# PI 기판에 전사된 단결정 실리콘 박막의 유연 신뢰성

# Reliability of single crystal silicon film transferred on PI substrate

*은경태 [1], #좌성훈 [1], 황우진 [1], 최현주 [2], 김재현 [2]

*K. T. Eun[1], #S. H. Choa(shchoa@snut.ac.kr)[1], W. J. Hwang[1], H. J. Choi[2] ,J. H. Kim[2]

[1] 서울산업대학교 NID 융합대학원, [2] 한국기계연구원 나노융합기계연구본부

Key words : Silicon film, Bendability, Stretchability, Transfer Printing

## 1. 서론

최근 유연 전기전자 소자에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 가령 OLED, e-paper, skin 센서 등이 있다. 이러한 소자를 제작하는 기술도 다양하게 제시되고 있으며 잉크젯 프린팅, 그라비어(gravure) 프린팅 기술, 롤투롤 프린팅 기술 등 매우 다양한 방법이 제시되고 있다. 이러한 기술은 유기재료를 기반으로 하는 기술로서 유연성과 저가격 등의 이점이 있다. 그러나 이러한 유기재료를 기반으로 하는 기술은 실리콘을 기반으로 하는 기존의 반도체 기술에 비하여 아직까지 전기적 특성 및 신뢰성 측면에서 매우 열악한 실정이며, 상용화에 이르기 까지는 여러 난제를 극복해야 되는 문제가 있다. 이러한 문제에 대한 하나의 대안으로서 기존의 나노 및 마이크로 스케일의 실리콘 소자를 유연 폴리머 기판에 부착하여 유연성을 갖게 함과 동시에 실리콘 소자가 갖는 기존의 여러 장점은 그대로 유지하고자 하는 기술이 활발히 연구되고 있으며, 이러한 기술을 transfer printing 기술이라고 한다. Transfer printing 기술은 Rogers 그룹[1]에서 처음 개발이 되었고, TFT 소자[2], RF 소자, LED 소자 및 Image 센서[3] 등 다양한 소자들이 이 기술을 이용하여 제작된 바 있다. Transfer printing 기술을 적용함에 있어서 해결해야 될 문제는 실리콘이나 $SiO_2$ 와 같은 무기재료들은 매우 brittle 하여 약 1%의 변형률 (strain)에도 쉽게 파괴된다는 것이다. 이런 문제점을 해결하기 위하여 wavy 패턴을 적용하여 stretchability 를 개선하고, 약 5%의 인장 변형에도 신뢰성이 확보됨을 보였다. 그러나 유연소자는 인장 변형 보다는 굽힘 변형에 대한 신뢰성이 더 중요하다. 단결정 실리콘 박막은 brittle 한 재료로서 연신율은 약 0.82% 이다[4]. 그러나 단결정 실리콘을 마이크로/나노 두께의 박막으로 thinning 할 경우 유연성이 증가하게 된다. 본 논문에서는 나노 두께의 단결정 실리콘 박막을 transfer printing 기술을 이용하여 폴리머 기판에 부착시킨 후 굽힘 및 인장 시험을 통하여 단결정 실리콘 박막의 flexibility 와 stretchability 의 개선 효과를 연구하였다.

## 2. 단결정 실리콘 박막의 제작 및 전사

본 논문에서는 유연 기판으로 전사된 단결정 실리콘 박막의 유연 신뢰성을 측정하기 위해 Fig. 1 과 같이 단결정 실리콘 박막의 제작, 전사공정을 진행하였다. 전사공정을 용이하게 하기 위하여 SOI (silicon on insulator) 웨이퍼의 400nm 두께를 가지는 $SiO_2$ 층을 buffer layer 로 이용하였다. 200nm 두께의 Si 박막층에 홀 지름 10um, 홀 피치 50um 의 홀 타입 패턴과 너비 5um, 길이 95um 의 stripe 타입 패턴을 각각 설계하여 RIE 공정을 이용하여 에칭 하였다. 실리콘 박막의 크기를 각 10×10mm 로 하여 다이싱 한 후 전사 공정을 위하여 SOI wafer 를 49% HF 에 담구어 buffer layer 인 $SiO_2$ 를 wet 에칭 하였다. 제작된 실리콘 박막의 전사는 PDMS (poly-dimethylsiloxane) stamp 를 이용하여 진행하였다. 유연기판의 재료는 두께 50um, 크기 20×20mm 의 PI(polyimide)를 사용하였다. PI 와 실리콘 박막 사이의 접착제는 NOVA 61 UV adhesive 를 사용하였다. Fig. 2 는 PI 기판에 전사된 홀 타입 단결정 실리콘 박막의 SEM 사진 이미지를 보여주고 있다.

