

솔더 조인트 신뢰성 향상을 위한 무전해 니켈-도금의 표면형상 제어

이동준* · 최진원 · 조승현

삼성전기(주) 중앙연구소

Study on Surface Morphology Control of Electroless Ni-P for Reliability Improvement of Solder Joints

Dong-Jun Lee*, Jin-Won Choi and Seung-Hyun Cho

Corporate R&D institute, Samsung Electro-Mechanics Co., LTD., Suwon, 443-803

초 록: PDA, 핸드폰과 같은 포터블 제품의 사용이 급증함에 따른 전자 제품의 사용 환경의 변화는 제품의 솔더 조인트 신뢰성을 더욱 필요로 하게 되었다. 무전해 니켈/금 도금 표면 처리는 솔더링 특성이 우수하고, 표면처리 두께가 균일하며 패키징 공정에서 사용되는 광학설비에서 인식이 잘되기 때문에 미세피치 SMT 디바이스와 BGA 기판에 폭넓게 사용되고 있다. 그러나 무전해 니켈/금 도금 표면과 솔더 계면에서 발생하는 취성 파괴가 문제점으로 지적되고 있다. 솔더의 취성 파괴는 솔더링시 금속간 화합물과 무전해 니켈층 사이에 형성된 P-rich 영역의 갈바닉 니켈 부식에 의한 black pad 현상에 기인한다. 이론적으로 평탄한 무전해 Ni 표면은 무전해 금도금 과정 중 도금액의 균일하게 순환되기 때문에 black pad 발생을 억제하는 장점을 가지고 있다. 그러나 이러한 장점에도 불구하고 무전해 Ni 층의 표면형상을 어떻게 제어 할지에 대한 연구는 충분히 이루어 지지 않고 있다. 본 연구에서는 Cu 하지층의 표면 형상이 무전해 Ni층의 표면 형상에 미치는 영향에 대하여 분석하였다. 이를 위해 Cu 에칭액과 Cu 에칭 처리 횟수를 변화시켜 Cu 하지층의 표면 형상을 다양하게 변화시켰다.

Abstract: With increasing use of portable appliances such as PDA and cellular phone, changing environment of applications requires higher solder joint reliability. The ENIG (Electroless Nickel Immersion Gold) process has been widely used for fine pitch SMT (Surface Mount Technology) and BGA (Ball Grid Array) packaged devices due to its benefits including excellent solderability, high uniformity and substantial legibility throughout the packaging process. Its brittle fracture of solder, however, has received increasingly attentions. It was known that fracture brittleness is mainly related with black pad resulting from galvanic nickel corrosion and P-enriched layer formation between the IMC (Intermetallic Compounds) and electroless nickel layer. Theoretically, smooth electroless Ni layer was known to have a advantages in minimizing the black pad phenomenon by uniform solution exchange during immersion gold plating. Nevertheless, how to control the surface morphology of electroless Ni layer has been hardly known. This study investigates an effect of surface morphology of Cu underlayer on surface morphology of electroless Ni layer. To obtain various kinds of surface morphology of Cu layer, two types of Cu etching chemical and a number of Cu etching treatment were applied.

