

## 전사방법을 이용한 폴리머 필름에 내재된 실리콘 나노구조물 어레이 제작

신호철<sup>a</sup>, 이동기<sup>b</sup>, 조영학<sup>a\*</sup>**Fabrication of a Silicon Nanostructure Array Embedded in a Polymer Film by using a Transfer Method**Hocheol Shin<sup>a</sup>, Dong-Ki Lee<sup>b</sup>, Younghak Cho<sup>a\*</sup><sup>a</sup> Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science & Technology, 232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea<sup>b</sup> Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul National University of Science & Technology, 232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea**ARTICLE INFO***Article history:*

Received	27	January	2016
Revised	14	February	2016
Accepted	14	February	2016

*Keywords:*

Nanostructure array  
Transfer method  
Hot-embossing  
Embedded structure

**ABSTRACT**

This paper presents a silicon nanostructure array embedded in a polymer film. The silicon nanostructure array was fabricated by using basic microelectromechanical systems (MEMS) processes such as photolithography, reactive ion etching, and anisotropic KOH wet etching. The fabricated silicon nanostructure array was transferred into polymer substrates such as polymethyl methacrylate (PMMA), polyethylene terephthalate (PET), and polycarbonate (PC) through the hot-embossing process. In order to determine the transfer conditions under which the silicon nanostructures do not fracture, hot-embossing experiments were performed at various temperatures, pressures, and pressing times. Transfer was successfully achieved with a pressure of 1 MPa and a temperature higher than the transition temperature for the three types of polymer substrates. The transferred silicon nanostructure array was electrically evaluated through measurements with a semiconductor parameter analyzer (SPA).

**1. 서론**

1차원 구조의 실리콘 나노와이어를 포함한 나노구조물은 부피 대비 넓은 표면적을 가지기 때문에 고효율의 광 검출 센서, 가스 센서, 태양 전지, 바이오 센서 등의 소자를 제작하는데 사용되고 있다<sup>[1-3]</sup>. 일반적으로 실리콘 나노구조물의 제작을 위해서는 전자 빔 리소그래피(E-beam lithography) 공정이나 에피택시 성장(epitaxial growth) 공정 등의 복잡한 공정이나 높은 비용이 요구된다. 따라서 이를 극복하기 위한 다양한 나노구조물 제작 방법들

이<sup>[4,5]</sup> 제안되었으며, 우리의 이전 연구에서도<sup>[6]</sup> 비교적 간단하게 나노구조물을 제작할 수 있는 방법을 제안하였다. 이 방법은 습식 식각 공정을 이용하면 일정하게 정렬된 실리콘 나노구조물을 간단한 MEMS 공정만을 이용하여 고세장비의 형상을 제작할 수 있으며, 높은 재현성을 보인다는 장점이 있다.

최근에 광 센서의 경우 광 흡수나 반사를 억제할 수 있는 투명한 기관 및 투명한 전극을 이용한 소자의 연구<sup>[7-9]</sup>가 이루어지고 있으며, 바이오 센서의 경우 실리콘 나노구조물 배열을 폴리머 채널에 접합시켜 제작한 소자의 연구가 이루어지고 있다<sup>[10]</sup>.

\* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6361

Fax: +82-2-974-8270

E-mail address: yhcho@seoultech.ac.kr (Younghak Cho).

기존의 연구에서는 나노구조물이 포함된 용액을 기판 위에 스핀 코팅한 후 용액을 증발시켜 나노구조물을 기판 위에 전사하거나 복잡한 공정을 통해 공중에 뜬 나노구조물을 제작한 후 접착성 기판 위에 부착하는 방법을 사용하여 나노구조물을 전사하였다<sup>[10,11]</sup>. 하지만 이는 기판의 표면 위에 나노구조물이 랜덤하게 배열되기 때문에 소자 제작의 재현성이 떨어지며, 기판과 나노구조물의 접착력이 낮기 때문에 기계적 안정성이 낮은 단점이 존재한다. 따라서 높은 재현성을 유지하며 기계적 안정성을 확보할 수 있는 나노구조물의 새로운 전사 방법을 위한 연구가 여전히 필요하다.

