특집 : 유연성 금속 전극 신뢰성

유연성 소자용 금속 전극의 신뢰성 연구 동향

김병준[†]

Karlsruhe Institute of Technology, Institute for Applied Materials, Germany

Reliability of Metal Electrode for Flexible Electronics

Byoung-Joon Kim[†]

Institute for Applied Materials (IAM-WBM), Karlsruhe Institute of Technology, Hermann-von-Helmholtz-Platz 1,
76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Germany

(2013년 12월 17일 접수: 2013년 12월 23일 수정: 2013년 12월 26일 게재확정)

Abstract: Recently, various types of flexible devices such as flexible displays, batteries, e-skins and solar cell panels have been reported. Most of the researches focus on the development of high performance flexible device. However, to realize these flexible devices, the long-term reliability should be guaranteed during the repeated deformations of flexible devices because the direct mechanical stress would be applied on the electronic devices unlike the rigid Si-based devices. Among various materials consisting electronics devices, metal electrode is one of the weakest parts against mechanical deformation because the mechanical and electrical properties of metal films degrade gradually due to fatigue damage during repeated deformations. This article reviews the researches of fatigue behavior of thin metal film, and introduces the methods to enhance the reliability of metal electrode for flexible device.

Keywords: Flexible device, Metal electrode, Reliability, Nanostructure

1. 서 론

최근 유연성 디스플레이(flexible display), 전자 피부(electronic skin), 유연성 배터리(flexible battery), 태양 전지(flexible solar cell) 등 여러 종류의 소자가 접고 굽힐 수 있는 유연성 소자 형태로 많이 개발되고 있다.¹⁻⁴⁾ 이러한 유연성 전자 소자는 가볍고, 휴대가 용의하고, 기계적 충격에 강하기 때문에, 더 많은 전자 소자들이 유연성 소자 형태로 제작 될 거라 예상된다. 최근 실제 산업에서는 유연성 소자의 시제품들이 계속 출시되고 있으며, 이러한 유연성 소자의 성능을 향상시키기 위한 연구들이 활발히 진행되고 있다. 이에 따라 유연성 소자의 성능이 급격히 발달하는 추세이고, 앞으로 유연성 소자의 실제 상용화가 멀지 않은 것처럼 예상된다. 하지만, 실제 상용화를 위해서는 유연성 소자 제품의 수명을 충분히 보증할 수 있어야 한다. 따라서, 지금까지의 연구들이 대부분 유연성 소자의 성능을 향상시키는 데에 연구의 초점이 주로 맞춰졌다면, 이제는 유연성 소자의 신뢰성에 대한 연구에 큰 관심과 노력을 기울여야 할 시점이다.

기존 실리콘 소자에는 고온, 고전류 등에 의해 발생하는 electromigration, stress migration 등이 주요 신뢰성 문제였다.⁶⁻⁹⁾ 하지만, 유연성 소자의 경우에는 사용 중에 소자를 직접적으로 접고 구부리기 때문에, 기존 실리콘 소자와는 달리 외부 기계적 응력이 전자 소자에 직접적으로 가해진다는 점이 가장 큰 특징이다. 더욱이, 유연성 소자의 발전 방향이 기존의 단단한 실리콘 기반 소자에서, 약간 굽힐 수 있는 curved 형태, 이후 돌돌 말을 수 있는 rollable 형태, 최종적으로는 잡아 당길 수 있는 stretchable 형태로 발전할 것이라 예상되고, 이에 따라 점점 더 큰 응력이 소자에 직접적으로 가해지게 될 것이다. 따라서 기존 반도체 소자에서는 없었던, 직접적인 기계적 변형의 효과를 고려한 새로운 신뢰성 연구가 필요한 실정이다.

