

## 전기도금법으로 제조한 Ni 박막의 전기비저항 및 솔더 반응성

이광용<sup>1</sup> · 원혜진<sup>1</sup> · 전성우<sup>1</sup> · 오택수<sup>1</sup> · 변지영<sup>2</sup> · 오태성<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>홍익대학교 신소재공학과

<sup>2</sup>한국과학기술연구원 금속공정연구센터

### Electrical Resistivity and Solder-Reaction Characteristics of Ni Films Fabricated by Electroplating

Kwang-Yong Lee<sup>1</sup>, Hye-Jin Won<sup>1</sup>, Sung-Woo Jun<sup>1</sup>, Teck-Su Oh<sup>1</sup>,  
Ji-Young Byun<sup>2</sup>, and Tae-Sung Oh<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Materials Science and Engineering, Hongik University, Seoul 121-791

<sup>2</sup>Center for Materials Processing, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 138-791

**초 록:** 도금전류밀도에 따른 Ni 박막의 결정립 크기, 전기비저항, 솔더 wetting angle 및 금속간화합물의 성장속도를 분석하였다. 도금전류밀도를 5 mA/cm<sup>2</sup>에서 40 mA/cm<sup>2</sup>로 증가시킴에 따라 Ni 박막의 표면 nodule의 크기가 감소하고 결정립이 미세화 되었으며, 전기비저항이 7.37 μΩ-cm에서 9.13 μΩ-cm로 증가하였다. 5 mA/cm<sup>2</sup> 및 10 mA/cm<sup>2</sup>에서 도금한 Ni 박막이 40 mA/cm<sup>2</sup>에서 형성한 Ni 박막에 비해 전기비저항이 낮고 dense 하며 계면 금속간화합물의 성장속도가 느리기 때문에 무연솔더의 UBM 용도로 더 적합할 것이다.

**Abstract:** Characteristics of electroplated Ni films such as grain size, resistivity, solder wetting angle, and growth rate of intermetallic compound were evaluated as a function of electroplating current density. With increasing the electroplating current density from 5 mA/cm<sup>2</sup> to 40 mA/cm<sup>2</sup>, the nodule size on the Ni film surface decreased, grain refinement occurred, and resistivity increased from 7.37 μΩ-cm to 9.13 μΩ-cm. Compared with Ni film processed at 40 mA/cm<sup>2</sup>, Ni films electroplated at 5 mA/cm<sup>2</sup> and 10 mA/cm<sup>2</sup> exhibited low resistivity, dense microstructure, and slow growth rate of intermetallic compound. Ni films electroplated at 5 mA/cm<sup>2</sup> and 10 mA/cm<sup>2</sup> are more suitable for Ni UBM application than that fabricated at 40 mA/cm<sup>2</sup>.

**Keywords:** Ni film, Electroplating, Electronic packaging, UBM, Electrical resistivity, Solder reaction

### 1. 서 론

Ni 도금은 색감이 우수하고 비교적 변색이 안되며 기계적 성질도 비교적 우수하기 때문에 이전부터 방식이나 장식의 목적으로 철강이나 구리 합금의 표면 코팅으로 사용되어 왔으며, 각종 금속 표면에 크롬도금을 하기 위한 하지도금 층으로 널리

사용되고 있다.<sup>1)</sup>

이와 더불어 최근에는 Ni 도금박막을 무연솔더의 플립칩 본딩을 위한 UBM (Under Bump Metallurgy) 층으로 사용하기 위한 연구가 진행되고 있다.<sup>2,3)</sup> 플립칩 본딩을 위한 Ni계 UBM으로는 무전해 도금공정으로 형성한 Ni(P)가 마스크 없이 원하는 금속표면에만 선택적으로 코팅이 가능하며