Keywords: ENIG, immersion gold, discoloration, solder joint, reliability

*Corresponding author

E-mail: moving.lee@samsung.com

1. 서 론

무전해 니켈/금 도금은 (ENIG: Electroless Nickel Immersion Gold) 솔더링 특성이 우수하며 균일한 표면을 형성시킬 수 있기 때문에 고밀도 SMT (Surface Mount Technology)와 BGA (Ball Grid Array), FC BGA (Flip Chip Ball Grid Array) 패키지의 핵심 표면 처리 방법으로 자리매김 하고 있다. 특히 무전해 니켈/금 도금 방법은 전해도금법과는 달리 기판 제작시 전기도금을 위한 배선을 형성시킬 필요가 없어 고밀도 회로 기판 제작이 가능하기 때문에 고성능 디바이스 패키지의 표면처리 방법으로 적용 범위가 점차 확대 되고 있다. 그러나 이러한 장점에도 불구하고 무전해 니켈층과 솔더 간에 흔히 발생하는 취성 파괴로 인하여 Cu OSP (Organic Solderability Preservatives), Immersion Sn 등의 표면 처리 방법이 무전해 니켈/금 도금 공정을 대체하여 개발 되고 있으며 이와는 별도로 솔더링 후의 무전해 니켈층과 솔더 사이의 취성의 원인 규명을 통한 무전해 니켈/금 도금층의 솔더접합 신뢰성을 향상시키는 연구가 활발히 진행되고 있다¹⁻¹⁰⁾. 무전해 니켈 층과 솔더간의 취성파괴에 관련해서는 이미 많은 보고가 있었으며 특히 무전해 니켈층 내의 인 함량과 관련하여 많은 논의가 있었다. 무전해 니켈 계면과 솔더 계면은 솔더링 후 주석과 니켈의 금속간 화합물(대개의 경우 Ni_3Sn_4)이 형성되고 동시에 무전해 니켈층과 금속간 화합물의 계면 사이에는 얇은 고인층(高鱗層)이 형성되며 외부 충격시 이면을 따라서 파괴가 이루어지는 것을 쉽게 관찰할 수 있다. 이러한 고인층과 취성파괴와의 관련성을 근거로 인(磷)함량에 따른 솔더 접합신뢰성이 많이 논의되고 있으나 이와 관련해서는 아직까지도 논란이 존재하고 있는 것이 사실이다^{4,6-10)}. 그렇지만 immersion 금도금 공정 중 발생하는 갈바니 부식 반응에 의한 무전해 니켈층이 부식되는, 이른바 'Black Pad' 현상으로 알려진 그림 1(a)와 같이 무전해 니켈층의 nodule 경계를 따라 부식되어 검게 보이는 현상과 솔더 접합신뢰성과의 관련성은 널리 관찰되고 있는 사실이다¹⁻⁶⁾.

무전해 니켈 도금 후 immersion 금도금 공정에서 시안화금 이온 ($Au(CN)_2^-$)은 그림 1(b)와 같이 금속 니켈의 전자를 취하여 전기화학적으로 귀

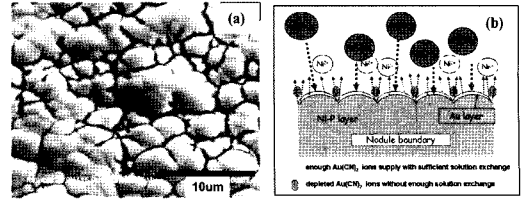


Fig 1. (a) SEM image of black pad (b) Schematic illustration of 'black pad' mechanism.

(noble)한 금으로 석출되며 전자를 빼앗긴 니켈은 니켈이온으로 용출되게 된다. 이러한 무전해 니켈층과 시안화금 이온과의 치환반응으로 인하여 니켈부식반응이 일어나게 되는데 특히 무전해 니켈층의 표면의 nodule 경계에서는 이러한 니켈부식이 심하게 발생하는 것을 관찰되어 왔다. 이러한 원인에 대하여 이론적으로 nodule 경계에서는 immersion 금도금 도중 용액의 공급 등이 원활하지 않아서 국부적으로 시안화금 이온의 농도가 낮아져서 nodule 중앙부와 용액과 농도차이가 발생하고 일종의 갈바니셀이 금도금 도중 형성되어 nodule 경계부위에서의 니켈 부식을 가속화시키게 되는 것으로 여겨지고 있다⁵⁾. 따라서 nodule의 크기와 형상은 금도금의 품질을 결정짓는 주요 인자 중 하나로 인식되어 왔으며 고인(高鱗)을 함유하는 무전해 니켈 층의 강점을 주장하는 그룹에서는 주요한 근거로써 고인의 무전해 니켈 층의 우수한 평활성과 내식성을 내세우고 있다⁴⁾.

본 연구는 이러한 무전해 니켈 층의 표면 형상에 미치는 인자를 파악하는 데 주목적을 두었다. 특히 nodule 구조의 형상과 Cu 하지층의 표면형상과의 관계를 연구하였다. 이를 위해서 무전해 니켈 금도금의 전처리 공정인 구리 에칭 단계에서 에칭용액과 처리방법을 변화시켜 Cu 하지층의 표면 형상을 변화시켰으며 이에 따른 무전해 니켈 표면 형상의 변화를 관찰하였다.

