



<연구논문>

ISSN 1225-8024(Print)
ISSN 2288-8403(Online)

한국표면공학회지
J. Kor. Inst. Surf. Eng.
Vol. 48, No. 6, 2015.

<http://dx.doi.org/10.5695/JKISE.2015.48.6.253>

Ni-Pd 합금 전해도금의 특성에 관한 연구

조은상, 정대곤, 조진기*

한국산업기술대학교 신소재공학과

A Study on Characteristics of the Ni-Pd Alloy Electroplating

Eun-Sang Cho, Dae-Gon Jung, Jin-Ki Cho*

Department of Advanced Materials Engineering, Korea Polytechnic University, Siheung 15073, Korea

(Received December 13, 2015 ; revised December 29, 2015 ; accepted December 30, 2015)

Abstract

The test equipment becomes more important with the development of semiconductor industry. MEMS probe is an important testing component to detect the defects from the generated electric signal when it contacts the metal pad of semiconductor devices. Ni-Pd alloy has been paid attention to as a candidate of MEMS probe material because of its high surface hardness and relatively low resistivity. In this study, electroplated Ni-Pd alloy has been prepared by using ethylene diamine as a complexing agent. Solid solution alloy coating could be formed when concentration of palladium chloride and current density were in the ranges of 1~5 mM and 0.2 ~ 1.5 A/dm², respectively. The increase of current density brought about an decrease in palladium content, which made both of lattice parameter and grain size smaller. As a result of grain refinement, high hardness could be obtained. However, surface cracking was observed due to residual stress when the current density was above 1.3 A/dm². When effects of heat treatment temperature on hardness and sheet resistance were investigated, the accompanied grain growth decreased both of them. The decrease of hardness remained stable at a temperature of 200°C. The sheet resistance was drastically reduced at 100°C. After that, it was found to become constant.

Keywords : Nickel-Palladium Alloy, Electroplating, Hardness, X-ray diffraction, Lattice parameter, Heat treatment, Sheet resistance

1. 서 론

반도체 산업은 최근 IT산업의 발전으로 인해 컴퓨터, 스마트폰, 자동차 등 다양한 산업에서 큰 수요를 얻고 있다. 반도체 산업이 발전하면서 반도체 소자의 정상 작동 여부를 검사할 수 있는 프로브 카드(Probe Card)가 중요하게 되었다. 프로브 카드는 반도체 소자의 완성 후, 절단 전에 반도체의 기능과 성능을 검사하기 위하여 사용되는 검사 장비의 핵심 부품으로서 금속재질의 프로브로 반도체

단자(Pad)에 접촉시켜 전기적 신호를 입력시키고, 그 결과에 따라 소자의 결함을 찾아내는 부품이다. 최근 반도체가 고집적화 되어감에 따라 입출력 단자의 개수 및 조밀도가 증가하고 있는 추세이며, 이러한 추세와 함께 반도체의 검사를 위한 프로브 카드의 패턴 및 프로브도 더욱 소형화, 집적화되고 있다. 수집에서 수백 마이크로미터 스케일의 프로브 패턴을 더욱 소형화, 집적화하기 위해서는 마이크로 스케일의 미세 패턴을 쉽게 구현할 수 있는 MEMS 기술을 이용한 프로브 카드 개발 및 연구가 활발히 이루어지고 있다¹⁻³⁾.

기존 프로브 소재인 Ni-Co는 우수한 탄성 특성을 갖지만, 낮은 경도로 인해 프로브 팁이 반복적으로 패드와 접촉하게 되면 내마모성이 저하되어, Probe

*Corresponding Author : Jin-Ki Cho

Department of Advanced Materials Engineering, Korea Polytechnic University
E-mail : chojk@kpu.ac.kr

의 내구성이 낮아진다. 이를 개선하기 위해 Probe 끝에 Rh을 도금하여 내마모성을 향상시킨 고성능 프로브 팁이 사용되고 있다. 하지만 Rh이 도금된 프로브의 우수한 내구성을 위해서는 충분한 Rh 도금 층이 확보되어야 한다. 그러나 Rh 도금은 높은 내부 응력으로 인해서 두께도금 시 크랙이 발생하는 문제점이 있다^{4,6)}. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 버티칼 형태의 MEMS 프로브 도금 물질로 Ni-Pd이 연구되고 있으며, 본 연구에서는 Ni-Pd 특성에 관한 연구를 진행하였다.

2. 실험 방법

에틸렌디아민을 착화제로 사용한 니켈-팔라듐 합금도금액의 조성과 도금조건을 표 1에 나타내었다. 전해도금에 사용된 전극은 불용성 전극인 Pt를 양극, 음극으로 구리시편(3×3 cm²)을 사용하였다. 팔라듐의 공급원으로서 염화팔라듐(PdCl₂)을 사용하였으며, 0.1M 에틸렌디아민 용액에 팔라딘-에틸렌디아민 착이온을 형성시켰다.⁷⁻⁸⁾ 이후 황산니켈(NiSO₄·7H₂O)을 첨가하고, 전도염으로 황산나트륨(Na₂SO₄·10H₂O)을 첨가하여 합금도금액을 제조하였다. pH는 7.5 ~ 8 사이를 유지하였고, KOH를 이용하여 조절하였다. 도금은 알칼리 전해탈지 및 30%로 희석된 황산(H₂SO₄)으로 산세를 거친 후 50°C에서 진행하였고, 전자식교반으로 300 rpm을 유지하였다.