\*Corresponding author  
E-mail: ohts@hongik.ac.kr

저가격 공정이라는 장점으로 이제까지 주로 사용되어 왔다.<sup>2,4,6)</sup> 그러나 무전해 Ni(P)는 내부응력이 높고 솔더패드 가장자리에 형성된 passivation 층과 접착력이 좋지 않아 취성과 파괴가 용이하게 발생한다. 또한 솔더 반응에 의해 무전해 Ni(P) 층이 다고갈되기 전에도 솔더/Ni(P) 계면에 형성된 금속간화합물의 spalling이 발생하며, porous 하고 전기비저항이 높다는 단점이 있다.<sup>2,4)</sup> 이에 비해 전기도금공정으로 형성한 Ni 박막은 전기비저항이 낮고, 도금이 치밀하여 솔더 반응에 대한 확산장벽 층으로서의 특성이 우수하며 내부응력이 낮아 파괴가 잘 발생하지 않는 장점이 있다.<sup>2,3)</sup> 또한 Ni UBM의 전기도금공정은 Ni(P) UBM의 무전해도금 공정에 비해 훨씬 미세피치를 갖는 플립칩 구조에 적용이 가능하다는 커다란 장점을 갖고 있다.<sup>2)</sup>

또한 금속도금 층의 기계적 성질을 향상시키기 위해 주로 Ni이나 Co를 기지 내에 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiC 등과 같은 세라믹 입자들이 함유된 복합박막의 전기도금공정이 개발되고 있다.<sup>7-10)</sup> Ni 복합박막에 co-electrodeposition 할 수 있는 세라믹 입자 중에서 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 가격이 저렴하며 화학적 안정성이 우수하고 경도가 높고 고온 내마모성이 우수한 장점을 지니고 있어<sup>9)</sup> Ni 복합박막을 형성하기 위한 세라믹 입자로서 가장 적합한 재료 중의 하나이다.

본 연구에서는 플립칩 본딩용 Ni UBM 형성공정 및 Ni-세라믹 복합코팅의 제조공정을 개발하기 위한 기초연구로서 전기도금법을 이용하여 Ni 박막을 형성 후, 도금전류밀도에 따른 Ni 박막의 결정립 크기, 전기비저항, 솔더 wetting angle 및 솔더반응시 금속간화합물의 형성거동을 분석하였다.

## 2. 실험방법

Ni 도금박막을 형성하기 위한 기판으로는 Si 웨이퍼를 1 cm×2 cm 크기로 절단하여 사용하였다. Si 기판을 스퍼터 챔버 내의 기판 홀더에 장착하여 10<sup>-6</sup> torr 이하로 진공을 뽑은 후, 접착층인 Ti와 도금 씨앗층인 Cu를 각기 0.1 μm 및 0.3 μm 두께로 순차적으로 스퍼터 증착하였다. Ni 도금을 위한 전해액은 Watt 욕의 조성에 따라 증류수에 NiSO<sub>4</sub>·6H<sub>2</sub>O 260 g/L, NiCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 45 g/L, H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> 45 g/L, 사카린 0.5 g/L의 비율로 첨가하여 형성하

였다. 혼합된 도금액 250mL 내에 시편을 음극에 위치시키고 Ni 판을 양극에 위치시킨 후 40°C에서 200 rpm으로 교반하면서 Ni 도금을 실시하였다. 이때 DC power supply를 사용하여 도금전류밀도를 5 mA/cm<sup>2</sup>, 10 mA/cm<sup>2</sup>, 20 mA/cm<sup>2</sup>, 40 mA/cm<sup>2</sup>로 변화시켰으며, 각 도금전류밀도에서 형성한 Ni 박막의 두께가 20 μm가 되도록 도금시간을 조절하였다.

Ni 박막의 표면 및 단면 미세구조를 주사전자현미경 (Scanning Electron Microscopy: SEM)으로 관찰하였으며, 도금전류밀도에 따른 Ni 박막의 결정립 크기의 변화거동을 분석하기 위해 X-선 회절분석으로 Ni 도금막의 (200) 회절피크의 반각폭을 분석하였다. 도금전류밀도에 따른 Ni 박막의 전기비저항을 4 point probe법을 사용하여 측정하였다.