2. 실험 방법

본 실험에서는 SMD (Solder Mask Defined) 형태의 기판이 사용되었다. 테스트 기판은 그림 2와 같이 전해 Cu로 테스트 패턴을 형성하고 이를 PSR (Photo Solder Resist)로 도포 후 솔더볼이 실장 될 부분을 선택적으로 현상하여 I/O (Input/Output) 단

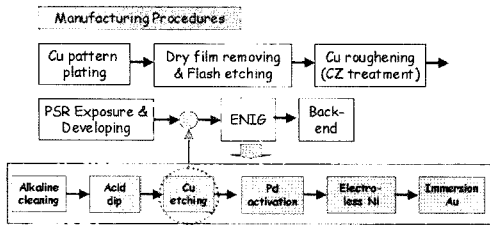


Fig 2. Schematic manufacturing flow of test board and ENIG (Electroless Nickel Immersion Gold) process.

자를 형성하였다. PSR을 도포 전 PSR과 전해 Cu와의 접착력을 향상시키기 위해 CZ 처리를 하였다. 또한 다양한 Cu 표면 형상에 따른 무전해 니켈층의 표면 형상의 변화를 관찰하기 위해 무전해 니켈 금도금 전에 Cu를 에칭하였다. 이를 위해 과수 (H₂O₂)와 황산 (H₂SO₄), 안정제로 구성된 일명 S/E (Soft Etching) 용액과 포름산과 CuCl₂로 구성된 CZ (Chemical Zet, MAC 사) 용액을 사용하였다. Cu 표면은 S/E와 CZ 용액을 사용하여 각각 3.0 ± 0.2와 1.0 ± 0.2 μm회의 에칭 속도로 표 1과 같이 처리 횟수를 변화하며 에칭하였다. Cu 표면 형태에 따른 무전해 니켈 층의 성장 거동을 분석하기 위해 5초간 무전해 니켈을 도금 후 표면 형상을 분석하였으며 이후 8 μm의 무전해 니켈 층을 도금 후 표면의 nodule과 crevice의 형태를 관찰하였다. 무전해 니켈 도금층은 도금층 내에 함유되는 인함량에 따라 저인(低磷)형, 중인(中磷)형, 고인(高磷)형으로 나뉘는데 여기서는 약 6wt%의 인을 함유하는 중인형 무전해 니켈 도금층이다. Cu와 무전해 니켈 층의 표면조도 Ra는 Veeco Instrument사의 Wyko SP3200으로 측정하였으며 Cu와 무전해 니켈 층의 표면 형상은 SEM(Scanning Electron Microscopy)과 광학 현미경으로 관찰하였다.

3. 실험 결과

3.1. 무전해 니켈금 도금 전처리에 따른 Cu 표면 형상의 변화

본 실험 결과를 고찰하기에 앞서 간략히 무전해 니켈금도금 전처리 과정의 표면조도의 변화를 살펴보았다. 무전해 니켈과 immersion 금도금 전 그림 2와 같이 알카리세정, 산세정, Cu 에칭, Pd 활성화 등의 전처리 공정을 거치게 된다. 여기서 알카

리 세정은 주로 유기오염을 제거하기 위한 목적으로 진행되며 산세정은 Cu 하지층 표면의 산화막과 표면장력을 감소시키고 퍼짐성을 증가시켜 이후 도금액의 침투성을 향상시킨다. 또한 Cu 에칭은 약 2~5 μm 두께의 Cu를 제거함으로써 균일하고 fresh한 Cu 층을 얻고자 이용되며, Pd 활성화에서는 Pd 이온을 Cu 하지층과의 치환반응을 통하여 매우 얇은 Pd 층을 Cu 하지층 표면에 형성시킴으로써 무전해 니켈도금이 가능하도록 표면을 활성화한다. 이러한 각 공정 후의 표면변화를 살펴보면 그림 4와 같다.

그림 3(a)에서와 같이 무전해 니켈 금도금 전 Cu 하지층의 표면은 매우 거친 조도를 갖는다. 이는 전해 도금으로 형성시킨 Cu 표면은 매우 평탄하기 때문에 유기 성분인 PSR이나 유전체를 도포할