얻어진 합금도금의 경도를 측정하기 위하여 모재인 구리시편의 영향을 받지 않도록 도금층을 20 μm 이상 형성시킨 후, 25 g/mm²의 하중으로 마이크로 비커스 경도계(MVK-H2, AKASHI Co.)를 사용하여 측정하였다. 경도는 시편의 9부분을 측정 한 후 최대값과 최소값을 뺀 평균값으로 산출하였다. 합금도금층의 결정립크기와 격자상수를 조사하기 위해서 X선회절장치(D/MAX-2200/PC, Rigaku Co.)를 사용하였다. 측정 조건은 Dewell time 20 min, 검출기 증가 속도는 3°/min, 그리고 Cu 타겟을 사용하였다. 도금층의 결정립 크기는 반가폭(Full Width Half Maximum)값을 이용하여 Scherrer식을 사용하여 니켈 (111)면의 피크에서 계산하였다. 격자상수

는 2θ 값이 높은 니켈 (220)면의 피크에서 계산하였다. 합금도금층의 함량 및 팔라듐 분포를 조사하기 위해서 FE-SEM (S-4700, HITACHI Co.)의 EDAX를 사용하였다.

합금도금의 내부응력을 측정하기 위하여 피막응력측정기(Model683, ST&DC Co.)를 사용하였으며, Strip Type으로 도금량과 Strip이 벌어진 거리를 측정하여 내부응력을 계산하였다. 테스트 Strip은 일정한 전류 밀도를 유지하기 위하여 음극과 양극이 일정한 거리에 놓이도록 배치하여 진행하였다. 그림 1은 사용된 Strip의 구조를 나타내었다. Test Strip은 각각 한쪽 면에 엇갈려 Resist로 코팅되어 있다. Strip을 도금 Bath의 중앙에 위치시키고 양쪽에 양극을 위치시켜 도금을 진행하였다. 그림 2는 Strip에 도금된 형태에 따라 응력형태를 나타낸 것이다. Strip의 안쪽으로 도금되면 도금층이 압축응력을 받는 것이고, Strip 바깥쪽으로 도금되면 인장응력으로 볼 수 있다. 도금공정을 통해 얻어진 합금도금을 열처리하였다. 열처리는 Furnace를 이용하여 진행하였고, Ar 95%, H₂ 5% 분위기에서 열처리를 진행하였다. 시편의 열처리 온도는 100 ~ 400°C범위에서 각각 100°C 단위로 실시하였으며, 10°C/min으로 승온하였으며, 최종온도에서 1시간동안 유지하였다. 이후 상온으로 냉각한 후 경도 및 면저항을 분석하였다. 4-Point Probe (CMT-SR1000N, Advanced Instrument Technology (AIT) Co., Korea)를 이용하여 면저항을 측정하였고, 시편의 9부분을 측정 한 후 최대값과 최소값을 뺀 평균값으로 산출하였다.

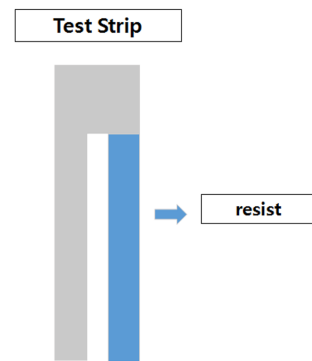


Fig. 1. Structure of the test strips.

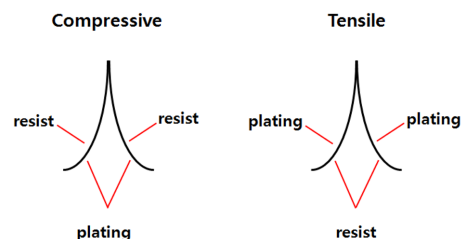


Fig. 2. Compression and tensile division method.

Table 1. Electroplating condition

Composition	Concentration
PdCl ₂	1 ~ 5 mM
NiSO ₄ ·7H ₂ O	0.05 M
Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	0.04 M
C ₂ H ₈ N ₂	0.1 M

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 Ni-Pd 합금도금의 함량 및 결정구조

그림 3에 전류밀도 0.2 ~ 1.5 A/dm²에서 염화팔라듐 3 mM을 사용하여 제작한 니켈-팔라듐합금 도금층의 X선회절패턴을 나타내었다.