Ni 박막과 Sn-3.5Ag-0.5Cu 솔더간의 wetting angle을 측정하기 위해 250°C로 유지되고 있는 로진 플럭스 내에 담겨있는 Ni 박막 위에 Sn-3.5Ag-0.5Cu 솔더 비드를 떨어뜨리고 5분 및 10분 리플로우하였다. 이와 같이 리플로우한 시편들을 에폭시 마운팅 및 연마하고 주사전자현미경을 이용하여 Fig. 1과 같은 솔더 캡의 형상을 관찰하였으며, 이로부터 역탄젠트법을 이용하여  $\theta = 2 \times \tan^{-1}(h/r)$ 의 관계식으로부터 wetting angle  $\theta$ 를 구하였다. Fig. 1의 역탄젠트법에서 h와 r은 각기 솔더 캡이 이루는 현의 높이와 반경이다. 도금전류밀도에 따

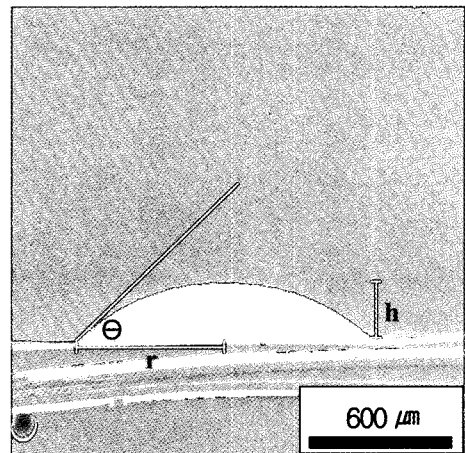


Fig. 1. SEM cross-sectional micrograph of Sn-3.5Ag-0.5Cu solder cap reflowed at 250°C for 5 minutes on Ni film electroplated at 5 mA/cm<sup>2</sup>.

른 Ni 박막의 솔더 반응성을 분석하기 위해 250°C로 유지되고 있는 로진 플럭스 내에 담겨있는 Ni 박막 위에 Sn-3.5Ag-0.5Cu 솔더 비드를 떨어뜨리고 60분간 리플로우 후, 연마 및 에칭하여 솔더/Ni 계면에 형성된 금속간화합물을 관찰하고 계면 금속간화합물의 성장속도를 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

각 도금전류밀도에서 형성한 Ni 박막의 표면을 관찰한 SEM 미세구조를 Fig. 2에 나타내었다. 도금전류밀도가 5 mA/cm<sup>2</sup>에서 40 mA/cm<sup>2</sup>으로 증가할수록 표면 nodule의 크기가 감소하는 것을 관찰할 수 있다. Ni 도금박막의 단면을 연마 및 에칭하여 결정립의 크기를 측정하고자 하였으나 결정립 크기를 측정할 수 있을 정도로 에칭이 잘 되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 Ni 박막의 (200) X-선 회절피크의 broadening을 측정하여 도금전류밀도에 따른 결정립 크기의 변화거동을 분석하였다.

Fig. 3에 도금전류밀도에 따른 Ni (200) X-선 회절피크를 나타내었다. 이들 Ni (200) X-선 회절피크들의 broadening을 이용하여 Scherrer formula<sup>11)</sup>로 구한 결정립 크기는 도금전류밀도가 5 mA/cm<sup>2</sup>에서 40 mA/cm<sup>2</sup>으로 증가함에 따라 27 nm에서 16

nm로 감소하였다. 그러나 이들 Scherrer formula를 이용하여 계산한 결정립 크기 27~16 nm를 Fig. 2에 나타난 표면 nodule의 크기와 비교시, 실제 결정립 크기보다 매우 작은 값을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 3에 있는 X-선 회절피크의 broadening으로 Scherrer formula를 이용하여 결정립 크기를 계산하기보다는 결정립 크기의 변화거동을 확인하였다.