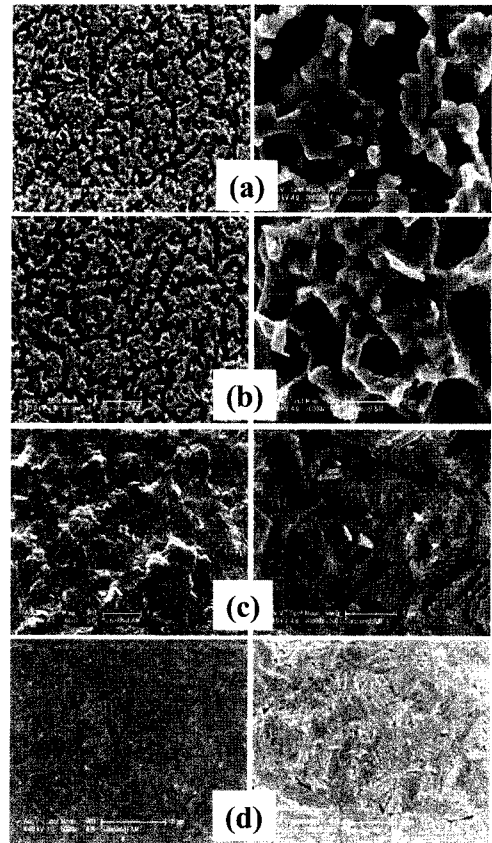


Fig. 3. Surface morphology changes during ENIG pretreatment processing. (a) SEM image prior to ENIG (b) SEM image after acid dip (c) SEM image after Cu etching (S/E) (d) SEM image after Pd activation

경우 충분한 접착 강도를 얻을 수 없어 Cu 표면을 CZ 처리하여 조도를 형성시켰기 때문이다. CZ 처리의 경우 에칭 속도는 soft 에칭에 비해 느리지만 그림 3(a)와 같이 표면 조도 Ra가 0.5~0.6 μm로 매우 거친 표면을 형성한다. 이렇게 CZ 처리된 Cu 하지층이 무전해 니켈도금 공정 직전의 기본적인 형상이 된다. 그림 3(b)와 같이 거친 표면을 갖는 Cu 하지층은 산세 후 표면구조에 큰 변화가 없다. 다만 0.1 μm 크기의 사각형 형상으로 얇게 표면이 에칭된 것이 판단되는데 이는 금속 Cu가 에칭된 것이라기 보다는 보관 혹은 알카리 산세 등을 거치면서 표면에 얇게 형성된 Cu 산화막층이 산세공정인 황산에 의해 제거된 것이라고 여겨지며 그림 4의 Pourbaix 그림으로부터 알 수 있듯이 금속 Cu는 비교적 귀한 금속 이므로 황산에 의하여 크게 에칭 되지는 않는 것으로 사료된다.

일반적으로 Cu 에칭 또는 S/E에 사용되는 에칭액은 황산에 강력한 산화제로 과수 혹은 persulfate, oxone 등을 포함하는 경우가 대부분이다. Soft 에칭 용액의 경우 에칭 속도가 빠르며 산화제 등에 따라 약간씩 차이가 나지만 에칭 후 표면조도 Ra 값이 대략 0.3 μm 내외의 평탄한 표면조도를 갖는다. 위의 그림 3(c)에서 알 수 있듯이 결정면들과 결정계면 사이로 step 등이 표면에 노출되어 있는 형상을 갖는다. Pd 활성단계에서는 Pd 흡착 및 치

환과정을 거치면서 Cu가 전자를 잃고 에칭이 되면서 그림 3(d)와 같이 금속 Pd층이 형성되나 그 양이 매우 작아 기본적인 표면구조는 구리에칭 공정에서의 구리 에칭 후의 표면구조를 따르는 것으로 사료된다. 따라서 표면사진 변화로부터 무전해 니켈도금 전처리 공정 중에서 Cu 하지층의 표면구조에 큰 영향을 미치는 공정은 Cu 에칭 공정이라고 할 수 있다.

3.2. Cu 표면 형상의 변화에 따른 무전해 니켈 도금층의 형상 변화

Cu 하지층의 표면 형상 변화에 따른 무전해 니켈 도금층의 표면형상을 고찰하기 위하여 표 1과 같이 Cu 에칭 용액과 횟수에 변화를 주면서 표면형상을 변화시켰다. 황산에 강한 산화제를 포함하는 기존의 S/E 액은 에칭 횟수 등의 변화를 주어도 큰 표면형상의 변화가 없기 때문에 앞에 언급한 CZ 처리를 이용하여 기존의 S/E에 의한 표면형상과는 다른 에칭액에 의하여 표면형상을 크게 변화시켰다. 그림 5에서의 (a), (b), (c)는 S/E을 하지 않은 상태에서 CZ 처리를 각각 3회, 2회, 0회 처리한 Cu 표면 형태를 나타낸다. 그림 5(c)는 S/E과 CZ 처리를 하지 않았으나 PSR 도포 전 PSR과