전자의 이동을 위한 전도성 전극 및 배선은 유연성 전자 소자를 구성하기 위해 꼭 필요한 요소이다. 최근 들어 CNT, graphene, 혹은 전도성 고분자 등이 전도성 전극으로 개발되고 있지만¹⁰⁻¹⁵⁾, 공정이 쉽고, 가격이 저렴하고, 우수한 전기 전도도를 제공하는 구리, 알루미늄, 은, 금과 같은 금속 전극이 전도성 전극으로 현재 가장 널리 사용

[†]Corresponding author
E-mail: byoung-joon.kim@kit.edu

© 2013, 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.

되고 있다. 또한 소자와 소자 사이를 연결하는 길이가 긴 배선에는 필히 금속 박막이 사용될 것으로 예상된다. 유연성 소자의 사용 중, 기계적 변형이 반복적으로 소자에 가해질 경우, 유연성 기판은 폴리머 물질이기 때문에 큰 영향을 받지 않지만, 유연성 기판 위의 금속 배선은 기계적 변형에 상대적으로 취약하므로 이 곳에 전기적, 기계적 신뢰성 문제가 발생하게 되고 이는 결국 소자 전체의 성능 저하 문제를 유발하게 된다.

유연성 소자용 금속 전극에 기계적 변형이 가해질 경우 여러 가지 형태의 신뢰성 문제가 발생할 수 있다. 첫 번째로, 유연성 기판과 금속 층 사이의 계면이 취약할 경우 이곳에서 박리(delamination) 현상이 발생할 수 있으며,¹⁶⁾ 또한, 큰 변형이 가해졌을 경우에는 금속 전극에 크랙(crack)이 발생하게 된다.¹⁷⁾ 마지막으로 작은 변형이지만, 반복해서 가해졌을 경우에도 크랙과 같은 문제가 발생하게 된다. 이처럼 상대적으로 작은 응력에 해당하는 변형이 반복적으로 가해질 경우 재료의 파괴가 일어나는 것을 피로(fatigue) 파괴라고 한다.^{18,19)} 이와 같은 피로 파괴 현상은 유연성 소자의 신뢰성과 수명을 결정하므로 매우 중요한 문제로 인식되고 있다.

지금까지 금속의 피로 현상은 주로 벌크 재료에서 응력과 변형률 간의 관계를 통해 기계적 성질 변화 관점에서 많은 연구가 이루어졌다.^{18,19)} 반면, 전자 소자에 사용되는 금속 재료의 경우, 박막 형태의 재료에서 기계적 성질보다는 전기적 성질이 더 중요한 역할을 하게 된다. 본 논문에서는 유연성 소자용 금속 전극의 신뢰성의 최근 연구 동향을 살펴보고, 신뢰성을 향상시킬 수 있는 방법 등을 소개하고자 한다.

2. 금속 전극의 신뢰성 평가 방법

유연성 소자용 금속 전극의 신뢰성은 여러 가지 실험 방법을 통해 이루어지고 있다. 가장 일반적인 방법은 Fig. 1(a)에 나타난 미소 인장 시험기를 이용한 피로 시험법이다. 시편을 일정 길이로 절단한 후 일정량의 변위를 반복적으로 가하면서 전기적, 기계적 특성 변화를 실시간으로 관찰하는 방법이다.²⁰⁻²³⁾ 이 방법의 경우, 정확한 양의 변위를 가할 수 있다는 장점이 있지만, 압축 응력이나 굽힘 변형 등과 같은 여러 가지 형태의 변형 효과를 연구하는 데에는 한계가 있다. 최근 자주 사용되는 반복 굽힘 변형 시험법을 Fig. 1(b)와 Fig. 1(c)에 나타내었다. 이 두 가지 방법은 패키지 산업에서 FPCB (Flexible printed circuit board)의 신뢰성을 평가하던 가장 대표적인 두 가지 방법, 절곡 실험법(MIT test), 굴곡 실험법(IPC test)을 각각 응용한 방법이라 할 수 있다.²⁴⁻²⁶⁾

굽힘 변형 시 박막에 발생하는 변형률은 다음과 같이 표현할 수 있다.²⁷⁾

$$\varepsilon = (h_{sub} + h_{film})/2r \quad (1)$$

Fig. 1. Schematic illustrations of (a) microtensile fatigue test, (b) cyclic folding test, and (c) cyclic sliding test.

