

## Mo-Ti 합금 접착층을 통한 유연 기판 위 구리 배선의 기계적 신뢰성 향상 연구

이영주<sup>1</sup> · 신해아슬<sup>1</sup> · 남대현<sup>1</sup> · 연한울<sup>1</sup> · 남보애<sup>2</sup> · 우규희<sup>3</sup> · 주영창<sup>1,4,†</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 재료공학부, <sup>2</sup>LG디스플레이(주), <sup>3</sup>한국기계연구원, <sup>4</sup>서울대학교 신소재공동연구소

### Bending Fatigue Reliability Improvements of Cu Interconnects on Flexible Substrates through Mo-Ti Alloy Adhesion Layer

Young-Joo Lee<sup>1</sup>, Hae-A-Seul Shin<sup>1</sup>, Dae-Hyun Nam<sup>1</sup>, Han-Wool Yeon<sup>1</sup>, Boae Nam<sup>2</sup>,  
Kyoohye Woo<sup>3</sup> and Young-Chang Joo<sup>1,4,†</sup>

<sup>1</sup>Department of Materials Science & Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

<sup>2</sup>LG Display Research and Development Center, LG Display Co. Ltd., Paju 413-779, Korea

<sup>3</sup>Advanced Manufacturing Systems Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials, Daejeon 305-343, Korea

<sup>4</sup>Research Institute of Advanced Materials (RIAM), Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

(Received December 1, 2014; Corrected January 22, 2015; Accepted January 26, 2015)

**초 록:** 유연 기판에 증착된 구리 박막과 구리 배선의 기계적 피로 현상에 대해 조사하고, 몰리브덴-티타늄 합금 접착층을 이용해 피로 신뢰성을 향상시키는 연구를 진행하였다. 구리 배선의 경우 구리 박막에 비해 인장 굽힘 피로수명이 약 3배, 압축 굽힘 피로수명은 약 6배 가량 감소하는 것으로 측정되었으며, 기계적 균열 생성에 의한 파괴가 더욱 치명적으로 작용할 수 있다. 몰리브덴-티타늄 접착층이 있을 경우, 구리 배선의 피로수명이 인장과 압축 굽힘 조건 모두 향상되는 결과를 나타냈으며, 이는 접착층에 의한 계면 접착력 상승 효과와 더불어 구리층의 미끄럼 현상을 억제했기 때문으로 추측된다.

**Abstract:** Bending fatigue characteristics of Cu films and 8 μm width Cu interconnects on flexible substrates were investigated, and fatigue reliability improvement was achieved through Mo-Ti alloy adhesion layer. Tensile bending fatigue reliability of Cu interconnects is 3 times lower than that of Cu films, and even compressive bending fatigue reliability of Cu interconnects is 6 times lower than that of Cu films. From these results, mechanical crack formation could be fatal in Cu interconnects. With Mo-Ti adhesion layer, fatigue reliability of Cu films and interconnects were enhanced due to the increase of adhesion strength and the suppression of slip induced crack initiation.

**Keywords:** Flexible interconnects, Fatigue, Reliability, Bending endurance

## 1. 서 론

유연 디스플레이나 배터리, 입을 수 있는 컴퓨터, 전자 피부 등 다방면으로의 전자소자의 활용을 위한 굽히거나 접을 수 있는 전자소자 제작 기술의 수요가 꾸준히 증가하고 있다.<sup>1-5)</sup> 유연 전자소자는 기계적 변형에 쉽게 노출되기 때문에, 전자소자의 성능을 제대로 발휘하기 위해서는 우선 전자소자 및 소재의 기계적 안정성에 대한 신뢰성 평가가 필요하다. 특히 전극이나 배선물질로 가장 자주 쓰이는 금속재료는 소자의 성능에 가장 직접적으로 영향을 미칠 수 있기 때문에, 유연성 기판 위에 올려진 금