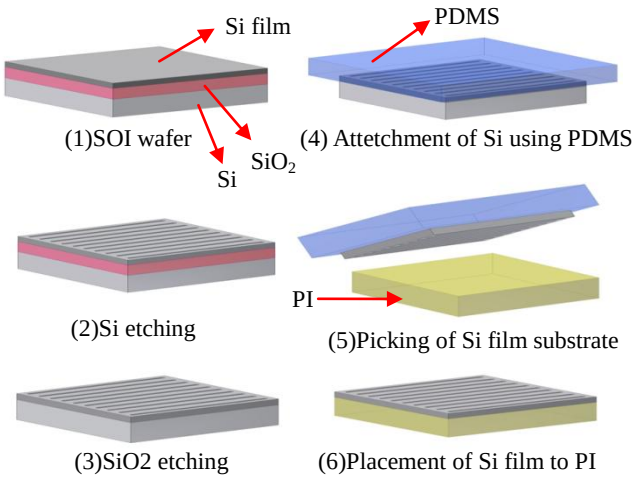
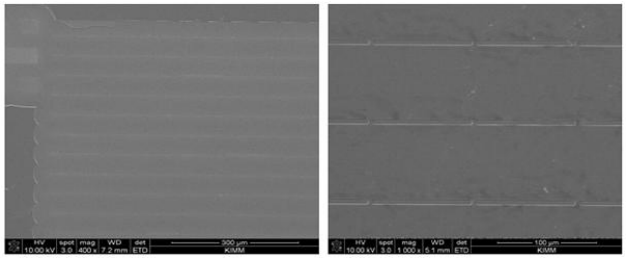
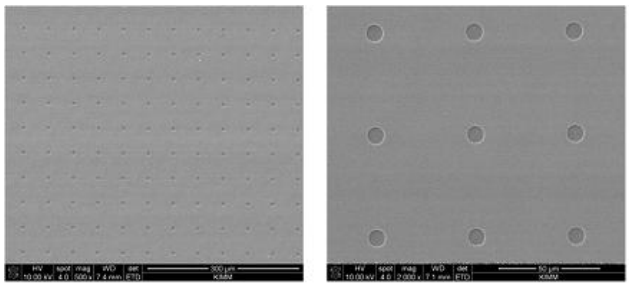



Fig. 1 Fabricating and printing method of crystal Si film



(a) stripe type



(b) hole type

Fig. 2 SEM image of single crystal silicon film on PI substrate

## 3. 단결정 실리콘 박막의 유연 신뢰성

본 연구에서는 PI 기판 위에 전사된 단결정 실리콘 박막의 유연 신뢰성을 확인하기 위하여 굽힘 시험과 인장 시험을 각각 진행하였다. PI 기판에 전사된 실리콘 박막을 Fig. 3 에 나타내어진 것과 같이 자체 제작한 신뢰성 장비에 장착한 후 시험을 실시하였다. 실리콘 박막의 측정은 광학 현미경을 이용하여 실리콘 박막의 형상을 관

찰하는 방식으로 진행하였다. 본 연구에서는 굽힘 반경 및 굽힘 시 발생하는 인장률을 Rogers 그룹[5]에서 제안한 다음 식을 적용하여 계산하였다. 시험 시 인장 및 굽힘 속도는 0.02mm/s 로 진행하였다.

$$R_{nom} = \frac{L}{2\pi\sqrt{\frac{dL}{L} - \frac{\pi^2 h_s^2}{12L^2}}} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{nom} = \frac{h_s}{2R_{nom}} \quad (2)$$

Table 1 은 굽힘 시험 및 인장 시험 결과 수치를 나타내고 있다. 굽힘 시험 결과 홀 타입의 경우 곡률 반경이 7.5mm 에서 크랙이 발생하였으며, 이 때 실험을 중단하였다. Fig. 4 는 단결정 실리콘 박막의 크랙 발생 형상을 광학 현미경으로 촬영한 이미지이다. 크랙은 홀 부위에서 발생하기 시작하였다. 이 때의 인장률은 0.33%로 계산되었다. Stripe 타입 실리콘 박막의 크랙은 7.4mm 부근으로 홀 타입과 비슷한 곡률 반경 지점에서 나타났다. 홀 타입과 stripe 타입의 미세 패턴에서 과도한 응력이 발생하여 크랙이 발생한 것으로 판단된다. 또한 인장테스트를 진행한 결과 홀 타입은 기판의 인장률 1.8%에서 크랙이 발생하였고, stripe 타입은 인장률 0.5%에서 크랙이 발생하였다.