여기서 ε 는 박막에 인가되는 변형률, h_{sub} 와 h_{film} 는 각각 기판과 박막의 두께, $2r$ 은 양 끝 단 사이의 간격(r 은 곡률 반경)을 나타낸다. Fig. 1(b)와 같이 한쪽을 고정하고 다른 한쪽 끝을 반복적으로 움직여 양 끝 단 사이의 간격을 조절할 경우, 굽힘부의 곡률이 변화하며 반복 변형이 일어나므로 이를 통해 전극의 신뢰성을 평가할 수 있다. 주로 전기 저항 변화를 측정하며, 반복 굽힘 변형 전후의 전자 소자의 특성을 비교 평가할 수도 있다.²⁸⁾ 이 실험법의 경우 굽힘부의 가운데 부분에서 가장 높은 변형률이 발생하고, 이외의 부분에는 그보다 낮은 변형률이 반복적으로 가해지는 점이 특징이다. Fig. 1(c)는 시편 양 끝단의 간격을 고정된 상태에서 한쪽에만 반복 직선 운동을 가함으로써 시편에 굽힘 변형을 반복적으로 가해주는 신뢰성 평가 방법이다. 위 쪽이 고정되고, 아래쪽이 반복 직선 운동을 함에 따라 시편 굽힘부의 가장자리는 굽혀지고 펴지기를 반복하게 된다. 특히, 가운데 부분이 계속 굽혀진 상태의 경우, 이 곳에는 계속해서 일정한 변형률이 가해지게 되므로, 재미있게도 이 곳에는 크랙이 발생하지 않는다.²⁷⁾ 따라서 이 실험법을 통해서도 굽힘 변형 시 각 위치에 따른 신뢰성을 평가할 수 있다. 이와 같은 굽힘 실험법들의 경우, 박막을 굽힘부 안쪽으로 위치시킬 경우, 압축 응력 상황에서의 신뢰성을 평가할 수 있다

는 점이 또 하나의 특징이다. 금속 전극의 신뢰성 평가를 위한 여러 가지 방법이 제안되고 있지만, 아직까지 정확한 표준화는 이루어지지 않은 상태로, 앞으로 평가 방법과 기준에서 많은 발전이 필요한 실정이다.

3. 금속 전극의 피로 거동

금속 박막의 기계적 성질이 박막 두께, 결정립 크기, 결정 방향 등에 따라 크게 변화한다는 사실은 널리 알려져 있다.²⁹⁾ 이에 따라 금속 전극의 피로 수명, 신뢰성 또한 금속 박막의 미세 구조에 많은 영향을 받게 된다. 일반적인 벌크 금속 재료의 피로 파괴 거동은, 반복 변형 중 전위가 누적되어 PSB (Persistent slip band)를 형성하게 되고 이곳에서 국부적인 응력 집중이 발생하여 크랙 발생 (nucleation)을 유발하게 된다. 이에 반해 두께가 얇은 금속 박막의 피로 파괴 거동은, 벌크 재료처럼 PSB가 형성되는 것이 아니라, 표면에 extrusion, intrusion과 같은 돌출부들이 개별적인 전위의 이동에 의해 형성이 되고, 금속 박막과 기판 사이에 void가 형성되기도 한다.²⁰⁾ 이러한 피로 손상부(fatigue damage)에서 응력 집중이 발생하여 결국은 크랙의 발생을 유발하게 된다. Fig. 2(a)는 반복 인장 실험 이후, 금속 박막의 대표적인 피로 파괴 모습을 보여주고 있다. Fig. 2(b)는 반복 굽힘 실험 이후 발생하는 피로 손상부 사진을 보여주고 있다. 인장 실험법과 마찬가지로 표면에 extrusion과 같은 돌출부가 형성되고, 크랙이 인접해서 형성된 것을 보여주고 있다. 이러한 파괴 모습은 반복 변형에 의한 전위의 누적이 주요 원인이므로, 큰 변형이 가해졌을 때 일어나는 fracture 거동과는 크게 다른 표면 형상을 보이고 있다.