X선회절분석 결과 전류밀도가 증가할수록 반가폭이 커지면서 그레인 사이즈가 작아지는 것을 예상할 수 있다. 실험 범위내의 다른 염화팔라듐 농도에서도 동일하였다. 또한 X선회절피크의 2θ 값이 니켈에서 팔라듐 쪽으로 Shift 되어있는 것이 확인되었다. 이는 니켈과 팔라듐이 동일한 결정구조인 면심입방(FCC) 구조를 갖고, 니켈-팔라듐 이원계 평형상태로부터 전 조성범위에서 단상의 고용체를 형성하기 때문에¹³⁾, 니켈과 팔라듐이 고용되었다고 판단되었다. 그림 4는 팔라듐과 니켈의 이원계 상태를 나타내었다¹⁴⁾.

본 실험에서 얻어진 니켈-팔라듐 합금 도금층은 (111)면과 (220)면에서 우선성장이 관찰되었다. 그리고 (220)면에서 Shift된 피크의 경우, 전류밀도가

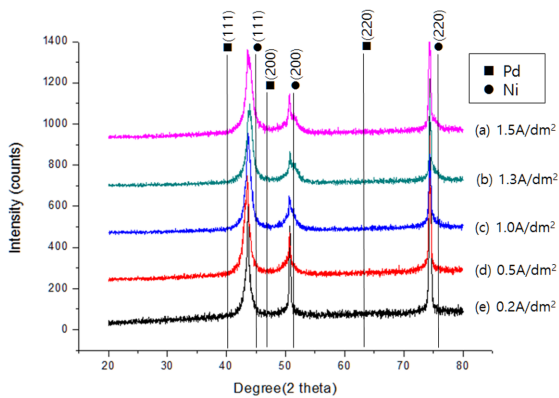


Fig. 3. X-ray diffraction patterns of Ni-Pd alloys deposited at various current densities (PdCl₂ 3 mM).

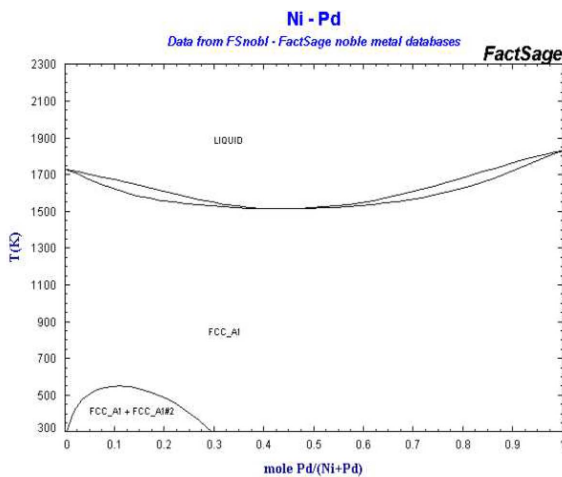


Fig. 4. Phase Diagram of Ni-Pd.

증가할수록 X선회절피크의 2θ 값이 74.301°에서 74.437°로 증가하면서 니켈(220)면 피크의 2θ 값에 가까워졌다. 이러한 이유는 전류밀도가 증가하면서 합금층 결정의 격자상수가 감소하였고, 또한 합금층에서 원자반경이 큰 팔라듐의 함량이 적어졌기 때문이다. 니켈-팔라듐합금 도금의 전류밀도에 따른 팔라듐 함량은 그림 5에 나타내었다.

전류밀도가 증가할수록 합금 도금내에 팔라듐 함량은 직선적으로 감소하였으며, 염화팔라듐 농도 3 mM 이상에서 감소 경향이 유사하게 나타났다. 본 실험 범위에서는 염화팔라듐 농도 1 mM에서 3 mM 영역에는 팔라듐 함량의 차이가 크게 증가하였고, 그 이상의 농도에서는 포화되어 팔라듐 함량 변화가 미미하였다. 고정선의 연구¹⁴⁾에 의하면 전류밀도가 증가될수록 수소발생으로 인해 pH가 증가하게 되고, 팔라듐의 함량이 감소하였다. 본 연구에서도 동일한 현상으로 사료되었다. 그림 6에 팔라듐 함량에 따른 결정립 크기와 격자상수를 나타내었다. 그림 7은 Vergard's law의 관점에서 외삽을 통해 격자상수를 표현하였다. X선회절분석 결과를 바탕으로 결정립 크기를 정량적으로 분석하기 위해서 아래의

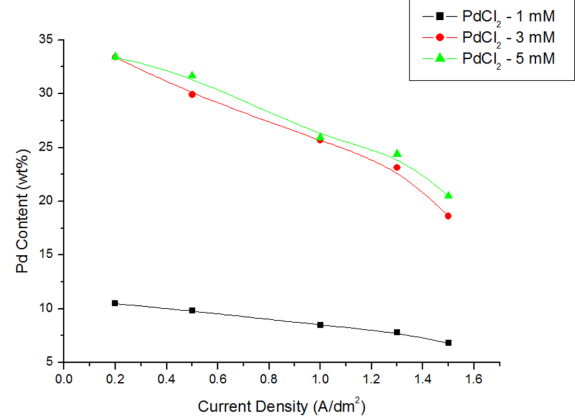


Fig. 5. Pd content according to the current density.