속 박막의 기계적 신뢰성에 대한 이해가 필수적이다. 많은 연구 그룹들이 단일 축 방향 인장 시험 또는 피로 시험, 변형에 의해 생긴 균열이 금속 박막의 전기 전도도에 미치는 영향, 박막의 두께나 미세구조 차이에 따라 발생하는 기계적 거동의 차이를 관찰하여 보고한 바 있다.<sup>6-12)</sup> 그러나 실제로 사용되는 금속 배선이나 전극 등은 유한한 작은 사이즈를 가지고 있기 때문에 기계적 변형에 더욱 취약할 수 있음에도 불구하고, 기존 연구들의 경우 패턴 구조가 없는 단순한 금속 박막에 대한 연구로 국한되어 있다. 실리콘 소자에서 사용되는 유한 선폴을 갖는 금속 배선의 응력 분포에 대한 연구가 진행된 바 있으나,<sup>13)</sup>

<sup>†</sup>Corresponding author  
E-mail: ycjoo@snu.ac.kr

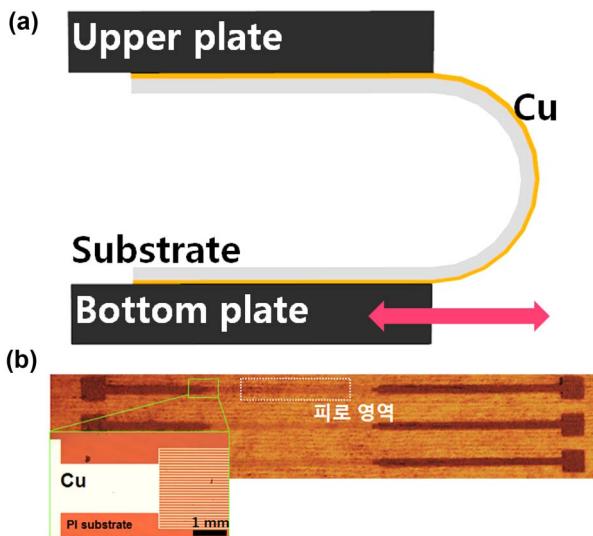
© 2015, The Korean Microelectronics and Packaging Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

이는 잔류 응력에 대한 분석으로 한정되어 있으며, 유연 기관 위에서의 외적인 응력 변형에 따른 안정성 평가는 진행된 바 없다. 이에 본 연구에서는 식각 공정을 거치지 않은 구리 박막과 8  $\mu\text{m}$ 의 선폭을 갖는 구리 배선의 굽힘 피로 안정성에 대한 평가를 진행하였다. 신뢰성 통계 처리 분석을 통해 구리 박막과 구리 배선의 피로 수명을 정량적으로 계산하였다. 구리 배선 시편의 경우, 30개의 배선이 병렬적으로 연결된 구조를 적용하여 하나의 전기적 신호로부터 동시에 여러 개의 배선의 기계적 파괴를 관찰하였다.<sup>14)</sup> 구리 배선과 기관 사이에 기존 실리콘 소자 기반 공정에서 구리 확산방지 및 접착층으로 사용되었던 폴리브덴-티타늄 합금층을 증착함으로써 접착층 유무에 따라 기계적 피로 신뢰성이 어떤 차이가 발생하는지 연구하였다.<sup>15)</sup>

## 2. 실험 방법

Fig. 1의 (a)는 굽힘 피로 시험 시스템의 개략적인 그림이며, (b)는 병렬구조 구리 배선의 시편의 광학현미경 이미지이다. 상부 플레이트가 고정된 상태에서, 하부 플레이트를 선형으로 움직이게 되면 반복적인 변형이 가해지게 되며, 상부와 하부 플레이트 간 간격을 조절해 줌으로써 가하고자 하는 기계적 변형율을 조절할 수 있으며,<sup>9,10)</sup> 양 끝 그림에 전류를 인가해 줌으로써 반복 굽힘에 따른 전기적 저항을 측정할 수 있다. 구리 박막 및 배선의 두께는 200 nm이며, 17  $\mu\text{m}$  두께의 폴리이미드 기관 위에 스퍼터로 증착하였다. 병렬구조 다중 구리 배선 시편의 경우 노광을 이용한 식각공정으로 Fig. 1(b)와 같이 제작되었다. 접착층으로 사용된 폴리브덴-티타늄 합금의 경우 50:50 (at %) 조성으로, 구리 증착 전 약 40 nm 가량 증