Fig. 3과 같이 도금전류밀도의 증가에 따라 Ni (200) X-선 회절피크가 broadening 되었으며, 이로부터 도금전류밀도가 증가할수록 표면 nodule의 크기가 감소 (Fig. 2) 할 뿐만 아니라 Ni 박막의 결정립 크기가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 도금전류밀도에 따른 금속박막의 결정립 크기에 대해서는 도금전류밀도의 증가에 따라 결정립 크기가 증가하거나<sup>12)</sup>, 변함이 없거나<sup>13)</sup>, 감소하는<sup>14)</sup> 등 서로 다른 거동들이 보고되고 있다. 본 연구에서는 도금전류밀도의 증가에 따라 Ni 박막의 결정립 크기가 감소하였으며, 이는 핵생성-성장-충돌 이론으로 설명되어질 수 있다.<sup>14)</sup> 도금전류밀도가 증가할수록 음극에 부착되어 있는 기관 부근에 더 많은 Ni<sup>2+</sup> 이온이 위치하기 때문에 기관에 더 많은 핵생성이 발생하게 된다. 따라서 이들이 조금만 성장하여도 서로 충돌하여 성장이 억제되기 때문에 Ni 도금박막의 결정립 크기가 작아지게 된다.

도금전류밀도에 따른 Ni 박막의 전기비저항을

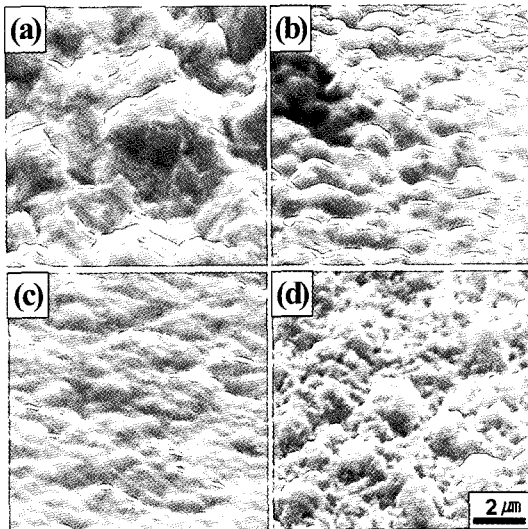


Fig. 2. SEM micrographs of surface morphology of Ni films electroplated at (a) 5 mA/cm<sup>2</sup>, (b) 10 mA/cm<sup>2</sup>, (c) 20 mA/cm<sup>2</sup>, and (d) 40 mA/cm<sup>2</sup>.

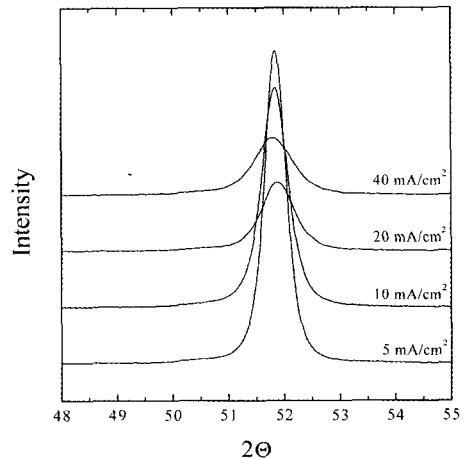


Fig. 3. Broadening of (200) diffraction peak of Ni films with increasing electroplating current density.

Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에 있는 전기비저항 값은 각 Ni 도금박막에 대해 4 point probe로 측정된 면저항 값에 박막 두께 20  $\mu\text{m}$ 를 곱하여 구한 값이다. 도금전류밀도가 5  $\text{mA}/\text{cm}^2$ 에서 40  $\text{mA}/\text{cm}^2$ 으로 증가함에 따라 전기비저항이 7.37  $\mu\Omega\text{-cm}$ 에서 9.13  $\mu\Omega\text{-cm}$ 로 증가하였으나, 이들 값들은 무전해 도금으로 형성한 Ni(P) 박막의 전기비저항 70  $\mu\Omega\text{-cm}$ 에 비해 매우 우수한 값들로 bulk Ni의 전기비저항 값에 근접하는 값들이다.<sup>15)</sup> 이와 같이 전기도금법으로 형성한 Ni 박막의 전기비저항이 무전해 Ni(P)에 비해 매우 낮은 이유는 주로 Ni 도금박막의 순도가 무전해 Ni(P)보다 더 높는데 기인한다고 보고되고 있다.<sup>2)</sup>