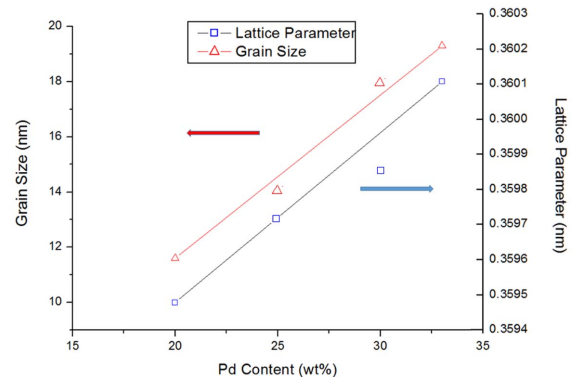


Fig. 6. Pd content-dependence of lattice parameter and grain size for Ni-Pd alloys.

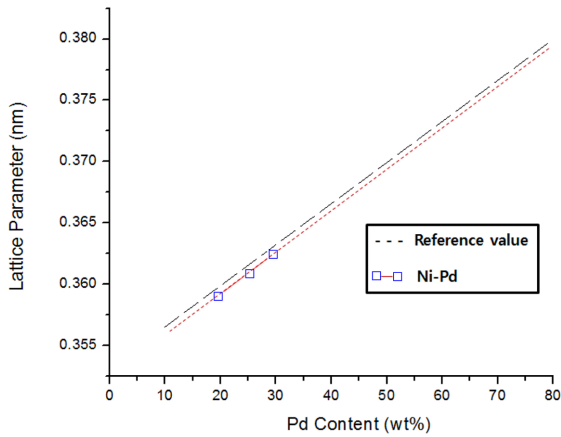


Fig. 7. Extrapolating from the point of view of Vegard's law.

Scherrer 식 (1)을 이용하여 결정립 크기를 계산하였다¹⁵⁾.

$$\tau = \frac{0.9\lambda}{B\cos\theta} \quad (1)$$

여기서 τ 는 결정립의 크기(Å)이며, λ 는 본 실험에서 사용한 Cu K α 선의 파장($\lambda=1.5406\text{\AA}$)이다. 그리고 B는 최대회절강도(I_{\max})의 반가폭(Full Width Half Maximum)이며, θ 는 I_{\max} 에서의 회절각을 나타낸다. 격자상수를 계산하기 위해 X선회절분석을 통해 Bragg's Law를 만족하는 면간거리 값은 식(2)로부터 계산하였다. 또한 이를 통하여 격자상수를 계산하였다¹⁵⁾.

$$d = \frac{\lambda}{2\sin\theta} = \frac{a}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}} \quad (2)$$

λ 는 본 실험에서 사용한 Cu K α 선의 파장($\lambda=1.5406\text{\AA}$)이고, d는 면간거리, θ 는 회절각을 나타낸다. a 는 격자상수, (hkl)은 회절피크의 밀러지수이다. 합금 도금내의 팔라듐함량이 증가할수록 격자상수는 증가하였으며, 결정립 크기 또한 증가하였다. 순수한 팔라듐과 니켈의 격자상수는 각각 0.38908 nm, 0.35350 nm로⁷⁾, 합금 도금내의 팔라듐함량이 증가할수록 니켈-팔라듐 고용체가 형성되면서 격자상수가 팔라듐 조성에 비례하여 직선적으로 증가된 것을 확인하였다. 또한 전류밀도가 증가할수록 팔라듐 함량은 낮아지고, 과전압이 증가할수록 도금층의 결정립이 미세화되는 것을 알 수 있었다.

그림 8은 EDS mapping으로 니켈-팔라듐 합금 도금내의 팔라듐 분포를 나타내었다. 실험범위 내의 염화팔라듐 농도에서 모두 합금 도금내의 팔라듐이 전체적으로 고르게 분포되어 있는 것을 알 수 있었다.

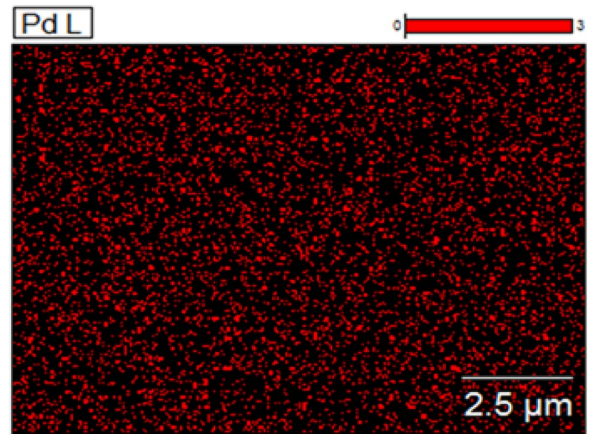


Fig. 8. Pd distribution by EDS mapping (PdCl₂ 3 mM, Current Density 1.3 A/dm²).