**Fig. 1.** (a) Schematic illustration of bending fatigue systems (tensile condition) (b) Optical images of multiple-line Cu on polyimide substrate. The width of each Cu line was 8  $\mu\text{m}$ .

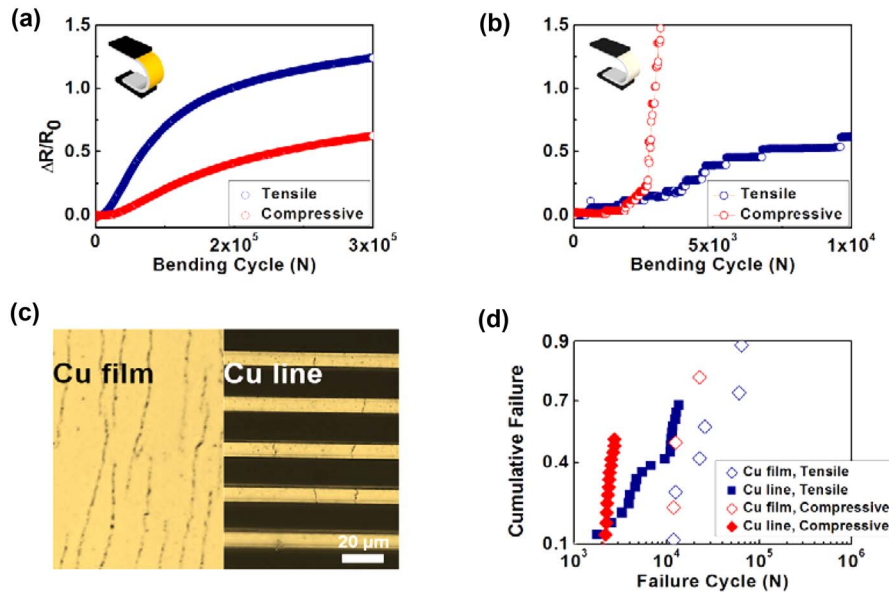
착되었다. 반복 굽힘의 경우 1%의 변형율로 진행되었으며, 반복 횟수는 30만 번까지 진행하였다. 하부 플레이트 층이 반복적으로 이동하는 거리는 10 mm이며, 인장 조건과(구리층이 곡률반경 바깥쪽으로 위치) 압축 조건(구리층이 곡률반경 안쪽으로 위치)에서 굽힘 피로시험을 진행하였다.

## 3. 결과 및 고찰

Fig. 2의 (a)와 (b)는 각각 구리 박막과 구리 배선의 반복 굽힘에 따른 전기 저항 변화 그래프를 나타낸 것이다. 저항의 증가는 구리 박막 및 배선에서 Fig. 2(a), (b) 그래프 내의 광학 이미지와 같이 굽힘 방향에 수직하게 발생하는 균열의 생성 및 성장과 연관이 있다.<sup>9,10)</sup> 저항 변화 그래프에서 구리 배선이 구리 박막에 비해 가장 큰 차이는 보이는 점은 바로 두드러진 저항변화이다. 구리 박막의 경우 반복 굽힘에 따라 저항변화가 연속적으로 이루어지는 것을 확인할 수 있지만, 구리 배선의 경우 계단 형태의 불연속적인 저항 변화가 관찰됨을 그래프로부터 확인할 수 있다. 이론적으로 30개의 배선 중 하나가 끊어지게 되면 전체 시편의 저항은 약 3% 가량 증가하게 되며, 이는 그래프로 얻어진 실험적 결과와 어느 정도 일치함을 확인할 수 있었다. 이러한 결과로부터, 구리 배선에서 불연속적인 저항 변화가 관찰되는 이유는 병렬로 연결된 배선들이 하나씩 끊어지게 되면서 저항이 순간적으로 증가하는 것으로 생각할 수 있으며, 각각의 불연속점에 해당하는 굽힘 횟수가 각 배선의 피로 수명이라고 생각할 수 있다.