PMMA, PET, PC 등의 고분자 고체는 낮은 비용, 낮은 부식률, 가벼운 무게에 비해 높은 강도, 높은 전기적 저항, 높은 광 투과성, 유연성, 복잡한 모양 형성의 용이, 낮은 제조비용과 같은 차별되는 특성으로 인해 응용 재료로서 많은 분야에서 사용되고 있다<sup>[12,13]</sup>. 또한 이러한 특성을 활용할 수 있도록 나노구조물의 전사를 위한 기판으로 사용한다면 나노구조물의 장점과 폴리머 기판의 장점을 모두 이용할 수 있는 소자의 제작이 가능할 것으로 기대된다.

본 연구에서는 단결정 실리콘 웨이퍼 위에 포토리소그래피(photolithography) 공정, 반응성 이온 식각(RIE: reactive ion etching) 공정과 실리콘의 이방성 습식 식각을 이용한 일반적인 MEMS 공정으로 효율적인 실리콘 나노구조물 어레이를 제작하였다. 제작된 실리콘 나노구조물 어레이는 위에 언급한 폴리머 기판 내부에 핫엠보싱(hot-embossing) 공정을 이용하여 전사하였다. 이렇게 전사된 실리콘 나노구조물은 무작위 배열이 아닌 정렬된 배열을 유지하였으며, 폴리머 기판 표면 위의 부착 형태가 아닌 내부에 전사되어 실리콘 기판으로부터 분리하고 고정을 동시에 수행함으로써 기계적 안정성을 높일 수 있었다.

## 2. 본 론

### 2.1 실리콘 나노구조물의 기하학적 변수

Fig. 1에 폴리머로 전사되는 실리콘 나노구조물 어레이의 기하학적 변수를 도시하였다. a는 나노구조물의 폭(width of nanostructure), b는 나노구조물의 높이(height of nanostructure)를 나타낸다. 핫엠보싱 공정을 이용하여 실리콘 나노구조물을 폴리머 내부에 삽입한 후 분리의 실리콘 기판과 실리콘 나노구조물

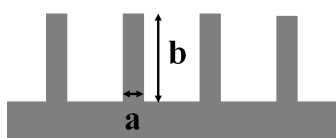


Fig. 1 Schematic view of silicon nanostructure array (a: width of silicon nanostructure, b: height of silicon nanostructure)

사이 단면의 파단은 종횡비의 영향을 받는다. 따라서 종횡비 조건을 달리하며 전사 실험을 진행하였으며 그 결과는 Table 1과 같다. 종횡비가 1:5, 1:6, 1:7, 1:8이 되도록 실리콘 나노구조물을 제작한 후 PMMA, PET, PC 폴리머 기판으로 전사를 진행하였다. 전사가 이루어지는 실리콘 나노구조물의 개수는 10줄을 기준으로 파악하였다. 이때 종횡비가 클수록 전사 성공률이 높았으며 1:8의 종횡비에서 PMMA, PET 기판에 전사 시 100%의 전사 성공률을 보였고, PC 기판에 전사 시 80% 이상의 전사 성공률을 나타내었다.

### 2.2 실리콘 나노구조물 어레이의 제작

실리콘 나노구조물 어레이를 제작하기 위해 이전 연구<sup>[6]</sup>에서 제안한 나노와이어 제작 방법을 이용하였다. Fig. 2는 제작과정을 도시하고 있으며, 간단히 설명하면 다음과 같다. (100) 4인치 단결정 실리콘 웨이퍼에 감압 화학 기상 증착(LPCVD: low pressure chemical vapor deposition) 공정을 통해 100 nm 두께의 질화막을 증착시켰다 (Fig. 2(a) 참조). 포토리소그래피 공정 및 반응성 이온 식각 공정을 이용하여 구조물 패터닝(patterning)을 수행하였다 (Fig. 2(b) 참조). 다음으로 아세트 용액을 이용하여 남아있는 포토레지스트를 제거한 후, 이방성 습식 식각 공정을 위해 30%의 KOH(potassium hydroxide solution) 용액을 사용하였다 (Fig. 2(c) 참조). KOH 용액의 온도는 54°C로, 분당 200 nm의 이방성 식각률(etching rate; 200 nm/min)을 나타내었다. 이방성 습식 식각 공정이 완료된 실리콘 웨이퍼는 다시 반응성 이온 식각 공정을 이용하여 남아있는 질화막을 제거하였다 (Fig. 2(d) 참조). Fig. 3은 제작된 실리콘 나노구조물 어레이의 전자현미경(SEM: scanning electron microscopy) 사진을 나타내며, 300 nm의 폭과 2.4 μm의 높이를 가지는 고세장비(1:8)의 구조물임을 알 수 있다.