금속 박막에 피로 파괴가 일어날 경우, 이에 따라 전기적, 기계적 특성의 열화가 발생하게 된다. Fig. 3(a)와 (b)는 반복 굽힘 사이클에 따른 전기 저항 변화를 보여주고

Fig. 2. SEM images after (a) microtensile fatigue test²¹⁾ and (b) cyclic sliding test²⁷⁾.

있다. 초반에는 전기 저항이 증가하지 않고, 표면에서도 크랙이 관찰되지 않았다(Fig. 3(c)). 하지만, 이후에 변형이 더 가해지게 되면, 크랙이 형성되고 이에 따라 전기 저항이 증가하기 시작한다. 계속된 변형 사이클에 의해 크랙이 전파되고 합쳐지면서 전기 저항은 계속해서 증가하

Fig. 3. (a), (b) Electrical resistance change during cyclic bending and (c) damage evolution²⁷⁾.

Fig. 4. (a) Resistivity change as a function of bending cycles (b) Log-log plot of resistivity change (c) Universal curves obtained by dimensional analysis²⁷⁾.

게 된다. 이처럼 금속 전극의 피로 수명은 전기 저항의 변화를 통해 관찰할 수 있다.

금속 박막의 일반적인 피로 파괴 거동은 벌크 재료의 피로 수명식으로 잘 알려진 다음의 Coffin-Manson식으로 표현할 수 있다.^{30,31)}

$$\Delta\epsilon_f/2 = \epsilon'_f (2N)^c \quad (2)$$

여기서 ϵ_f 는 소성 변형률 진폭, ϵ'_f 피로 연성 계수, $2N$ 는 파괴까지의 반복 변형 사이클수, c 는 피로 연성 지수로 나타낸다. 주로 벌크 금속 재료의 경우 c 는 $-0.5 \sim -0.7$ 의 값을 가지고, 금속 박막의 경우 $-0.2 \sim -0.4$ 사이의 값을 가지는 것으로 알려져 있다.^{19,21,32)}

기계적 변형 조건에 따라 변형률이 일정한 상황일지라도 피로 수명은 달라질 수 있다. Fig. 4는 다양한 굽힘 변형 조건에서 전기 저항 변화를 나타내고 있다. 굽힘 변형 실험 시, 가해지는 변형률을 일정한 값으로 유지했음에도, 변형이 가해지는 면적이 증가함에 따라 전기 저항이 더 크게 증가하고, 크랙이 더 빨리 발생했다. 이는 변형

Fig. 5. (a) Arc-type interconnect³⁴⁾ and (b) non-coplanar mesh³⁵⁾.

이 일어나는 영역이 넓어짐에 따라 확률적으로 최악 고리 모델(weakest link model)을 따라 최초 파괴가 더 빨리 일어나기 때문이다.³³⁾ 이 경우에 영향을 미치는 변형률, 변형 조건 등을 차원 해석법을 통해 Fig. 4(b)와 같이 모델링 함으로써, 최종적으로 Fig. 4(c)와 같은 통합식(universal curve)를 얻을 수 있다.²⁷⁾ 이를 통해 각 변형 조건에서 피로 수명을 전기적 특성 측면에서 효과적으로 정확하게 예측할 수 있다. 또한 이 수식에서 주목할 점은 전기 저항 변화가 크랙 형성 사이클(nucleation cycle)에 크게 영향을 받는다는 점이다. 즉, 피로 수명을 향상시키기 위해서는 크랙의 전파보다는 형성(nucleation) 단계를 제어하는 것이 더 효과적이라는 것을 의미한다.