30만 번의 반복 인장 굽힘 뒤에 구리 박막에서 생성된 균열의 평균 성장 길이는 약 76.69  $\mu\text{m}$ 로, 8  $\mu\text{m}$  선폭을 가지는 구리 배선의 경우 완전히 파단이 나기에 충분한 성장 길이임을 알 수 있다. 실제로 Fig. 2(c)의 광학 이미지를 볼 때, 생성된 균열은 구리 배선의 끝 단에서 끝 단으로 이어지며, 전기전도 경로를 완전히 차단했음을 알 수 있다. 이와 다르게 구리 박막의 경우에는 전도 경로를 완전히 차단하지 못하므로, 반복 굽힘에 따라 연속적인 저항 변화를 나타낸 것으로 생각할 수 있다.

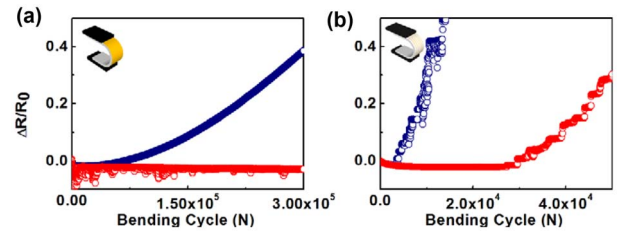
본 연구에서는, 이러한 다중 병렬라인 구조를 통해 여러 개의 구리 배선의 고장 수명을 동시에 측정할 수 있었다. 구리박막과 구리배선의 피로 수명을 로그정규분포 분석을 통해 계산하였으며,<sup>16)</sup> 그 누적 파괴 분포도를 Fig. 2(d)에 나타내었다. 전체 중 50%의 시편이 고장이 나는 시점을 피로 수명  $N_{50}$ 으로 정의하였으며, 구리 박막의 경우 파괴 발생 시점은 초기 대비 저항 증가가 3% 이상일 경우로 정의하였다. 구리 박막의 인장 굽힘 피로 수명의 경우 약 20,000번으로 측정되는데 비해, 구리 배선의 경우 약 6,000회로 측정되었다. 로그정규분포의 표준편차는 구리 박막의 경우 0.87, 구리 배선의 경우 0.76으로 편차 값이 크지 않고 합당한 데이터가 얻어졌음을 알 수 있다.



**Fig. 2.** Resistance change curve of (a) non-patterned Cu films and (b) multiple Cu lines under tensile/compressive bending fatigue. (c) Optical images of Cu films and lines after  $3 \times 10^5$  cycles of bending. (d) Cumulative failure plot of each test condition. Failure criterion of the Cu films was defined where the increase in resistance reached 3% compared to initial.