Table 1 Success rate of transfer in accordance with the aspect ratio of the silicon nanostructures

Aspect ratio	1:5	1:6	1:7	1:8
PMMA	90%	100%	100%	100%
PET	5%	10%	50%	100%
PC	5%	10%	40%	80%

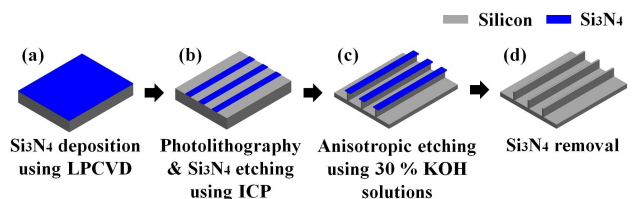


Fig. 2 Schematic view of fabrication process for silicon nanostructure array

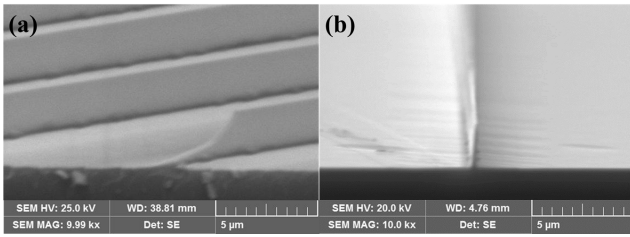


Fig. 3 SEM images of silicon nanostructure array: (a) tilted view, (b) width and height of the silicon nanostructure are 300 nm and 2.4 μm

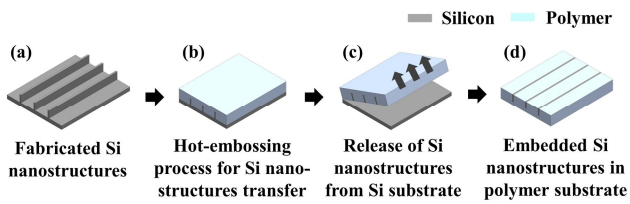


Fig. 4 Schematic view of hot-embossing process for silicon nanostructure transfer

Table 2 Transfer conditions of silicon nanostructures into PMMA

Temperature (°C)	100	110	120	130	140	150	160	
	fail	fail	fail					
Pressure (MPa)	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	
	fail				fail	fail	fail	
Pressing time (sec)	30	60	90	120	150	180	210	240
			fail	fail	fail	fail	fail	fail

### 2.3 핫엠보싱 공정을 이용한 나노구조물 전사

일반적인 MEMS 공정을 이용하여 제작된 고종횡비의 실리콘 나노구조물 어레이는 핫엠보싱 공정을 이용하여 폴리머로의 전사 및 분리가 이루어졌다(Fig. 4). 이 때 사용된 핫엠보싱 장비는 대흥과학사의 D3P-20J로, 상하 개별 온도 제어 및 350°C까지 가열이 가능하다. 폴리머 기판은 모두 1 mm의 동일한 두께를 갖는 PMMA (polymethyl methacrylate), PET(polyethylene terephthalate), PC(polycarbonate) 기판을 사용하였으며, 전사에 필요한 핫엠보싱 공정 조건을 설정하기 위하여 진행한 실험 조건을 Table 2, 3, 4에 도시하였다.

핫엠보싱 공정을 이용하여 실리콘 나노구조물을 폴리머 기판 내부에 전사하기 위해서는 온도, 인가 압력, 압력 인가 시간 조건의 설정이 중요하다. 3종류의 폴리머 기판에 대해서 인가 압력과 압력 인가 시간은 모두 동일한 조건으로 실험을 진행하였다. 즉, 인가 압력은 0.5~5.0 MPa의 범위에서 0.5 MPa 간격으로, 압력 인가 시간은 30~240 초 범위에서 30초 간격으로 변수를 조합하여 실험을 진행하였다. 핫엠보싱을 이용한 구조물의 전사에 있어 중요한 변수인 온도는 각각의 폴리머의 유리전이온도를 고려하여 다음과