Fig. 4에 나타난 도금전류밀도의 증가에 따른 Ni 박막의 전기비저항 증가는 Ni 박막의 결정립 크기 감소와 더불어 박막의 기공률 증가에 기인한다. Fig. 3에 나타난 도금전류밀도에 따른 Ni (200) 회절피크의 반각폭 변화에서 알 수 있는 것과 같이 도금전류밀도가 증가함에 따라 Ni 박막의 결정립 크기가 감소하며, 이에 따라 결정립계에서의 전하산란이 증가하여 전기비저항이 증가하게 된다. 이와 더불어 높은 전류밀도에서 형성한 Ni 박막내 기공률의 증가<sup>13)</sup>도 전기비저항의 증가에 기여하는 것으로 판단된다. 20  $\text{mA}/\text{cm}^2$ 과 15  $\text{mA}/\text{cm}^2$ 의 전류밀도로 형성한 Cu 도금박막의 경우 전류밀도에 따른 결정립 크기의 차이를 나타내지는 않았으나,

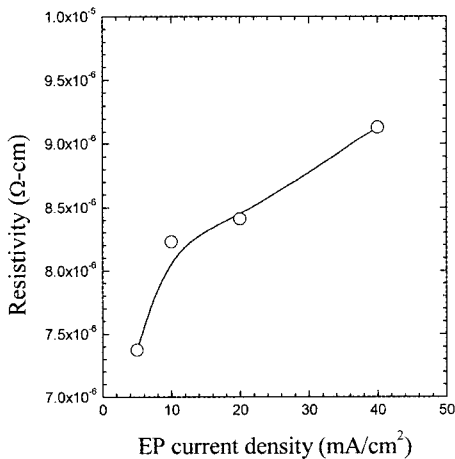


Fig. 4. Resistivity of Ni films a function of the electroplating current density.

20  $\text{mA}/\text{cm}^2$ 의 전류밀도로 형성한 Cu 도금박막이 15  $\text{mA}/\text{cm}^2$ 에서 형성한 도금박막에 비해 더 높은 전기비저항을 나타내었으며 이는 20  $\text{mA}/\text{cm}^2$ 에서 형성한 박막이 15  $\text{mA}/\text{cm}^2$ 에서 도금한 박막에 비해 더 porous 한 것에 기인한다고 보고되고 있다.<sup>13)</sup> 본 연구에서도 Sn-3.5Ag-0.5Cu/Ni 계면을 관찰한 SEM 미세구조 사진에서 5  $\text{mA}/\text{cm}^2$ 와 10  $\text{mA}/\text{cm}^2$ 에서 도금한 Ni 박막에 비해 20  $\text{mA}/\text{cm}^2$ 와 40  $\text{mA}/\text{cm}^2$ 에서 도금한 Ni 박막이 훨씬 더 porous 함을 확인할 수 있었다.(Fig. 6 참조)

Sn-3.5Ag-0.5Cu 솔더를 각 Ni 도금막 위에서 5분 및 10분간 리플로우 하여 형성된 Fig. 1과 같은 솔더 캡에 대해 역탄젠트법을 사용하여 솔더 wetting angle을 측정하였으며, 이 결과를 Fig. 5에 나타내었다. Ni 박막의 도금전류밀도가 증가할수록 솔더 wetting angle이 감소하는 경향을 나타내었으며, 이는 Fig. 2와 같이 도금전류밀도가 증가함에 따라 Ni 도금막 표면의 nodule 크기가 감소하는데 기인하는 것으로 판단된다. 금속박막의 표면 형상에 의해 표면의 면적과 에너지가 달라져 솔더 반응성에 영향을 미칠 수 있으며, 무전해도금법으로 형성한 Ni 박막에서 표면 nodule의 크기가 작아질수록 단위부피당 표면적이 증가하기 때문에 솔더 wetting force가 증가한다고 보고되고 있다.<sup>16)</sup>

Ni 박막 위에서 Sn-3.5Ag-0.5Cu 솔더를 250°C에서 60분간 리플로우 후 관찰한 솔더/Ni 계면에 형

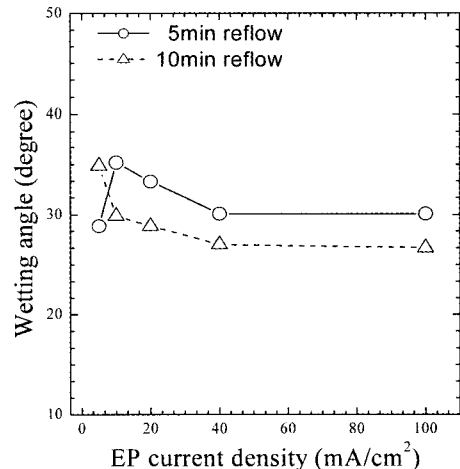


Fig. 5. Wetting angle of Sn-3.5Ag-0.5Cu a function of the electroplating current density of Ni films.