위 결과로부터, 실제로 사용되는 배선이나 전극의 경우 그 규모에 의한 영향으로 기계적 균열에 의한 파괴가 더 치명적임을 알 수 있다. 구리 박막의 인장 굽힘과 압축 굽힘의 피로 수명은 어느 정도 유사한 값을 얻을 수 있었다. 그러나, 구리 배선의 경우 인장 굽힘의 피로 수명이 압축 굽힘의 피로 수명보다 두 배 가량 크게 측정되었다. 일반적으로 균열 닫힘 모드에 해당하는 압축 굽힘의 경우에도 불구하고 수명이 인장 굽힘에 비해 작게 나오는 이유는 구리 배선과 폴리이미드 기판 사이의 접착력 문제로 추정되며, 이는 추후 표면 파괴 분석을 통해 논의하고자 한다. 기계적 피로 신뢰성을 향상시키는 방안으로, 구리 박막 및 구리 배선과 폴리이미드 기판 사이에 몰리브덴-티타늄 합금을 접착층으로 활용하였을 때의 굽힘 피로 평가를 진행해 보았으며, 그 결과는 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3(a)와 (b)는 몰리브덴-티타늄 접착층이 깔려있는 구리 박막 및 배선의 저항 변화 그래프를 나타낸 것이다. 내피로성을 제외하고는 저항 변화의 경향이 접착층이 없는 경우와 유사함을 확인할 수 있다. 몰리브덴-티타늄 층은 기존 실리콘 소자에서는 구리의 확산 방지막으로 자주 쓰였으나, 이처럼 유연 기관 위에서는 구리의 접착 향상층으로 활용될 수 있는 것을 알 수 있다. 각 실험 조건별  $N_{50}$  값을 Table 1에 나타내었다. 몰리브덴-티타늄 합금 접착층이 있는 구리 박막의 경우 인장 굽힘의 피로 수명

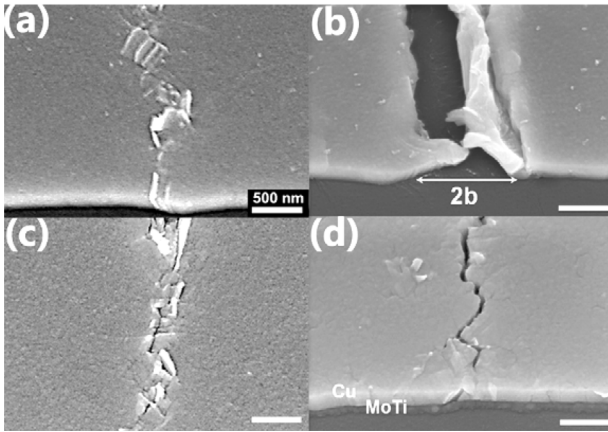


**Fig. 3.** Resistance change curve of (a) Cu/MoTi films and (b) multiple Cu/MoTi lines under tensile and compressive bending fatigue.

이 140,100회로, 접착층이 없는 박막에 비해 약 7배 가량 수명이 증가하였으며, 압축 굽힘의 피로 시험의 경우에는 30만 번의 반복 굽힘이 진행되었음에도 저항이 증가하지 않는 결과를 얻을 수 있었다.  $8 \mu\text{m}$ 의 유한 선폭을 갖는 구리 배선의 경우 구리 박막만큼의 신뢰성 향상을 보이지는 않았다. 인장 굽힘의 경우, 접착층이 없는 구리 배선은 피로 수명이 약 6,000회로 측정되었으며, 접착층이 있는 경우는 약 12,800회로 약 두 배 가량 증가하는 결과를 얻었다. 구리 박막 시험에서 보았듯이, 접착층이 있는 경우 압축 굽힘 피로의 수명이 크게 향상되는 결과를 구리 배선에서도 확인할 수 있었다. 몰리브덴-티타늄 접착층이 있는 구리 배선의 경우 피로 수명이 약 48,100회

**Table 1.** Mean-cycle-to-failure ( $N_{50}$ ) of Cu and Cu/MoTi films and lines. (Cycles)

Test Mode	Film (Tensile)	Film (Compressive)	Line (Tensile)	Line (Compressive)
Cu	19,900	21,600	6,000	3,200
Cu/MoTi	140,100	Not fail	12,800	48,100



**Fig. 4.** Crack morphologies of (a) tensile-bended and (b) compressive-bended Cu line. Delamination was observed in the case of compressive bending of Cu line. (c) tensile-bended and (d) compressive-bended Cu/MoTi line.

