 이루어지는 것으로 판단되고, 오감지 평가에도 문제없음을 확인할 수 있었다 (표 1). 이 현상은 박막 내 금속의 자유전자 이동이 미세크랙에 의해서 차단되어 통전이 발생하지 않고, 그로 인해 전기장이 확대되지 않아 오감지가 발생하지 않은 것으로 판단된다. 그러나 일반적인 크롬도금의 경우, 전도성에 의해 전기장이 확대되어 원하지 않는 영역도 인지하게 되는 오감지가 발생하는 것으로 확인된다.

다음으로 실제 아웃도어핸들 부품의 감지성능 평가를 진행하였다. NFC Card를 활용하여 NFC 주파수 영역대의 감지거리를 측정하였고, 정전용량센서 안테나의 전기장 신호 변화 여부를 통해 정상적으로 작동하는지 확인하였다. 그 결과, NFC 감지거리는 여러 번 시행 결과, 기준거리 30 mm 이상을 모두 만족하였으며, 정전용량센서도 사람의 손이 근처에 접근 시, 전기장 레벨이 변하는 정상 수준임을 확인할 수 있었다. 실 사용조건에 맞게 스키 장갑을 끼고 평가하고, 기후환경을 모사하기 위해 도어핸들에 소금

물, 물 분사 후 손 접근 시에도 감지되는지 확인해 본 결과, 모든 조건에서 성능을 만족함을 확인할 수 있었다. 여러 가지 테스트 샘플 중 정전용량센서의 성능을 불만족한 샘플도 존재함에 따라 그에 대한 차이를 분석해보았다. 광학현미경을 활용하여 분석한 결과, 전과 투과할 수 있는 미세크랙 틈이 많을수록 전과 감지성능이 우수하다는 것을 확인하였다. 이러한 전과 감지성능 규제를 위해 크랙형상을 정량화 할 수 있는 방법이 필요한데, 증착막에 형성되는 크랙은 불규칙적인 형상을 가지고 있어 크랙과 크랙 간 거리를 정량화 시키기에는 어렵다. 이를 해결하기 위해 ISO 643국제표준을 참고하여, $150 \times 150 \mu\text{m}$ 단위면적 내 여러 개의 선과 접촉하는 교차점 개수로 규제치를 선정하였다. 이러한 방식은 다양한 선과 접촉하는 크랙을 규정함으로써, 불규칙한 크랙형상을 정량화 시키는게 가능하다. 이 기준으로 판별한 결과, 규격화된 여러 개의 선과 접촉하는 크랙의 개수가 200개 이상이 되었을 시에 감지성능을 만족함을 확인할 수 있었다 (그림 8). 또한 성능 불만족한 샘플의 경우, 크랙이 중간에 끊기는 구간이 많아 금

속의 자유전자가 이동할 수 있는 path가 생성된다. 이로 인해, 전도성을 띄지 않아야 하는 증착박막이 전도성을 갖게 되고, 정전용량센서의 감지성능을 저하되었다 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 전파 투과성능을 확보하기 위해 금속박막 내 미세 크랙이 NFC 및 정전용량센서 등의 전파 성능에 미치는 영향성에 대해 고찰하였다. 스퍼터링 증착 공정 변수별 박막의 잔류응력 평가 및 분석을 하였고, 아웃도어 핸들 제작공정에 따라 증착 크랙에 미치는 영향성을 확인하였다. 또한 개발된 기술이 적용된 아웃도어 핸들의 감지성능을 통해 아래와 같은 결과를 도출하였다.

스퍼터링 공정 변수 중 타겟파워, 증착 두께는 크랙을 형성시킬 수 있는 Cr의 잔류 인장응력 값과 밀접한 연관성을 나타내었고, 이는 박막의 성장 과정에서 결정립 간의 상호작용으로 발생한다.

아웃도어 제조공정 중 증착 전(前)공정인 프라이머 도장의 표면에너지는 증착막의 크랙 형상에 영향을 미치며, 증착 후(後)공정인 UV 하드코팅 경화 시 전단응력에 의해 크랙 형상에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 또한 증착막에 형성된 크랙에 의해 잔류 되어 있던 잔류 인장응력이 충분히 해소될 경우, 추가적인 열처리에 의한 크랙 형상변화는 없음을 확인하였다.

아웃도어 핸들 평가 결과, $150 \times 150 \mu\text{m}$ 단위면적 내 규정화된 선과 증착막 내 크랙이 접촉되는 개수가 200개 이상일 때 단위면적당 박막의 미세크랙 틈을 충분히 확보하여 감지성능을 만족할 수 있음을 확인하였다. 또한 증착막의 크랙이 끝까지 연결되지 않고 끊기는 구간이 많을 시, 전하의 이동이 가능해져 정전용량 센서용 전기장 형성이 원활하지 못함을 확인하였다. 본 연구에서는, 금속증착의 미세크랙을 활용하여, 전파 투과성능을 만족하면서 금속감을 구현할 수 있는 최적 조건을 확보하였고, 기존 사용중인 크롬 도금이 가지고 있는 전파 투과성능 문제점을 극복할 수 있었다.

REFERENCES

1. S. Eroglu and B. Gallois, *J. Phys. IV*, **3**, 155 (1993).
2. B. Cao Martin, C. J. Tracy, J. W. Mayer, and L. E. Hendrickson, *Thin Solid Films* **271**, 64 (1995).
3. S. M. Rossnagel and J. J. Cuomo, *Mrs Bull.* **12**, 12 (1988).
4. C. Metzner, B. Scheffel, J.-P. Heinss, and F. Rogner, *Proc. 46th Conf. on Society of Vacuum Coaters*, p.222, Fraunhofer, San Francisco (2003).
5. M. Laugier, *Vacuum* **31**, 155 (1981).
6. R. C. Cammarata, T. M. Trimble, and D. J. Srolovitz, *J. Mater. Res.* **15**, 2468 (2000).
7. R. W. Hoffman, *Thin Solid Films* **34**, 185 (1976).
8. L. B. Freund, *J. Appl. Phys.* **89**, 4866 (2001).
9. R. Abermann, *Vacuum* **41**, 1279 (1990).
10. J. A. Floro, E. Chason, R. C. Cammarata, and D. J. Srolovitz, *MRS. Bull.* **27**, 19 (2002).
11. A. Saedi and M. J. Rost, *Nat. Commun.* **7**, 10733 (2016).
12. E. Chason, B. W. Sheldon, R. C. Cammarata, and D. J. Srolovitz, *Phys. Rev. Lett.* **88**, 156103 (2002).
13. R. Koch, *Surf. Coat. Tech.* **204**, 1973 (2010).
14. J. S. Tello, A. F. Bower, E. Chason, and B. W. Sheldon, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 216104 (2007).
15. C.-W. Pao, S. M. Foiles, E. B. Webb, D. J. Srolovitz, and J. A. Floro, *Phys. Rev. Lett.* **99**, 036102 (2007).
16. A. G. Gonzalez, C. Polop, and E. Vasco, *Phys. Rev. Lett.* **110**, 056101 (2013).
17. H. Yu and C. V. Thompson, *Phys. Rev. Lett.* **104**, 141913 (2014).
18. J. Leib, R. Monig, and C. V. Thompson, *Phys. Rev. Lett.* **102**, 256101 (2009).
19. F. Guo, M. Martyniuk, D. Silva, Y. Liu, K. Brookshire, and L. Faraone, *Mater. Design.* **156**, 389 (2018).
20. C.-W. Kang and H. Huang, *Adv. Manuf.* **5**, 1 (2017).