4. 금속 전극의 신뢰성 향상 방법

금속 전극의 기계적 변형 시 안정성을 향상시키기 위해 많은 방법들이 개발되고 있다. Fig. 5(a)와 (b)는 소자 사이의 배선을 물결 무늬(wavy) 형태로 제작함으로써 기계적 변형성을 높이는 방법을 보여주고 있다.³⁴⁾ 또한 금속 박막에 주름이 잡힌 형태(wrinkle)³⁵⁾, 혹은 말발굽 모양의 S자 형태로 배선을 형성함으로써 더 큰 변형률까지 안정적으로 유지할 수 있는 구조들이 제시되고 있다.³⁵⁻³⁸⁾ 최근 금속 전극에 나노홀(nanohole)을 형성함으로써 신뢰성을 획기적으로 향상시키는 기술이 개발되었다.³⁹⁾ 플라즈마 공정을 통해 폴리머 기판 상에 나노 돌기들을 균일하게 형성하고, 구리 박막을 증착하면, 증착 중 shadow

Fig. 6. Resistance change of conventional evaporated film and nanohole electrode ³⁹⁾.

효과에 의해 나노 돌기 주변으로 나노홀이 균일하게 형성된다. 형성된 나노홀 전극의 초기 저항은 나노홀에 의한 산란 효과 때문에 일반 금속 전극 대비 약 30% 정도 더 크게 나타났다. 이후 나노홀 전극과 일반 전극의 신뢰성 실험 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 일반 전극의 경우, 신뢰성 실험 후 피로 파괴 현상에 의해 전기 저항이 300% 이상 증가 한데 비해, 나노홀 전극의 경우 피로 파괴가 관찰되지 않았고, 전기 저항 변화 또한 10% 이하에 머물렀다. 이처럼 나노홀 구조에서 신뢰성이 획기적으로 증가한 이유는, 일반 전극에서는 전위의 집적 현상에 의해 피로 파괴가 발생하지만, 나노홀 전극에서는 전위들이 나노홀 표면으로 분산되면서 집적이 일어나지 않았기 때문이다. 또한 변형 시 형성된 크랙들도 나노홀의 둥근 모양에 의해 더 이상 전파되지 않고, 짧은 형태로 남아 있게 되어, 크랙의 전파를 막았고 결과적으로 우수한 신뢰성 특성을 나타내고 있다.

5. 결 론

유연성 소자의 실현화를 위해 많은 연구자들이 고성능 소자의 개발, 고생산성 공정 개발을 위해 노력하고 있다. 이에 못지 않게 중요한 것이 유연성 전자 소자의 신뢰성 확보이다. 기존 실리콘 전자 소자와는 다르게 유연성 소자에는 직접적으로 기계적 변형이 가해질 것이고, 다양한 크기와 모드의 변형에 따라 여러 가지 신뢰성 문제가 발생할 것이다. 본 논문에서는 현재까지 진행된 금속 전극 신뢰성 문제에 대해 살펴보고, 이러한 문제의 원인과 이를 해결 할 수 있는 방안을 소개하였다. 향후 금속 전극의 신뢰성은 물론 다양한 소자의 신뢰성 연구 방법 표준화 및 여러 가지 변형 조건에서 체계적인 신뢰성 연구가 필요할 것으로 예상되며, 최종적으로는 신뢰성 문제를 해결할 수 있는 재료와 구조의 개발이 절실할 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. B. Lahey, A. Girouard, W. Bursleson, R. Vertegaal, "Paper-Phone: Understanding the Use of Bend Gestures in Mobile Devices with Flexible Electronic Paper Displays.", Proc. of CHI '11, ACM, 1303 (2011).
2. D. H. Kim, N. Lu, R. Ma, Y. S. Kim, R. H. Kim, S. Wang, J. Wu, *et al.*, "Epidermal electronics", Science, 333, 838 (2011).
3. L. Hu, J. W. Choi, Y. Yang, S. Jeong, F. La Mantia, L. F. Cui and Y. Cui, "Highly conductive paper for energy-storage devices", Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 106, 21490 (2009).
4. K. T. Nam, D. W. Kim, P. J. Yoo, C. Y. Chiang, N. Meethong, P. T. Hammond, Y. M. Chiang, A. M. Belcher, "Virus-Enabled Synthesis and Assembly of Nanowires for Lithium Ion Battery Electrodes", Science, 312, 885 (2006).
5. J. H. Ahn, H. Lee, S. H. Choa, "Technology of flexible semiconductor/memory device", J. Microelectron. Packag. Soc., 20(2), 1 (2013).
6. J. M. Paik, H. Park, Y. C. Joo, "Effect of low-k dielectric on stress and stress-induced damage in Cu interconnects", Microelectron. Eng., 71, 348 (2004).
7. J. M. Paik, K. C. Park, H. Park, Y. C. Joo, "Effect of dielectric materials on stress-induced damage modes in damascene Cu lines", J. Appl. Phys., 97, 104513 (2005).
8. S. J. Hwang, Y. D. Lee, Y. B. Park, J. H. Lee, C. O. Jeong, Y. C. Joo, "In situ study of stress relaxation mechanisms of pure Al thin films during isothermal annealing", Scripta Mater., 54, 1841 (2006).
9. S. J. Hwang, J. H. Lee, C. O. Jeong, Y. C. Joo, "Effect of film thickness and annealing temperature on hillock distributions in pure Al films", Scripta Mater., 56, 17 (2007).
10. S. R. Forrest, "The path to ubiquitous and low-cost organic electronic appliances on plastic", Nature, 428, 911 (2004).
11. G. Wang, X. Sun, F. Lu, H. Sun, M. Yu, W. Jiang, C. Liu, J. Lian, "Flexible Pillared Graphene-Paper Electrodes for High-Performance Electrochemical Supercapacitors", Small, 8, 452 (2012).
12. H. Chang, G. Wang, A. Yang, X. Tao, X. Liu, Y. Shen, Z. Zheng, "A Transparent, Flexible, Low-Temperature, and Solution-Processible Graphene Composite Electrode", Adv.