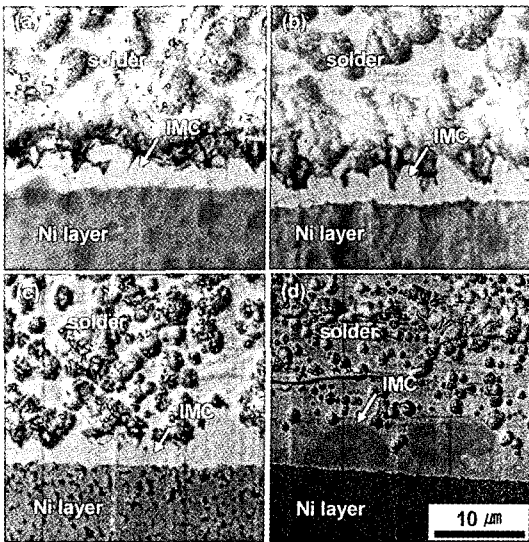


Fig. 6. SEM cross-sectional micrographs of intermetallic compounds formed by reflowing the Sn-3.5Ag-0.5Cu at 250°C for 60 minutes on Ni films electroplated at (a) 5 mA/cm<sup>2</sup>, (b) 10 mA/cm<sup>2</sup>, (c) 20 mA/cm<sup>2</sup>, and (d) 40 mA/cm<sup>2</sup>.

성된 금속간화합물의 주사전자현미경 미세구조를 Fig. 6에 나타내었다. 5 mA/cm<sup>2</sup>에서 40 mA/cm<sup>2</sup> 범위의 도금전류밀도의 변화에 무관하게 250°C에서 60분간의 리플로우에도 불구하고 금속간화합물이 계면에서 분리되거나 spalling 되지 않고 Ni 박막에 잘 부착되어 있어, 무전해 Ni(P)보다 무연솔더용 UBM으로서 훨씬 우수한 특성을 지닌다는 것을 알 수 있다. EDS 분석결과 Sn-3.5Ag-0.5Cu 솔더와 Ni 박막 계면에 형성된 금속간화합물은 Ni, Cu, Sn을 함유하고 있으며, 이로부터 Sn-3.5Ag-0.75Cu/Ni 및 Sn-3.8Ag-0.7Cu/Ni 계면에서 보고된 것<sup>2,3)</sup>과 마찬가지로 이 금속간화합물이 (Ni,Cu)<sub>3</sub>Sn<sub>4</sub>임을 알 수 있다. EDS 분석결과 (Ni,Cu)<sub>3</sub>Sn<sub>4</sub> 금속간화합물 내에서 Ag가 거의 검출되지 않았는데, 이는 Sn-Ag-Cu 솔더가 Ni UBM과 반응시 솔더/Ni 계면에는 (Ni,Cu)<sub>3</sub>Sn<sub>4</sub>가 형성되며 Ag는 솔더/(Ni,Cu)<sub>3</sub>Sn<sub>4</sub> 계면과 솔더 내부에 Ag<sub>3</sub>Sn 입자로 석출된다는 보고<sup>2)</sup>와 잘 일치한다.