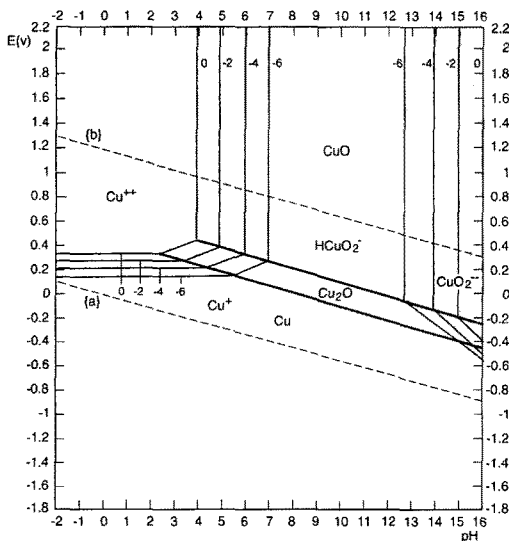


Fig. 4. Pourbaix diagram for Cu.

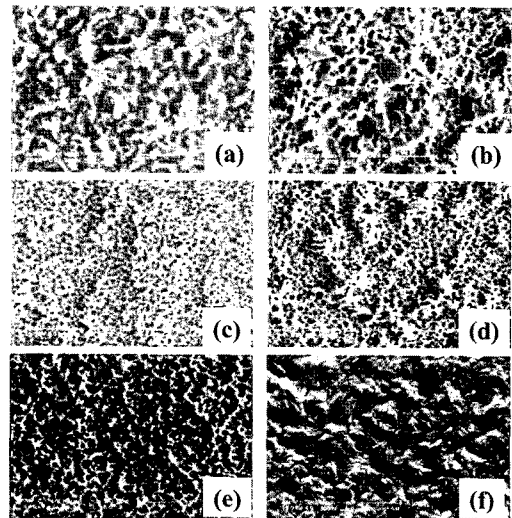


Fig 5. SEM surface morphologies prepared under the Cu etching conditions as shown in Table 1. (a) 3x CZ, (b) 2x CZ, (c) no treatment, (d) 1x S/E and 1x CZ, (e) 2x S/E and 2x CZ, and (f) 2x S/E

의 접착강도를 증가시키기 위해 CZ 처리를 하였고 때문에 그림에서와 같이 전형적인 CZ처리 표면 조직을 나타내었다. 반면 CZ 처리를 추가로 2회, 3회 진행한 그림 5(a)와 (b)의 경우 CZ 처리 횟수가 증가함에 따라 간격이 조밀하고 낮은 골을 갖는 벌집형태의 구조에서 점차 간격이 넓고 깊은 골을 갖는 벌집형태의 구조를 변화함을 관찰할 수 있었다. 반면 S/E 1회 후 CZ를 추가로 1회 처리한 그림 5(d)의 경우 PSR 전처리로 CZ가 기존에 1회 처리된 그림 5(c)경우와 비슷한 형상인 간격이 조밀하고 낮은 골을 갖는 벌집 구조를 얻을 수 있었다. 이는 CZ전 S/E에 의해 기존 CZ 조직을 제거한 후 다시 CZ 조직으로 변화됨에 따른 현상이라 판단된다. 또한 그림 5(e)와 같이 S/E 후 CZ를 각각 2회씩 진행한 Cu 조직의 경우는 그림 5(d)에서와 같은 soft 에칭 후 관찰되었던 구조는 관찰할 수 없었으며 실제로 CZ를 1회 처리한 조직인 그림 5(c)보다 간격이 넓고 깊은 골을 갖는 표면구조를 나타내었다.

S/E을 2회 진행하고 CZ를 처리하지 않은 그림 5(f)의 경우 표면조도가 작은 평활한 그리고 비교적 조대한 다각형 형상의 전형적인 S/E 표면 구조를 나타내었다. 간략히 위의 Cu 에칭 조건에 따라서 그림 5 (a), (b), (e)와 같이 간격이 넓고 깊은 골의 벌집구조를 갖는 표면조직, 그림 5(c), (d)와 같이 간격이 조밀하고 얇은 골을 갖는 벌집구조 조직, 그림 5(f)와 같이 간격이 조대하고 얇은 골을 갖는 다각형 조직으로 크게 3가지 그룹으로 분류할 수 있다.