로, 접착층이 없는 구리 배선에 비해 약 11배 가량 수명이 향상되는 결과를 얻을 수 있었다. 압축 굽힘 피로의 수명이 향상되는 이유는 계면 접착력의 향상으로 추측된다. 구리 배선에서 발생한 기계적 균열의 형상을 관찰하기 위해서, 각 실험 조건에서  $N_{50}$ 회 만큼 반복 굽힘이 진행된 시편들을 주사전자현미경을 통해 관찰하였으며, 이를 Fig. 4에 나타내었다.

인장 굽힘의 경우, 몰리브덴-티타늄 합금 접착층의 유무와 관계없이 균열 주변에서 압출(Extrusion)현상이 관찰되는 것을 사진으로부터 확인할 수 있었다. 이러한 파괴형상은 입계 등에 쌓인 전위들에 의한 비가역적 미끄럼(Slip)에 의해 발생하며, 기존 연구들로부터 수 차례 보고된 바 있다.<sup>5,10</sup> 이에 비해 Fig. 4(b)에 제시한 접착층이 없는 구리 배선의 압축 굽힘 피로 파괴형상은 앞선 파괴형상과 차이가 나타나는 것으로 보였다. 기존 파괴형상이 미끄럼에 의한 균열 발생이었다면, 반복적으로 압축 굽힘을 거친 접착층이 없는 구리 배선의 경우 박리현상이 나타난 것을 사진으로부터 확인할 수 있다. 특별한 반응이 없는 구리와 폴리이미드간의 접착력은 그다지 좋지 않다는 연구가 보고된 바 있다.<sup>17</sup> Mei 그룹에서는 박막 박리 길이의 절반(Fig. 4(b)의 2b) 대비 박막 두께의 비율이 5 미만일 경우, 링클링(wrinkling)이 발생한다고 보고한 바 있다.<sup>18</sup> 실험 결과로부터 측정된 비율의 값은 2.71로, 링클링에 의한 박막 박리현상임을 알 수 있으며, 이는 균열 간 간격이 일정한 것으로부터도 확인할 수 있다.

이러한 파괴형상과 반대로, 몰리브덴-티타늄 접착층이 있는 구리 배선의 압축 굽힘 피로 결과는 기존 인장 결과의 파괴형상과 비슷한 것을 Fig. 4(d)로부터 확인할 수 있다. 이는 몰리브덴-티타늄 접착층이 구리 배선의 박리현상을 억제하고, 미끄럼 현상 지연시켜 주었기 때문으로 생각할 수 있다. 티타늄은 폴리이미드 내에 존재하는 카르보닐기의 산소와 우선적인 결합을 이루는 것으로 이미 보고된 바 있으며, 니켈 또는 크롬층과 같은 원리를 통해