- Funct. Mater., 20, 2893 (2010).
13. B. H. Lee, S. H. Park, H. Back, K. Lee, "Novel Film-Casting Method for High-Performance Flexible Polymer Electrodes", *Adv. Funct. Mater.*, 21, 487 (2011).
 14. M. Vosgueritchian, D. J. Lipomi, Z. Bao, "Highly Conductive and Transparent PEDOT:PSS Films with a Fluorosurfactant for Stretchable and Flexible Transparent Electrodes", *Adv. Funct. Mater.*, 22, 421 (2012).
 15. K. S. Kim, Y. Zhao, H. Jang, S. Y. Lee, J. M. Kim, J. H. Ahn, P. Kim, J. Y. Choi, B. H. Hong, "Large-scale pattern growth of graphene films for stretchable transparent electrodes", *Nature*, 457, 706 (2009).
 16. N. Lu, X. Wang, Z. Suo, J. Vlassak, "Failure by simultaneous grain growth, strain localization, and interface debonding in metal films on polymer substrates", *J. Mater. Res.*, 24, 379 (2009).
 17. N. Lu, Z. Suo, J. Vlassak, *Acta Mater.* "The effect of lm thickness on the failure strain of polymer-supported metal lms", 58, 1679 (2010).
 18. S. Suresh, *Fatigue of materials*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press (1999).
 19. G. E. Dieter, *Mechanical metallurgy*. London: McGraw-Hill Book Company (1988).
 20. R. Schwaiger, G. Dehm, O. Kraft, "Cyclic deformation of polycrystalline Cu films", *Philos. Mag.*, 83, 693 (2003).
 21. X. J. Sun, C. C. Wang, J. Zhang, G. Liu, G. J. Zhang, X. D. Ding, "Thickness dependent fatigue life at microcrack nucleation for metal thin films on flexible substrates", *J. Phys. D: Appl. Phys.* 41. (2008)
 22. G. P. Zhang, C. A. Volkert, R. Schwaiger, P. Wellner, E. Arzt, O. Kraft, *Acta Mater.* "Length-scale-controlled fatigue mechanisms in thin copper lms", 54, 3127 (2006).
 23. D. Wang, C. A. Volkert, O. Kraft, "Effect of length scale on fatigue life and damage formation in thin Cu films", *Mater. Sci. Eng. A*, 493, 267 (2008).
 24. Japanese Industrial Standards (JIS), C5016, (1999.)
 25. The Institute for Interconnecting and Packaging Electronics Circuits (IPC) Standards, TM-650, (1996).
 26. B. J. Kim, M. H. Jung, S. H. Hwang, H. Y. Lee, S. W. Lee, K. D. Chun, Y. B. Park, Y.C. Joo "Relationship between tensile characteristics and fatigue failure by folding or bending in Cu foil on flexible substrate", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 18(1), 55 (2011).