3.2 Ni-Pd 합금도금의 경도, 표면관찰 및 내부응력 측정

그림 9에 전류밀도에 따른 합금 도금층의 경도 변화를 나타내었다.

전류밀도가 증가할수록 합금 도금층의 경도는 증가하였고, 전류밀도 1.3 A/dm² 이후 감소하는 것을 확인하였다. 경도 증가원인으로 고용체강화와 결정립미세화를 생각해 볼 수 있으나, 전류밀도가 증가할수록 팔라듐 함량이 낮아지기 때문에 고용체강화보다는 결정립미세화에 의한 경도 증가라고 판단되었다. 전류밀도 1.1 ~ 1.3 A/dm² 이후 경도감소는 잔류응력으로 인한 크랙 발생으로 사료되었다. 본 연구에서 얻어진 니켈-팔라듐합금 도금층의 경도(275 ~ 400 Hv)는 에틸렌디아민을 착화제로 사용한 팔라듐-니켈합금 도금층의 경도(400 ~ 500 HV)⁷⁾, 암모니아를 착화제로 사용한 팔라듐-니켈합금 도금층

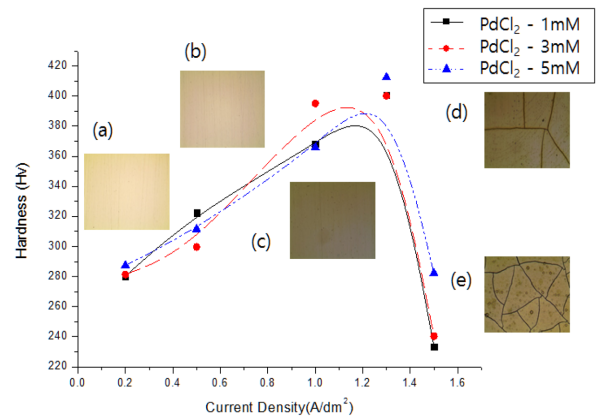


Fig. 9. Vickers hardness according to the current density. (a) Optical Microscope Image at 0.2 A/dm² (x50) (b) 0.5 A/dm² (x50) (c) 1.0 A/dm² (x50) (d) 1.3 A/dm² (x200) (e) 1.5 A/dm² (x100).

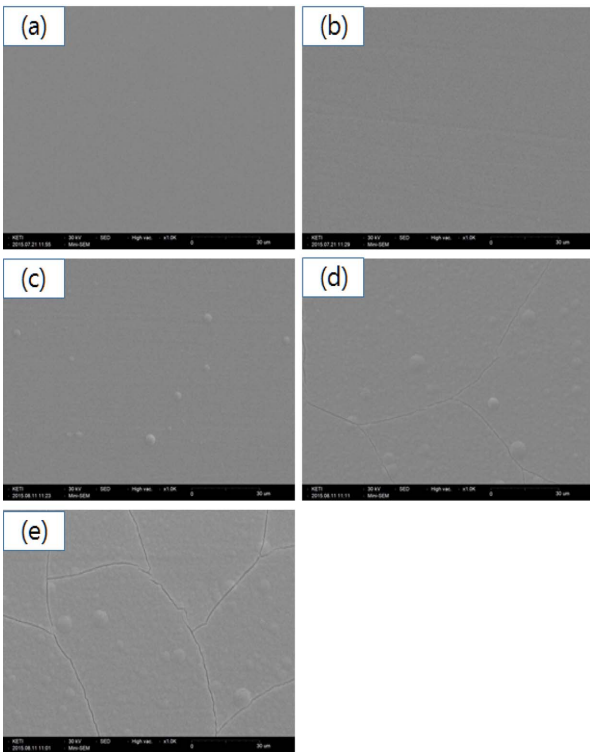


Fig. 10. SEM images of Ni-Pd alloys using PdCl₂ 3 mM. (x1,000) (a) Current Density 0.2 A/dm² (b) 0.5 A/dm² (c) 1.0 A/dm² (d) 1.3 A/dm² (e) 1.5 A/dm².

의 경도(400 ~ 530 Hv) 보다는 낮은 경도를 나타내는 것을 알 수 있다⁹⁻¹⁰⁾. 연구되었던 Pd-Ni 합금 도금층에 비해 경도 측면에서는 낮은 결과를 보였지만, Probe Tip 물질로 사용하기 위해서는 탄성률과 내마모 특성 또한 중요하기 때문에 추후에 복합적인 비교가 필요할 것으로 판단된다. 그리고 상용화를 위해서는 고 전류밀도에서 발생하는 크랙 문제를 해결해야 가능성이 있을 것으로 판단된다.