250°C에서 60분간 리플로우시 Sn-3.5Ag-0.5Cu/Ni 계면에서 (Ni,Cu)<sub>3</sub>Sn<sub>4</sub> 금속간화합물의 성장속도를 Fig. 6에 있는 SEM 미세구조 사진을 이용하여 분석하였다. Fig. 6과 같이 (Ni,Cu)<sub>3</sub>Sn<sub>4</sub> 금속간화합물들이 scallop 형상을 이루고 있어 높이가 일

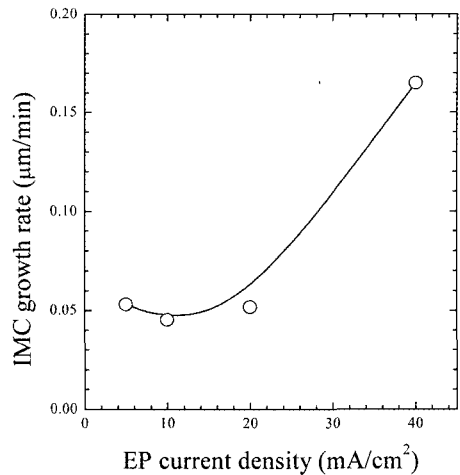


Fig. 7. Growth rate of the interfacial (Ni,Cu)<sub>3</sub>Sn<sub>4</sub> intermetallic compound as a function of the electroplating current density.

정하지 않기 때문에, 이들 미세구조 사진에서 금속간화합물의 면적을 구한 후 이를 (Ni,Cu)<sub>3</sub>Sn<sub>4</sub> 금속간화합물이 형성되어 있는 계면의 길이로 나누어 줌으로써 금속간화합물들의 평균 높이를 구하였다. Fig. 7에 Ni 박막의 도금전류밀도에 따른 (Ni,Cu)<sub>3</sub>Sn<sub>4</sub> 금속간화합물의 성장속도를 나타내었다. 도금전류밀도 5~20 mA/cm<sup>2</sup>에서 형성한 Ni 박막에서는 Sn-3.5Ag-0.5Cu와의 반응에 의한 (Ni,Cu)<sub>3</sub>Sn<sub>4</sub>의 성장속도가 거의 변하지 않았으나, 도금전류밀도 40 mA/cm<sup>2</sup>에서 형성한 Ni 박막에서는 (Ni,Cu)<sub>3</sub>Sn<sub>4</sub>의 성장속도가 크게 증가하였다.

무연솔더의 UBM용으로 사용하기 위한 금속박막에 요구되는 특성으로는 전기비저항이 낮아야 한다. 또한 솔더 wetting 특성은 우수하여야 하나, 리플로우시 너무 빨리 소모되어 계면 금속간화합물의 spalling이 일어나는 것을 방지하기 위해서는 금속간화합물의 성장속도가 너무 빠르지 않아야 한다. 따라서 5 mA/cm<sup>2</sup> 및 10 mA/cm<sup>2</sup>에서 도금한 Ni 박막이 40 mA/cm<sup>2</sup>에서 형성한 Ni 박막에 비해 전기비저항이 낮고 dense 하며 계면 금속간화합물의 성장속도가 느리기 때문에 무연솔더의 UBM 용도로 더 적합할 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

(1) 도금전류밀도를 5 mA/cm<sup>2</sup>에서 40 mA/cm<sup>2</sup>로

증가시킴에 따라 Ni 박막의 표면 nodule의 크기가 감소하였으며, 결정립 크기가 미세화 되었다.

(2) 전기도금법으로 형성한 Ni 박막의 전기비저항은 7.37~9.13  $\mu\Omega\text{-cm}$ 로 무전해 Ni(P) 박막의 전기비저항 70  $\mu\Omega\text{-cm}$ 에 비해 매우 낮은 값을 나타내었다. 도금전류밀도를 5 mA/cm<sup>2</sup>에서 40 mA/cm<sup>2</sup>으로 증가시킴에 따라 Ni 박막의 결정립 크기가 감소하며 미세구조가 더 porous 해지는데 기인하여 전기비저항이 7.37  $\mu\Omega\text{-cm}$ 에서 9.13  $\mu\Omega\text{-cm}$ 로 증가하였다.

(3) Ni 박막의 도금전류밀도가 증가할수록 Sn-3.5Ag-0.5Cu와의 wetting angle이 감소하는 경향을 나타내었으며, 이는 도금전류밀도 증가에 따른 Ni 박막 표면의 nodule 크기 감소에 기인하는 것으로 판단된다.