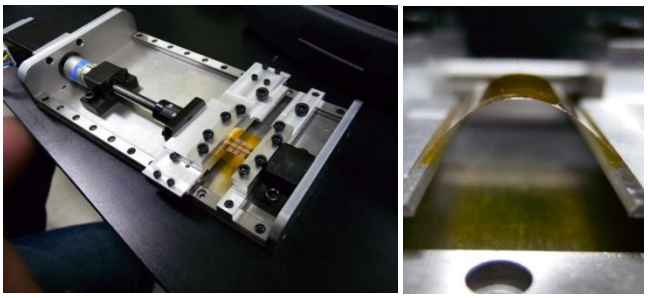
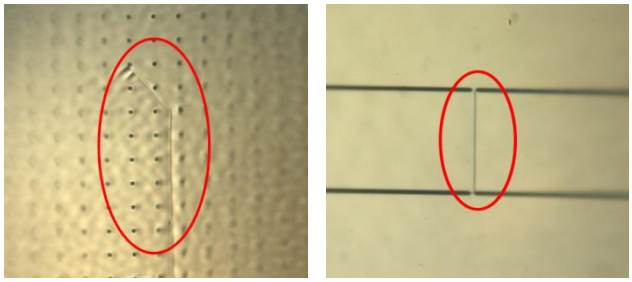


Fig. 3 Bending, stretching test machine



(a) (b)

Fig. 4 Fracture image using optical microscope (a) hole type, (b) stripe type

Table 1 Bending and stretching test result

| Fracture point | | |
|---|---|---|
| | Bending Radius | Stretching Strain |
| hole type | 7.5mm | 1.8% |
| stripe type | 7.4mm | 0.5% |

## 4. 토론

한국 기계연구원의 실험 결과[4]에 의하면 단일 silicon 박막의 인장 변형률이 약 0.8%에서 파괴가 발생하였다. 한편, 본 연구에서 사용한 유연기판에 전사된 홀 타입의 실리콘 박막은 1.8%에서 파괴가 되었다. 이 결과를 적용하여 보면 유연 기판으로 전사된 Si 박막은 유연기판 및 접착제의 영향을 받을 수 있기 때문에 기판의 인장률이 0.8% 이상으로 증가되었다고 판단된다. 가령 폴리머 기판과 실리콘 박막의 사이의 접착제의 완충작용으로 인하여, 기판의 변형률이 실리콘 박막으로 완전히 전달되지 못하였기 때문이라고 판단된다. 반면 stripe 타입은 기판의 인장 변형률이 0.5%일 때 크랙이 발생하였다. Stripe 타입의 브릿지의 크기는 3×5um 로 매우 작기 때문에 작은 인장 변형률에도 불구하고 크랙이 발생하여 실리콘 박막의 stripe 형상에 크랙을 유발하였다고 판단된다.

굽힘 시험의 경우 Rogers 그룹[5]의 data 에 의하면 PET 박막에 전사된 Si 100nm 두께 샘플의 굽힘 시험을 보면 인장률이 약 0.8%에서 파괴가 되었다. 반면 본 연구에서 진행한 실리콘 박막은 굽힘 반경 7.5mm, 인장률 0.33%에서 파괴가 일어났다. 이러한 원인은 본 연구에서 사용한 실리콘 박막의 경우 홀 및 브릿지에서 스트레스가 집중되어 0.33%의 작은 인장률에서 파괴가 되었다고 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 PI 기판에 전사된 단결정 실리콘 박막의 유연 신뢰성에 굽힘 및 인장 실험을 진행하였다. 홀 타입과 stripe 타입의 크랙은 굽힘 곡률 반경 7.5mm 정도에서 크랙이 발생하였다. 인장시험의 경우 홀 타입은 1.8%에서, stripe 타입은 0.5%에서 크랙이 발생하였다. 크랙의 발생은 홀 타입 박막의 홀 부분, stripe 타입 박막의 브릿지 부분에서 발생 하였다. 실리콘 박막의 홀 및 브릿지 부분에서 집중적인 응력이 발생하여 크랙이 발생한 것으로 판단된다. 유연 박막의 신뢰성을 높이기 위해서는 미세 홀 타입이나 브릿지 구조는 가급적 피하는 것이 바람직하다고 판단된다.

## 후기

본 연구는 지식경제부, 산업원천기술개발산업의 일환인 "3 차원 멀티스케일 구조물 제작기술 개발"의 지원에 의한 것입니다.

## 참고문헌

1. D, Kim, et al., "Stretchable and Foldable Silicon Integrated Circuits," Science, 200, 507-511, 2008.
2. J.-H. Ahn, H.-S. Kim, K.J. Lee, Z. Zhu, E. Menard, R.G. Nuzzo and J.A. Rogers, “"High Speed, Mechanically Flexible Single-Crystal Silicon Thin-Film Transistors on Plastic Substrates,”" IEEE Electron Device Letters, 27(6) 460-462, 2006.
3. S, Park, et al., "Printed Assemblies of Inorganic Light-Emitting Diodes for Deformable and Semitransparent Displays", Science, 325, 977-981, 2009.
4. 이상주, 한승우, 김재현, 이학주, “단결정 실리콘 박막의 미소인장 물성 평가,” 한국정밀공학회 추계학술대회, 45-49, 2009.
5. S-I, Park, et al., “Theoretical and Experimental Studies of Bending of Inorganic Electronic Materials on Plastic Substrates, Adv. Funct. Mater, 18, 2673–2684, 2008