접착력을 향상시키는 것으로 알려져 있다.<sup>19</sup> 같은 이유로, 합금층 내부에 존재하는 티타늄이 계면 접착력을 향상시켜줌으로써 구리와 폴리이미드 기판 간의 박리를 막아주어, 압축 굽힘 피로의 신뢰성을 크게 향상시켜주었을 것으로 예상할 수 있다. 또한, 합금층에 의한 전반적인 신뢰성 향상은 구리층과 기판 사이에서 전위들이 쌓이는 것을 억제하는 역할을 해주었기 때문으로 볼 수 있다. 접착층이 없는 구리의 경우, 전위가 계면에 쌓이게 되면서 계면 균열을 발생시킬 수 있다.<sup>20</sup> Nicola 그룹에서는 구리 위에 코팅되거나 구리 아래 접착층으로 티타늄이 존재할 경우, 계면에서 누적되는 전위 밀도가 굉장히 크다는 결과를 보고한 바 있으며,<sup>21</sup> 이는 곧 구리 배선의 미끄럼 현상을 방지할 수 있다는 것을 의미한다. 이와 유사하게 본 연구에서도 몰리브덴-티타늄 합금층이 전위에 의한 균열 생성 거동을 억제하여 구리 배선의 피로 신뢰성을 향상시켰을 것으로 예상된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 실시간 저항 측정을 통해 유연 기판 위에 증착된 구리 박막과 구리 배선의 반복 굽힘에 따른 피로 특성평가를 진행하고, 몰리브덴-티타늄 합금 접착층을 이용해 피로 신뢰성을 향상시키는 연구를 진행하였다. 구리 배선의 경우 병렬구조를 통해 동시에 여러 개의 배선의 신뢰성 평가를 동시에 진행하는 방안을 제시하였고, 이를 통해 통계처리에 필요한 적절한 파괴 시편 수를 확보하여 피로 수명을 정량적으로 계산하였다. 관찰된 기계적 균열의 평균 길이는 유한한 선폭을 가지는 구리 배선을 완전히 절단할 수 있을 정도로 큰 값을 가짐을 확인하였으며, 실제 배선으로 사용될 경우 균열 핵 생성이 소자의 수명에 치명적인 영향을 줄 수 있을 것으로 예상할 수 있다. 구리 배선의 인장 굽힘 피로 수명은 구리 박막에 비해 약 3배 가량, 압축 굽힘에서는 7배가량 감소하여 압축 굽힘에서의 신뢰성 문제가 더 큰 결과를 얻을 수 있었다. 압축 굽힘의 파괴 거동은 취약한 계면 접착력으로부터 기인한 계면 박리로 볼 수 있었다. 몰리브덴-티타늄 합금층을 사용할 경우, 인장 및 압축 굽힘 피로 신뢰성이 모두 향상되는 것을 확인할 수 있었으며, 특히 압축 굽힘 시험에서는 박리현상이 억제되는 것을 전자현미경 촬영을 통해 확인하였으며 평균 수명이 약 11배가량 증가하는 결과를 얻을 수 있었다. 합금층 내부의 티타늄이 폴리이미드 기판과의 화학적 결합작용을 통해 접착력이 향상되었을 것으로 예상할 수 있으며, 그 외 구리와 티타늄 간의 계면 형성을 통한 구리의 미끄럼 현상 억제를 통해 기계적 신뢰성을 향상시켰을 것으로 생각할 수 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 (주)엘지디스플레이의 재원으로 산학연구과

제 사업의 지원 및 서울대학교 내 반도체공동연구소의 장비 지원을 통해 수행되었습니다.