Table 3 Transfer conditions of silicon nanostructures into PET

Temperature (°C)	80	90	100	110	120	130	140	
	fail	fail			fail	fail	fail	
Pressure (MPa)	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	
	fail				fail	fail	fail	
Pressing time (sec)	30	60	90	120	150	180	210	240
	fail	fail	fail			fail	fail	fail

Table 4 Transfer conditions of silicon nanostructures into PC

Temperature (°C)	150	160	170	180	190	200		
	fail	fail	fail	fail	fail			
Pressure (MPa)	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	
	fail				fail	fail	fail	
Pressing time (sec)	30	60	90	120	150	180	210	240
			fail	fail	fail	fail	fail	fail

같은 조건에서 실험을 진행하였다. PMMA 기판의 경우 100~160 °C의 범위에 대해 10°C 간격으로, PET 기판에 대해서는 80~120 °C의 범위에서 10°C 간격으로, 마지막으로 PC 기판에 대해서는 150°C부터 200°C의 온도 범위에 대해 10°C 간격으로 실험을 진행하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

폴리머 기판들에 실리콘 나노구조물을 전사하기 위하여 전사 성공률이 가장 높은 1:8 종횡비의 실리콘 나노구조물을 이용하였다. 본 연구에서 사용된 폴리머 기판은 유리전이온도 이상의 온도와 일정 압력에 의해 소성변형이 쉽게 발생하였다. 고 종횡비를 가지는 실리콘 나노구조물은 핫엠보싱 공정을 통해 소성변형 된 폴리머 기판 내부로 삽입된 후, 온도를 낮추게 되면 폴리머 기판에 고정되어 실리콘 기판으로부터 분리가 가능하게 된다.

Fig. 6~8은 폴리머 기판에 실리콘 나노구조물이 전사된 현미경 사진들이다. 폴리머 기판의 유리전이온도 이하에서 핫엠보싱 공정을 진행시 폴리머 기판은 충분한 소성변형이 발생하지 않아 실리콘 나노구조물은 폴리머 기판 내부로 삽입되지 않고 부러지거나 표면 위에 부착되는 현상이 발생하였다. 이로 인해 외부의 약한 물리적 힘에도 실리콘 나노구조물은 쉽게 이탈되거나 파괴(fracture)되는 현상이 발생하였다. 이와 반대로 폴리머의 녹는점 이상의 높은 온도에서 핫엠보싱 공정을 진행시에는 폴리머 기판이 비틀리거나 기판 내부에 기포가 발생하였다. 또한, 핫엠보싱 공정 중 인가되는 적정 압력(optimal pressure) 역시 전사 성공률을 높이기 위한 중요한 변수이다. 1 MPa 이하의 인가 압력에서는 실리콘 나노구조물이 폴리머 기판으로부터 다시 빠져 나오는 현상이 발생하였고,