3.3. 무전해 니켈 도금 후 표면 형상의 변화

표 1의 조건으로 처리한 Cu 하지층에 중인(中隣)

Table 1. Cu etching conditions.

| Condition | S/E (First) | CZ Treatment (Second) |
|-----------|-------------|-----------------------|
| (a) | - | 3 |
| (b) | - | 2 |
| (c) | - | - |
| (d) | 1 | 1 |
| (e) | 2 | 2 |
| (f) | 2 | - |

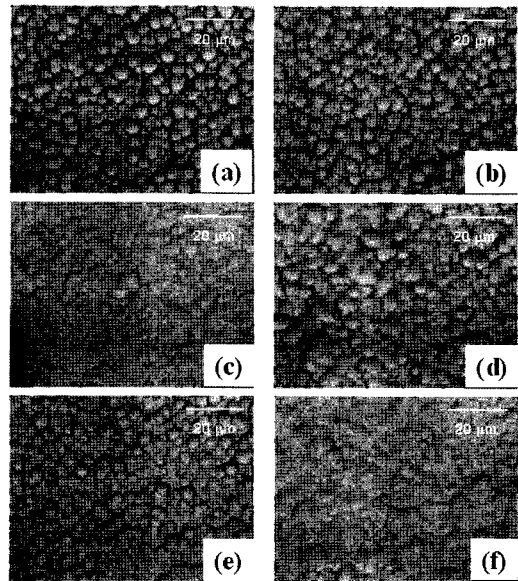


Fig. 6. SEM images of initial stages (after 5 sec of dwell time in electroless Ni bath) of electroless Ni-P growth on different surface morphologies of Cu underlayer prepared under the Cu etching condition in accordance to table 1.(a) 3× CZ, (b) 2× CZ, (c) no treatment, (d) 1× S/E and 1× CZ, (e) 2× S/E and 2× CZ, and (f) 2× S/E.

형의 무전해 니켈 도금하였으며 Cu 도금층의 표면 형태에 따른 무전해 니켈의 도금 특성을 관찰하기 위하여 무전해 니켈을 5초 진행 후 표면의 형상을 SEM으로 관찰하였다. 그림 7과 같이 무전해 니켈의 성장 경향은 Cu 하지층의 형상에 크게 의존하여 변화됨을 관찰할 수 있었다. CZ 처리를 2회 이상 처리하여 조대하고 깊은 골을 갖는 Cu 하지층의 경우 그림 6 (a), (b), (e)과 같이 마치 니켈이 Cu 표면에 수직방향으로 성장하는 것처럼 보이는 반면, 간격이 넓고 얇은 골과 조밀하고 얇은 골 구조의 Cu의 경우 그림 6 (c), (d), (f)와 같이 Cu 하지층에 수평으로 니켈이 성장한 것 같은 형상을 나타내었다. 35분간 도금하여 8 μm 두께의 무전해 니켈을 형성하여 그 표면 형상을 그림 7에 나타내었다. Cu 하지층에 무전해 니켈이 수직으로 성장을 시작했던 그림 7 (a), (b), (e)의 경우에는 그림 8 (a), (b), (e)와 같이 깊은 crevice가 구형의 nodule의 경계면을 따라 형성되었으며 그 크기는 그림 7의 표면 조도에 비례하여 성장하였다. 반면 표면조도가 낮은 Cu 하지층에서 성장한 그림 7 (c), (d), (f)의 경우 매우 평탄한 표면 구조를 나타내었으며 nodule 구조가 잘 형성되지

않음을 알 수 있었다. 그림 8에 Wkyko로 분석한 무전해 니켈 층의 표면조도 Ra의 분석 결과를 나타내었다. 무전해 니켈 층의 표면조도, 즉 nodule의 크기는 그림 6의 Cu 하지층의 CZ 처리횟수에 비례하여 증가하였으며 S/E를 2회 하고 CZ 처리를 하지 않아 표면 조도가 가장 낮았던 조건 그림 6(f)에서 매우 평활한 무전해 니켈 조직을 얻을 수 있었다.