## References

1. D.-H. Kim, N. Lu, R. Ma, U.-S. Kim, R.-H. Kim, S. Wang, J. Wu, S. M. Won, H. Tao, A. Islam, K. J. Yu, T.-I. Kim, R. Chowdhury, M. Ying, L. Xu, M. Li, H.-J. Chung, H. Keum, M. McCormick, P. Liu, Y.-W. Zhang, F. G. Omenetto, Y. Huang, T. Coleman, and J. A. Rogers, "Epidermal Electronics", *Science*, 333(6044), 838 (2011).
2. T. Sekitani and T. Someya, "Stretchable Organic Integrated Circuits for Large-area Electronic Skin Surfaces", *MRS Bulletin*, 37(3), 236 (2012).
3. H. Fujikake, H. Sato, and T. Murashige, "Polymer-stabilized Ferroelectric Liquid Crystal for Flexible Displays", *Displays*, 25(1), 3 (2004).
4. A. K. Pandey and J.-M. Munzi, "Efficient Flexible and Thermally Stable Pentacene/C<sub>60</sub> Small Molecule Based Organic Solar Cells", *Appl. Phys. Lett.*, 89(21), 213506 (2006).
5. J.-H. Kim, M.-W. Chon and S.-H. Choa, "Technology of Flexible Transparent Conductive Electrode for Flexible Electronic Devices", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 21(2), 1 (2014).
6. O. Kraft, R. Schwaiger, and P. Wellner, "Fatigue in Thin Films: Lifetime and Damage Formation", *Mater. Sci. Eng. A*, 319-321, 919 (2001).
7. Y. Xiang, T. Li, Z. Suo, and J. J. Vlassak, "High Ductility of a Metal Film Adherent on a Polymer Substrate", *Appl. Phys. Lett.*, 87(16), 161910 (2005).
8. R. M. Niu, G. Liu, C. Wang, G. Zhang, X. D. Ding, and J. Sun, "Thickness Dependent Critical Strain in Submicron Cu Films Adherent to Polymer Substrate", *Appl. Phys. Lett.*, 90(16), 161907 (2007).
9. B.-J. Kim, H.-A.-S. Shin, S.-Y. Jung, T. Cho, O. Kraft, I.-S. Choi, and Y.-C. Joo, "Crack Nucleation during Mechanical Fatigue in Thin Metal Films on Flexible Substrates", *Acta Mater.*, 61(9), 3473 (2013).
10. B.-J. Kim, Y. Cho, M.-S. Jung, H.-A.-S. Shin, M.-W. Moon, H. N. Han, K. T. Nam, Y.-C. Joo, and I.-S. Choi, "Fatigue-free, Electrically Reliable Copper Electrode with Nanohole Array", *Small*, 8(14), 3300 (2012).
11. Y.-J. Choi, N.-H. Kwon, S.-H. Ha, J. Park, H.-B. Kim, and Y.-R. Cho, "Electrical Properties of Metal Film with Micro-Holes on a Polymer Substrate: Applications for Flexible Electronic Devices", *Electron. Mater. Lett.*, 5(4), 191 (2009).
12. B.-J. Kim, "Reliability of Metal Electrode for Flexible Electronics", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 20(4), 1 (2013).
13. P. Gudmundson and A. Wikström, "Stresses in Thin Films and Interconnect Lines", *Microelectron. Eng.*, 60(1-2), 17 (2002).
14. J. Cho and C. V. Thompson, "Grain Size Dependence of Electromigration-induced Failures in Narrow Interconnects", *Appl. Phys. Lett.*, 54(25), 2577 (1989).
15. J.-S. Lim, H.-U. Kim, H.-Y. Kwack, H.-S. Hong, B.-C. Ahn, and B.-H. Lim, U.S. patent 8,456,601 B2 (4 June 2013).
16. J. W. McPherson, *Reliability Physics and Engineering: Time-to-failure modeling*, p. 64, Springer, New York (2010).
17. G. S. Chang, K. H. Chae, C. N. Whang, E. Z. Kurmaev, D. A. Zatsepin, R. P. Winarski, D. L. Ederer, A. Moewes, and Y. P. Lee, "Mechanism for Interfacial Adhesion Strength of an Ion Beam Mixed Cu/Polyimide with a Thin Buffer Layer", *Appl. Phys. Lett.*, 74(4), 522 (1999).
18. H. Mei, R. Huang, J. Y. Chung, C. M. Stafford, and H.-H. Yu, "Buckling Modes of Elastic Thin Films on Elastic Substrates", *Appl. Phys. Lett.*, 90(15), 151902 (2007).
19. F. S. Ohuchi and S. C. Freilich, "Metal Polyimide Interface: A Titanium Reaction Mechanism", *J. Vac. Sci. Tech. A*, 4(3), 1039 (1986).
20. Z. Suo, J. Vlassak, and S. Wagner, "Micromechanics of Macroelectronics", *China Particuology*, 3(6), 321 (2005).
21. L. Nicola, Y. Xiang, J. J. Vlassak, E. Van der Giessen, and A. Needleman, "Plastic Deformation of Freestanding Thin Films: Experiments and Modeling", *J. Mechanics and Phys. Solids*, 54(10), 2089 (2006).