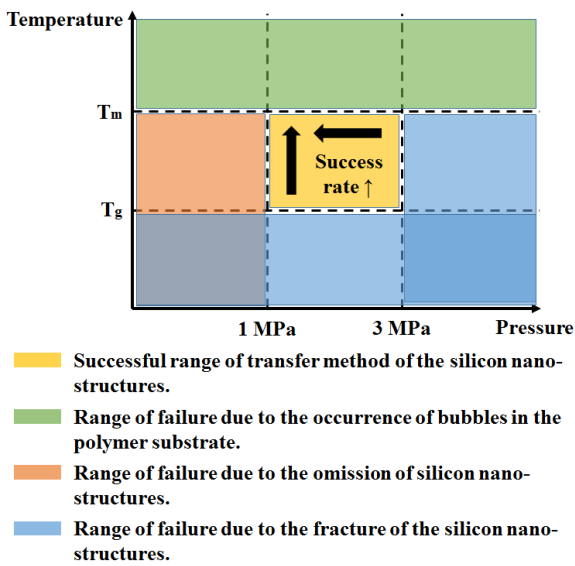


Fig. 5 Schematic view of transfer condition for silicon nanostructure

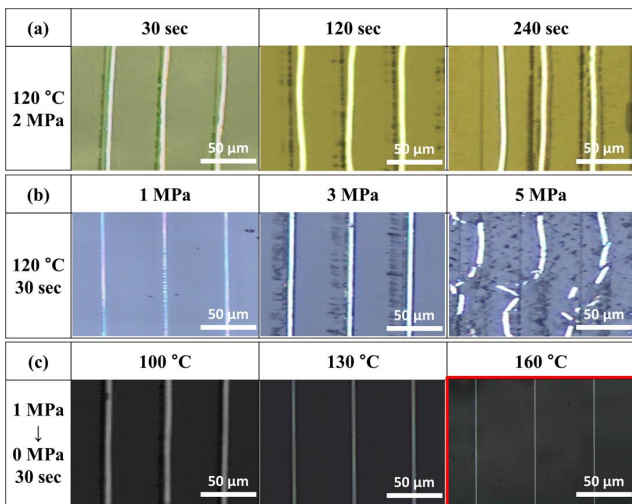


Fig. 6 Microscopic images of the transferred silicon nanostructures into PMMA according to (a) pressing time, (b) pressure, (c) temperature

3 MPa 이상의 높은 인가 압력에서는 실리콘 나노구조물의 파괴가 발생하였다. 본 연구에서는 PMMA, PET, PC의 폴리머 기판에 실리콘 나노구조물을 전사하기 위하여 3 가지 기판 모두 약 1 MPa의 적정 인가 압력과 각각의 폴리머 기판의 유리전이온도보다 높은 온도(30~50°C)에서 핫엠보싱 공정을 진행하였을 때 전사 성공률이 가장 높게 나타났다.

Fig. 6(a)는 PMMA 기판의 유리전이온도(105°C)보다 높은 120°C의 온도와 2 MPa의 압력을 인가하면서 압력 인가 시간을 변경한 실험 결과들이다. 실리콘 나노구조물은 폴리머 기판 내부에 삽입되지 않고 기판 표면 위에 실리콘 나노구조물의 높이 방향으로 눕혀진 형상으로 놓여 있다. 압력 인가 시간이 길어질수록 폴리머

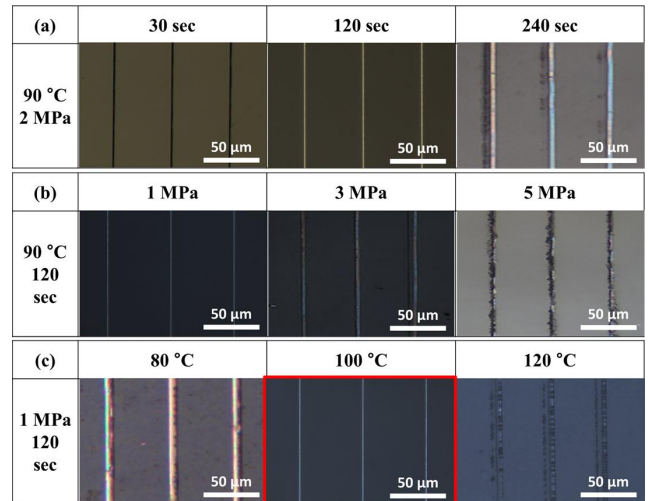


Fig. 7 Microscopic images of the transferred silicon nanostructures into PET according to (a) pressing time, (b) pressure, (c) temperature

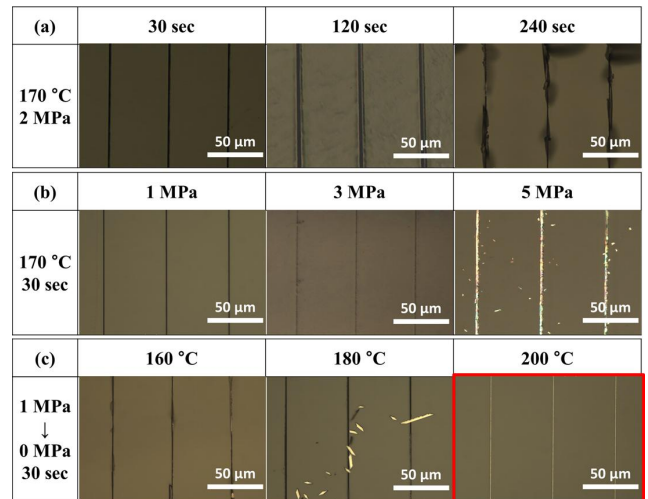


Fig. 8 Microscopic images of the transferred silicon nanostructures into PC according to (a) pressing time, (b) pressure, (c) temperature