본 실험에서 관찰된 Cu 하지층의 표면 조도에 따른 무전해 니켈의 성장 방향 및 표면 형상을 그림 9에 도식화 하였다. 그림 9(a)와 같이 Cu 하지층이 간격이 좁고 얇은 골 형태인 경우 무전해 니켈 도금층은 Cu 하지층의 형상을 기초로 성장하다가 이후 nodule 들이 서로 병합 등의 과정을 거치면서 그림 7(c), (d) 와 같이 평활하고 작은 nodule 크기의 무전해 니켈층이 형성되었으며, 골의 깊이는 깊고 간격이 큰 그림 9(b)의 Cu 조직에서 형성시킨 무전해 니켈의 경우 nodule 의 구조는 그림 7 (a), (b), (e)와 같이 black pad 발생에 가장 취약해 보이는 구조의 무전해 니켈이 형성되었다. 반면 그림 9(c)와 같이 간격이 크고 얇은 골의

Cu 표면의 경우 그림 7(f)와 같이 평활한 구조를 가짐을 알 수 있다.

즉, 무전해 니켈 도금의 형상은 Cu 하지층의 표면 형상에 의해 결정됨을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 무전해 니켈/금 도금의 전처리 공정, 특히 구리 에칭 공정은 균일하고 평탄한 구조를 가져야 이후 무전해 니켈의 표면형상 구조가 매우 평탄한 구조를 가질 수 있음을 알 수 있었으며 이로부터

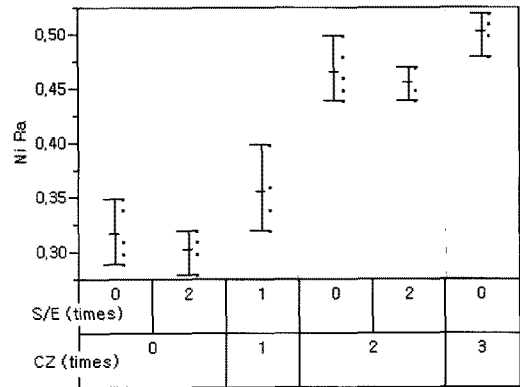


Fig. 8. Surface roughness (Ra) of electroless Ni-P layer prepared under the different Cu etching condition as shown in Table 1.

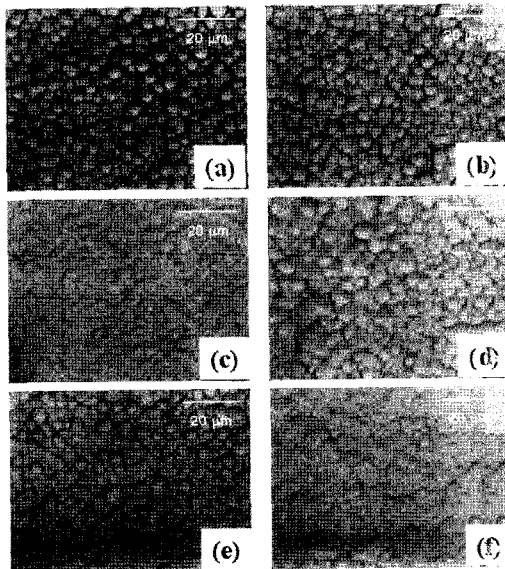


Fig. 7. SEM images of surface structure of electroless Ni-P layer on different surface morphologies of Cu underlayer prepared with Cu etching condition in accordance to Table 1. (dwell time in electroless Ni bath is 35 min)(a) 3×CZ, (b) 2×CZ, (c) no treatment, (d) 1×S/E and 1× CZ, (e) 2×S/E and 2×CZ, and (f) 2×S/E

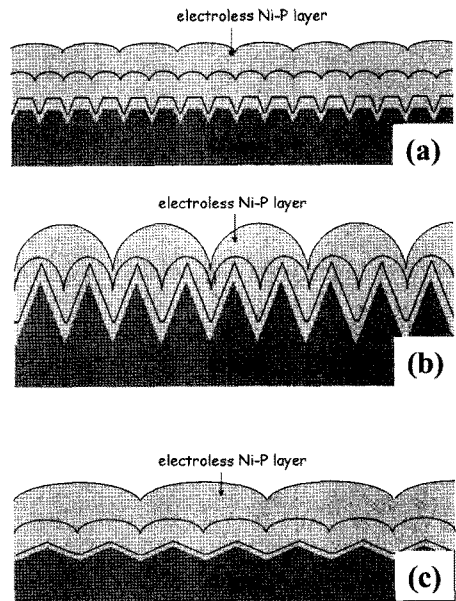


Fig. 9. Schematic illustration of electroless Ni-P growth in terms of Cu underlayer surface structure.