그림 10에 염화팔라듐 농도 3 mM, 전류밀도 0.2 ~ 1.5 A/dm²에서 도금한 니켈-팔라듐 도금층의 표면형상을 FE-SEM으로 관찰한 결과를 나타내었다. 전류밀도 0.2 ~ 1.0 A/dm² 영역에서 결함이 존재하지 않으며, 치밀한 도금표면을 얻을 수 있었고, 이 영역에서 도금표면은 광택을 나타내었다. 전류밀도 1.3 A/dm² 부근에서 합금 도금층 외각으로부터 크랙이 발생하기 시작하였고, 전류밀도 1.5 A/dm²에서는 전체적으로 크랙이 발생하였다. 다른 염화 팔라듐 농도에서도 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 팔라듐의 조성 변화 보다는 전류밀도 변화에 의해 발생하였다고 사료된다. 본 연구에서 얻어진 니켈-팔라듐 합금 도금층의 경우에는 전류밀도 1.0 A/dm² 이하에서 도금을 진행해야 결함이 없는 도금표면을 얻을 수 있었다.

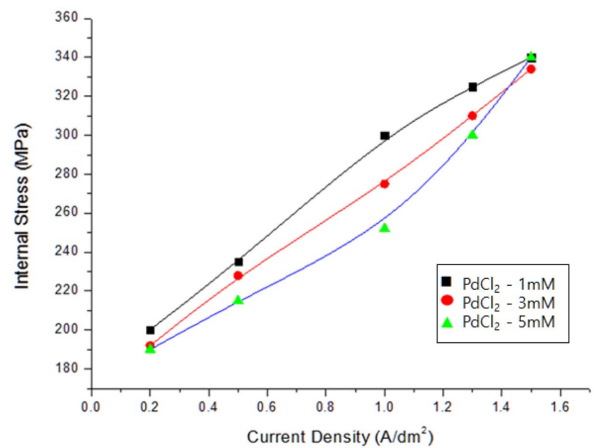


Fig. 11. Deposit Stress Analysis of Ni-Pd alloys.

그림 11은 니켈-팔라듐 합금 도금의 전류밀도에 따른 내부응력을 나타낸 것이다. 피막 응력을 계산하기 위해서는 중심선으로부터 각각의 Strip 다리가 벌어진 눈금 증가량의 합계와 피막 두께를 알아야 한다. 피막 두께는 다음과 같은 식 (3)으로 계산될 수 있다¹⁶⁾.

$$T = \frac{W}{D \times A} \times 0.0509 \tag{3}$$

여기서 T는 피막 두께(inch), W = 도금량(g), D = 도금된 금속의 밀도(g/cm³), A = Strip의 표면적(7.74 cm²)이다. 합금도금의 경우 밀도는 중량비로 계산한다. 계산된 피막 두께와 측정된 테스트 Strip의 벌어진 눈금 증가량의 합계로 피막응력은 다음과 같이 계산된다¹⁶⁾.

$$S = \frac{UKM}{3T} \times \frac{1}{145} (MPa) \tag{4}$$

식 (4)에서 S=피막응력, U= Strip의 벌어진 거리의 합, T=피막 두께(inch) 그리고 K는 ST&DC Co에서 제공된 Cu Test Strip의 보정상수 (0.3637), M은 ST&DC Co에서 제공된 도금물질과 Strip의 탄성률 차이에 대한 보정값(1.71)이다. 본 실험에서 얻어진 니켈-팔라듐 합금 도금은 전류밀도 0.2 ~ 1.5 A/dm² 영역에서 압축응력으로 측정되었으며, 전류밀도가 증가할수록 내부응력이 증가하는 것을 확인하였다. 전류밀도 1.3 A/dm² 이상에서 생긴 크랙이 압축응력으로 인해 발생하고, 이로 인해 경도가 감소한 것으로 사료되었다. 또한 높은 전류밀도에서 수소기체 발생으로 인한 수소취성도 생각해 볼 수 있다¹³⁾. 추후에 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

3.3 Ni-Pd 합금도금의 열처리 효과

Ni-Pd합금 도금층의 열처리 효과는 전류밀도 0.2 ~ 1.5 A/dm² 구간에서 가장 높은 경도 값을 나타낸 1.3 A/dm²에서 분석하였다. 그림 12은 전류밀도 1.3 A/dm²에서 염화팔라듐 농도에 따른 경도 및 열처리 시 경도변화를 나타내었다.

염화팔라듐 농도 변화에 따른 Ni-Pd합금 도금층의 경도변화는 ±10 Hv로 변화폭이 매우 좁았다. 고정선의 연구¹⁴⁾에 따르면 Pd-Ni (60 : 40)에서 Pd-Ni (80:20)까지의 경도 변화가 15.1 Hv로 변화폭이 작았다. 본 연구의 염화팔라듐 농도범위에서 팔라듐 함량에 따른 경도 변화가 적은 것을 알 수 있었고, 이로 인해 고용체 강화의 효과가 미미하다고 사료되었다. 또한 열처리 진행 시, 열처리 온도 100°C, 200°C에서 가장 큰 경도 감소를 보이고, 그 이후 온도에서는 경도가 소폭 감소하는 것을 확인하였다. 이를 통해 열처리 진행 시, 재결정 후에 결정립 성장이 200°C 근처에서 대부분 완료되었다고 판단하였다. 결정립의 크기 변화를 분석하기 위해서 X선 회절분석을 진행하였고, 아래 그림 13, 14는 열처리 온도에 따른 Ni-Pd합금 도금층의 X선회절패턴과 Scherrer 식을 이용해 산출한 결정립 크기를 나타낸 그림이다.