기판이 열과 압력에 의해 소성변형이 진행되어 늘어나면서 실리콘 나노구조물의 위치 이탈이 발생하였다. 이로부터 기판의 소성 변형을 줄일 수 있도록 짧은 압력 인가 시간이 필요함을 알 수 있었다. 온도와 압력 인가 시간을 120°C, 30초로 고정하고 인가 압력의 크기를 변경하며 전사 실험을 진행하였을 경우에도 모든 시편에서 실리콘 나노구조물의 삽입이 이루어지지 않고 표면에 눕혀져 있었다 (Fig. 6(b) 참조). 이는 PMMA 기판의 충분한 소성변형 되기에 앞서 실리콘 나노구조물이 PMMA 기판 내부로 삽입되어 공정 중에 실리콘 기판으로부터 분리가 되었기 때문으로 판단된다. 또한 인가 압력이 1 MPa보다 높은 조건(3 MPa 이상)에서는 실리콘 나노구조물의 파괴가 발생하였다. 이러한 결과로부터 120°C 이상의 온도와 1 MPa의 인가 압력, 30초의 압력 인가 시간의 필요성을

알 수 있었다. Fig. 6(c)는 1 MPa의 인가 압력과 30초 동안의 인가 압력 시간으로 핫엠보싱을 수행 후 곧바로 상압으로 떨어뜨리는 조건 하에서 온도 변화에 따른 전사 실험 결과를 나타낸다. PMMA 기판의 유리전이온도 이하인 100°C의 조건에서는 실리콘 나노구조물의 삽입이 이루어지지 않았고, 130°C의 조건에서도 실리콘 나노구조물이 충분히 삽입되지 못하고 기울어진 형상이 발생하였다. 반면, 160°C의 온도에서 인가 압력을 1 MPa에서 30초 동안 가한 후 바로 상압으로 떨어뜨리는 조건에서는 실리콘 나노구조물이 PMMA 기판 내부로 완전하게 삽입되어 전사가 성공적으로 이루어졌다(전사 성공률: 100%). 전사가 완료된 PMMA 기판은 소성변형으로 두께가 줄어 약 300  $\mu\text{m}$ 의 얇은 필름 형태로 변화하였다.

Fig. 7(a)에서 PET 기판(유리전이온도 70°C)의 경우 PMMA 및 PC 기판과 달리 30초의 압력 인가 시간에 대해 전사가 이루어지지 않고 핫엠보싱 공정 완료 시 PET 기판으로부터 실리콘 나노구조물이 다시 빠져 나오는 현상이 발생하였다. 이는 PET 기판의 탄성계수(2.8~3.5 GPa)가 PMMA(2.1~3.1 GPa) 및 PC(2.3~2.4 GPa) 기판이 가지는 탄성계수보다 높아<sup>[14]</sup> 실리콘 나노구조물이 충분히 삽입되었음에도 불구하고 인가 압력이 제거되면 다시 밀려나오기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 이를 해결하기 위해 압력 인가 시간을 늘리거나 온도를 높여 실험을 진행하였다. 먼저 압력 인가 시간을 120초 이상으로 충분히 길게 한 경우 구조물이 다시 빠져 나오는 현상을 방지할 수 있었으나, 온도를 높여 120°C에서 핫엠보싱을 수행한 경우에는 오히려 전사가 이루어지지 않았다. 이는 실험에 사용된 PET 기판이 미결정화 PET의 한 종류인 A-PET로 인해, PET의 유리전이온도보다 높은 120°C에서 결정화가 진행되었기 때문인 것으로 판단된다. 즉, PET 기판의 백색화 및 경화로 인해 PET 기판으로 실리콘 나노구조물이 삽입이 되지 않고 파괴가 발생한 것으로 보인다.

PC 기판의 경우에도 Fig. 8에서 보이는 바와 같이 실리콘 나노구조물의 상당 부분이 다시 빠져 나왔다. 이는 PC의 경도(115 MPa)가 PMMA(179 MPa)와 PET(167 MPa) 보다 낮아<sup>[15-17]</sup> 상온에서의 유연성이 PMMA, PET 기판에 비해 PC 기판이 크기 때문에 실리콘 나노구조물과 PC 기판의 분리 시 실리콘 나노구조물의 더욱 쉽게 빠져나오는 것으로 판단된다. 따라서 200°C의 높은 온도에서 핫엠보싱 공정을 진행하여 PC 기판으로 실리콘 나노구조물의 충분한 전사가 이루어진 후, 상온으로 냉각하여 실리콘 나노구조물을 분리시켰다.