Immersion 금도금 공정에서 야기될 수 있는 black pad 현상을 줄일 수 있는 하나의 방법이 될 수 있다.

4. 결 론

본 실험에서 무전해 니켈층과 솔더간의 취성과 파괴의 주요 원인인 black pad를 최소화 하여 솔더의 접합신뢰성을 향상 할 수 있는 무전해 니켈층 조직을 형성시키기 위하여 전해 도금된 Cu를 에칭 조건과 처리 방법을 변화시켜 분석하였다.

(1) 전해 도금된 Cu를 S/E과 CZ 처리를 통해 다양한 형태의 표면 구조를 얻을 수 있었으며 CZ 처리 횟수가 증가할수록 Cu 하층의 표면구조는 미세한 벌집구조에서 조대한 벌집구조로 변화하였으며 S/E에 의하여 약 0.3 μm 의 Ra 의 조도를 갖는 평활한 Cu 표면 조직이 형성되었다.

(2) S/E 하여 평활하고 조대한 결정면이 노출되거나 조밀하고 얇은 골의 벌집 모양의 Cu 하층에서 성장한 무전해 니켈의 경우 평탄한 표면 조직이 형성되었으며, 반면 조대하고 깊은 골의 벌집 모양의 표면조도를 보였던 CZ 처리한 Cu 하층에서 깊은 crevice와 조대한 nodule로 구성된 무전해 니켈 조직을 얻을 수 있었다.

(3) 무전해 니켈 조직은 Cu 하층의 표면조도에 가장 밀접한 관계를 나타내며 Cu 하층의 표면조도에 따라 무전해 니켈의 표면구조를 변화시킬 수 있음을 알 수 있다. 특히 솔더링 공정에서의 black pad 등의 신뢰성 측면을 고려하여 평활한 무전해 니켈을 형성시키기 위해서는 Cu 하층의 표면조도를 조밀한 CZ 표면을 유지하거나 S/E 처리를 하여 평활한 표면구조로 변화 시켜야 한다.

참고문헌

1. R. F. Champaign, J. A. Roepsch, and M. R. Downey

MR, "Afraid of the Dark?", Circuit Assembly, 1, 22 (2003).

2. N. Biunno, "A Root Cause Failure Mechanism for Solder Joint Integrity of Electroless Nickel/ Immersion Gold Surface Finishes", Proc. IPC EXPO Conf., S18-5-1 (1999).

3. P.Snugovsky, P.Arrovsmith and M.Romansky, "Electroless Ni/Immersion Au Interconnects: Investigation of Black Pad in Wire Bonds and Solder Joints", J. Elec. Mater., 30, 1262 (2001)

4. K. Johal, H. Roberts, S. Lamprecht and H.J. Schreier, "Impacts of Bulk Phosphorous Content of Electroless Nickel Layers to Solder Joint Integrity and Their Use as Gold- and Aluminum Wire Bond Surfaces", J. SMT, 17, 18 (2002)

5. G. Milad, J. Martin, "Electroless Nickel/Immersion Gold, Solderability and Solder Joint Reliability as Function of Process Control", CircuiTree, 10, 24(2000)

6. Martin Goosey, "Factors influencing the formation of "black pad" in electroless nickel-immersion gold solderable finishes—a processing perspective", Circuit World, 28, 36(2002)

7. K. Yokomine, N. Shimizu , Y. Miyamoto, Y. Iwata, D. Love, and K. Newman, "Development of Electroless Ni/Au Plated Build-Up Flip Chip Package with Highly Reliable Solder Joints", Proc. Elec. Comp. Tech. Conf., 1384 (2001).

8. Goyal D, Lane T, Kinzie P, Panichas C, Chong KM, and Villalobos O, "Failure mechanism of brittle solder joint fracture in the presence of electroless nickel immersion gold (ENIG) interface", Proc. Elec. Comp. and Technol. Conf., 732 (2002)

9. Zequn Mei; Johnson, P.; Kaufmann, M.; Eslambolchi, A., "Effect of Electroless Ni/Immersion Au Plating Parameters on PBGA Solder Joint Attachment Reliability", Proc. Elec. Comp. and Technol. Conf., 125 (1999)

10. A. Bai, P. Y. Chuang, and C. C. Hu, "The Corrosion behavior of Ni-P deposits with high phosphorous contents in brine media", J. Mater. Chem. Phys., 82, 93 (2003)