니켈-팔라듐은 이원계 평형상태도로부터 전 조성 범위에서 단상의 치환형 고용체를 형성하기 때문에 열처리 전과 같이 열처리 후에도 X선회절패턴에서 다른 상이 석출하지는 않았다. 그리고 니켈(111)면에서 열처리 전에 비해서 열처리 후가 반가폭이 좁아지는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 간접적으로 결정립 크기가 커졌음을 예상할 수 있었고, 이를 확인하기 위해서 그림 14에 결정립 크기를 산출하였다. 열처리 온도가 증가할수록 결정립 크기

는 커졌으며, 열처리 온도 200°C까지는 결정립이 급격하게 성장하는 것을 확인하였다. 열처리 온도 200°C 이후는 결정립 크기가 소폭 증가하였으며, 일정해질 것으로 예상된다. 이러한 결과를 토대로, 앞서 열처리 후 경도 변화를 결정립 성장에 의한 경도 감소로 판단하였다.

그림 15는 열처리에 따른 Ni-Pd합금 도금층의 면저항을 나타낸 것이다. 면저항의 경우 100°C에서 열처리 후 가장 큰 면저항 감소 경향을 나타내었다. 100°C 이상의 온도에서는 면저항이 일정하였다. 면저항의 감소 원인은 결정립이 성장하면서 결정립계가 줄어들고 이로 인해서 감소하였다고 판단하였다. 결정립 크기를 산출한 데이터를 통해서 열처리 온도 200°C까지 면저항이 급격히 감소할 것이라 예상하였으나, 열처리 온도 100°C에서 급격히 감소한 후 많은 변화가 없었다. 하지만 면저항의 감소와 결정립의 성장이 경향적으로 일치한다고 판단하였다.

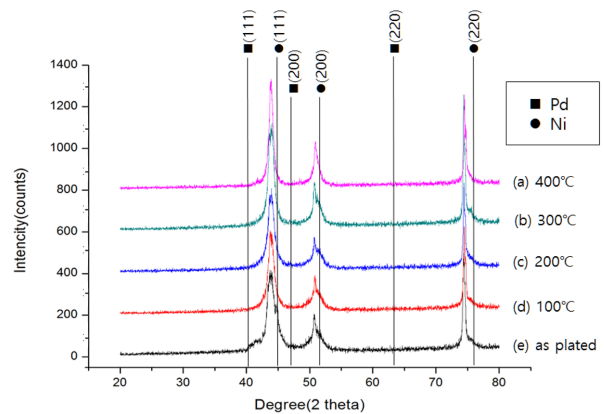


Fig. 13. X-ray diffraction patterns of Ni-Pd alloys at various heat treatment temperature (PdCl₂ 3 mM).

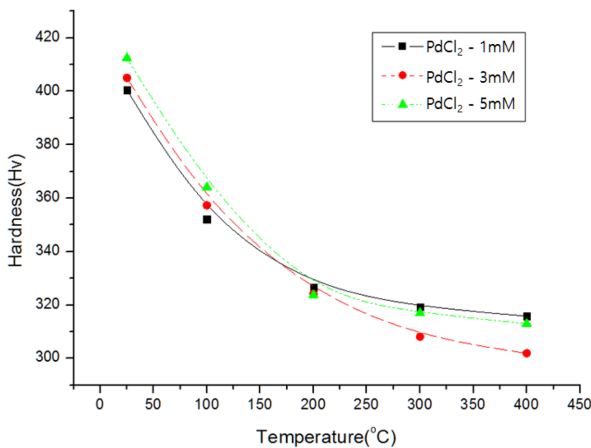


Fig. 12. Vickers hardness according to heat treatment temperature.

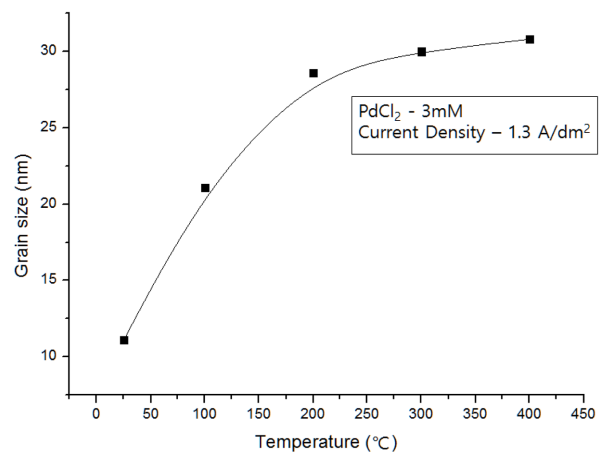


Fig. 14. Grain size for Ni-Pd alloys at various heat treatment temperature.