 27. B. J. Kim, H. A. S. Shin, S. Y. Jung, Y. Cho, O. Kraft, I. S. Choi, Y. C. Joo, "Crack nucleation during mechanical fatigue in thin metal films on flexible substrate" *Acta Mater.*, 61, 3473 (2013).
 28. S. Jung, S. Lee, M. Song, D. G. Kim, D. S. You, J. K. Kim, C. S. Kim, T. M. Kim, K. H. Kim, J. J. Kim, J. W. Kang, "Extremely Flexible Transparent Conducting Electrodes for Organic Devices" *Adv. Energy Mater.*, in press. (2013)
 29. P.A. Gruber, E. Arzt, R. Spolenak, "Brittle-to-ductile transition in ultrathin Ta/Cu film systems", *J. Mater. Res.*, 24, 1906 (2009).
 30. L. F. Coffin, *Trans ASME*, 76, 931 (1954).
 31. S. S. Manson. Report 1170. Cleveland (OH): Lewis Flight Propulsion Laboratory (1954).
 32. O. Kraft, R. Schwaiger, P. Wellner, "Fatigue in thin lms: life-time and damage formation", *Mater. Sci. Eng. A*, 319, 919 (2001).
 33. W. Weibull, *J. Appl. Mech. – Trans. ASME*, 18, 293 (1951).
 34. D. H. Kim, J. H. Ahn, W. M. Choi, H. S. Kim, T. H. Kim, J. Song, Y. Y. Huang, Z. Liu, C. Lu, J. A. Rogers, "Stretchable and Foldable Silicon Integrated Circuits", *Science*, 320, 507 (2008).
 35. D. H. Kim, Z. Liu, Y. S. Kim, J. Wu, J. Song, H. S. Kim, Y. Huang, K. C. Hwang, Y. Zhang, J. A. Rogers, "Optimized Structural Designs for Stretchable Silicon Integrated Circuits", *Small*, 5(24), 2841 (2009).
 36. S. P. Lacour, S. Wagner, Z. Huang, Z. Suo, "Stretchable gold conductors on elastomeric substrates", *Appl. Phys. Lett.*, 82, 2404 (2003).
 37. B. Y. Ahn, E. B. Duoss, M. J. Motala, X. Guo, S. I. Park, Y. Xiong, J. Yoon, R. G. Nuzzo, J. A. Rogers, J. A. Lewis, "Omnidirectional printing of flexible, stretchable, and spanning silver microelectrodes", *Science*, 323, 1590 (2009).
 38. R. Carta, P. Jourand, B. Hermans, J. Thoné, D. Brosteaux, T. Vervust, F. Bossuyt, F. Axisa, J. Vanfleteren, R. Pueres, "Design and implementation of advanced systems in a flexible-stretchable technology for biomedical applications", *Sens. and Actuators A*, 156, 79 (2009).
 39. B. J. Kim, Y. Cho, M. S. Jung, H. A. S. Shin, M. W. Moon, H. N. Han, Y. C. Joo, I. S. Choi, "Fatigue-free, electrically reliable copper electrode with nanohole array", *Small* 2012, 8, 3300.

- 김 병 준 (金秉俊)
- Karlsruhe Institute of Technology
- 고신뢰성 유연소자 개발
- e-mail: byoung-joon.kim@kit.edu