(4) Sn-3.5Ag-0.5Cu 솔더를 250°C에서 60분간 리플로우 후에도 Ni 박막의 도금전류밀도의 변화에 무관하게 솔더/Ni 계면에 형성된 금속간화합물이 분리되거나 spalling 되지 않고 잘 부착되어 있었다.

(5) 5 mA/cm<sup>2</sup> 및 10 mA/cm<sup>2</sup>에서 도금한 Ni 박막이 40 mA/cm<sup>2</sup>에서 형성한 Ni 박막에 비해 전기비저항이 낮고 dense 하며 계면 금속간화합물의 성장속도가 느리기 때문에 무연솔더의 UBM 용도로 더 적합할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학기술연구원(KIST)의 지원에 의해 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- H. T. Yeom and J. S. Kee, "Plating and surface treatment", Moonundang, Seoul 162 (1992).
- S. M. Chang, R. H. Uang, D. C. Liou, H. T. Hu, K. C. Chen, Y. F. Chen, and Y. H. Chen, "Investigation of electroplating Ni UBM for Pb-free solders", Proc. 2003 Electron. Comp. Technol. Conf. 1209-1214 (1992).
- S. K. Kang, D. Y. Shih, K. Fogel, P. Lauro, M. J. Yim, G. Advocate, M. Griffin, G. Goldsmith, D. W. Henderson, T. Gosselin, D. King, J. Konrad, A. Sarkhel, K. J. Puttlitz, "Interfacial reaction studies on lead(Pb)-free solder alloys", 2001 Electron. Comp. Technol. Conf. (2001).
- Y. C. Sohn and J. Yu, "Correlation between interfacial reaction and brittle fracture found in electroless Ni(P) metallization", J. Microelectron. Packag. Soc., 12, 41-46 (2005).
- J. W. Jang, D. R. Frear, T. Y. Lee, and K. N. Tu, "Morphology of interfacial reaction between lead-free solders and electroless Ni-P under bump metallization", J. Appl. Phys., 88, 6359 (2000).
- Y. C. Sohn, J. Yu, S. K. Kang, D. Y. Shih, and T. Y. Lee, "Spalling of intermetallic compounds during reaction between lead-free solders and electroless Ni-P metallization", J. Mater. Res., 19, 2428 (2004).
- M. Musiani, "Electrodeposition of composites: an expanding subject in electrochemical materials science", Electrochimica Acta, 45, 3397-3402 (2000).
- H. Ferkel, B. Muller, and W. Riehemann, "Electrodeposition of particle-strengthened nickel films", Mater. Sci. Eng., A234-235, 474-476 (1997).
- G. Wu, N. Li, D. Zhou, K. Mitsuo, "Electrodeposited Co-Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coatings", Surface and Coatings Technol., 176, 157-164 (2004).
- I. Shao, P. M. Vereecken, R. C. Cammarata, and P. C. Searson, "Kinetics of particle codeposition of nanocomposites", J. Electrochem. Soc., 149, C610-C614 (2002).
- B. D. Cullity, "Elements of X-ray diffraction", Addison-Wesley, 2nd Ed., Reading p102, (1978).
- G. Xiao, P. C. H. Chan, A. Tang, J. Cai, M. M. F. Yuen, "Study on failure mode of solder bump fabricated using eutectic solder electroplating process", Proc. Int. Symp. Electron. Mater. Packag. 18-26, (2000).
- C. T. Lin and K. L. Lin, "Effects of current density and deposition time on electrical resistivity of electroplated Cu layers", J. Mater. Sci.: Mater. Electron., 15, 757-762 (2004).
- Y. C. Zhou and J. A. Switzer, "Galvanostatic electrodeposition and microstructure of copper(I) oxide film", Mat. Res. Innovat., 2, 22-27 (1998).
- K. L. Lin and Y. C. Liu, "Manufacturing of Cu/electroless nickel/Sn-Pb flip chip solder bumps", Trans. Advanced Packag., 22, 575-579 (1999).
- Y. M. Chow, W. M. Lau, and Z. S. Karim, "Surface properties and solderability behaviour of nickel-phosphorous and nickel-boron deposited by electroless plating", Surf. Interface Anal., 31, 321-327 (2001).