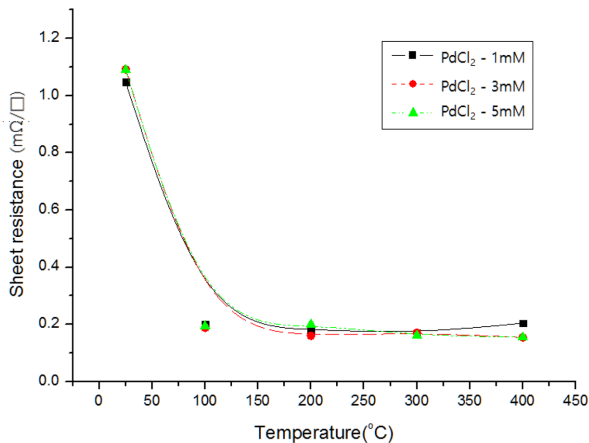


Fig. 15. Sheet resistance for Ni-Pd alloys at various heat treatment temperature.

4. 결 론

본 연구에서는 니켈-팔라듐 합금도금에 대하여 특성을 평가하였다. 합금도금액은 에틸렌디아민을 착화제로 사용하여 제조하였다. 전류밀도 0.2~1.5 A/dm² 영역에서 니켈-팔라듐 합금 도금층의 격자상수가 순수한 니켈과 팔라듐 사이의 값을 갖고, 고용체가 형성되었음을 확인하였다. 전류밀도가 증가할수록 합금도금의 팔라듐 함량은 감소하였고, 염화팔라듐 농도가 증가할수록 합금도금의 팔라듐함량이 증가되었다. 합금도금내의 팔라듐 함량이 증가할수록 결정립 크기와 격자 상수가 증가하였다. 또한 전류밀도가 증가할수록 합금 도금층의 경도는 증가하였고, 전류밀도 1.3 A/dm² 이후 감소하는 것을 확인하였다. Scherrer 식으로 결정립 크기를 계산한 결과 경도 증가 원인은 결정립미세화로 분석되었고, 전류밀도 1.3 A/dm² 이상에서 경도가 감소하는 것은 잔류응력으로 인한 크랙발생으로 사료되었다. 또한 수소 기체 발생의 영향도 배제할 수 없기 때문에 추후에 연구를 통해 정확한 원인을 판단해야 된다고 생각된다. 전류 밀도 0.2~1.0 A/dm² 영역에서 결함이 없고 치밀한 도금표면을 얻을 수 있었다. 열처리 진행 시, 재결정 후 결정립 성장이 200°C에서 대부분 완료되었다. 결정립이 성장함에 따라 합금

도금의 경도는 감소하였으며, 결정립 성장이 거의 완료된 200°C 이후에는 경도 값이 거의 일정해지는 것을 확인하였다. 결정립이 성장할수록 결정립계가 줄어들기 때문에 면저항 또한 감소하였고, 열처리 온도 100°C에서 급격히 감소 후 일정해지는 것을 확인하였다.

References

1. F. Wang, R. Cheng, X. Lin, J. Microelectromech. Syst. 18 (2009) 993.
2. B. H. Kim, J. B. Kim, J. H. Kim, IEEE Trans. Ind. Electron. 56 (2009) 1079.
3. B. H. Kim, B. J. Park, J. B. Kim, Sens. Actuators A 152 (2009) 252.
4. P. Kuban, J. M. Berg, P. K. Dasgupta, Anal. Chem. 76 (2004) 2561.
5. A. Broue, J. Dhennin, P. L. Charvet, F. Courtade, P. Heeb, P. Pons, R. Plana, Design Test Integration and Packaging of MEMS/MOEMS(DTIP), Seville (2010) 397.
6. H. Lee, R. A. Coutu, S. Mall, K. D. Leedy, J. Micromech. Microeng. 16 (2006) 557.
7. B. H. Choi, H. S. Sohn, K. T. Kim, I. J. Son, J. Kor. Inst. Surf. Eng, 47 (2014) 215.
8. K. Suresh Kumar, Prathap Haridoss, S.K. Seshadri, Surface & Coatings Tech, 202 (2008) 1764.
9. J. A. Abys, H. K. Straschil, I. Kadija, E. J. Kudrak, J. Blee, Met. Fin., 89 (1991) 43.
10. R. Dedoncker, J. Vanbumbecck, Trans. Inst. Met. Fin., 63 (1985) 59.
11. E. S. Cho, J. K. Cho, J. Kor. Inst. Surf. Eng Symposium (2015) 267.
12. D. G. Jung, J. K. Cho, J. Kor. Inst. Surf. Eng Symposium (2015) 326.
13. M. Schlesinger, M. Paunovic, Modern Electroplating 4th edition ; Wiley-Interscience, CANADA (2000) 531.
14. J. S. Koh, "Performance properties of Pd-Ni electro deposits with alloy composition", Inha University, (2014)
15. B. D. Cullity, S. R. Stock, Elements of X-Ray Diffraction 3rd edition, T. K. Koh(ed) JINSAEM ; (2006) 384.
16. B. Stein, AESF electroforming Symposium, (1996).