본 연구에서는 전사 실험을 통하여 3 종류의 폴리머 기판 내부에 실리콘 나노구조물을 전사시키기 위해서 폴리머 기판이 가지는 유리전이온도보다 30~40°C 이상의 온도와 1 MPa의 적정 인가 압력, 30초의 압력 인가 시간(PET 기판의 경우 120초)이 필요하다

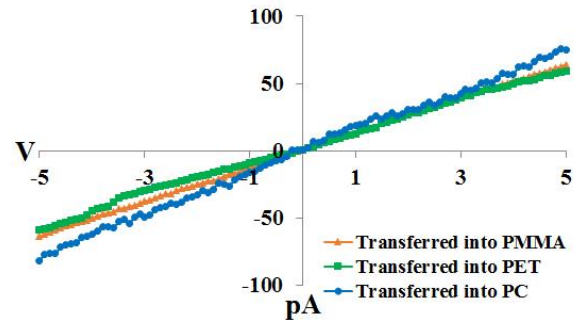


Fig. 9 I-V curves of polymer films that silicon nanostructures transferred into (a) PMMA, (b) PET, (c) PC

는 결론에 도달할 수 있었다.

기계적으로 폴리머 기판 내부로 전사된 실리콘 나노구조물에 존재하는 눈에 보이지 않는 결함들을 확인하기 위한 방법으로, 파라미터 분석기(SPA: semiconductor parameter analyzer)를 이용하여 실리콘 나노구조물의 전기적 특성을 측정하였다. 이를 위해 1  $\mu\text{m}$ 의 실리콘 나노구조물이 전사된 PMMA, PET, PC 기판 위에 전극을 형성하기 위해 웨도우 마스크(shadow mask)를 통해 스퍼터링(sputtering) 공정을 이용하여 알루미늄 전극을 증착하였다. Fig. 9는 실리콘 나노구조물의 저항을 분석한 결과 그래프로, 전사된 실리콘 나노구조물은 폴리머 기판의 종류에 상관없이 모두 전압에 따른 비슷한 전류 값을 출력하였다. 이로부터 PMMA, PET, PC 모든 기판 내부로 실리콘 나노구조물이 결함 없이 전사가 이루어졌음을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 일반적인 MEMS 공정을 통하여 실리콘 나노구조물을 제작하였고, 핫엠보싱 공정을 이용하여 제작된 나노구조물을 PMMA, PET, PC 기판에 각각 전사하였다. 나노구조물의 전사를 위해서는 구조물의 높은 종횡비와 적절한 핫엠보싱 공정 조건이 필요하였다. 나노구조물의 종횡비의 경우 1:5 이상에서 전사가 가능해지며 본 실험에서는 1:8 이상에서 높은 전사 성공률을 보였다. 또한 핫엠보싱 공정 조건 중 온도, 압력, 시간이 중요한 변수로 작용하였다. 각 폴리머의 유리전이온도보다 높은 온도 및 1.0 MPa의 인가 압력에서 나노구조물이 성공적으로 전사되었으며, 압력 인가 시간의 경우 폴리머 특성에 따라 조건 설정이 달라져 짧은 압력 인가 시간이 요구되는 PMMA와 PC 기판은 압력을 높이는 시간인 30초의 조건을 설정한 반면, PET 기판은 냉각까지 90초의 추가적인 압력 유지 시간이 필요하였다. 폴리머에 전사된 실리콘 나노구조물 어레이의 전기적 특성 측정을 통해 구조물의 전사가 결함 없이 전사가 이루어진 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 모든 폴리머

기관에서 실리콘 나노구조물의 전사가 이루어짐을 확인하였으며, 핫엠포싱 공정을 이용하여 실리콘 나노구조물이 전사된 폴리머 필름은 앞으로 전기적 소자 및 센서로서의 응용이 가능할 것으로 기대된다.

## 후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

## References

- [1] Solanki, A., Gentile, P., Calvo, V., Rosaz, G., Salem, B., Aimez, V., Drouin, D., Pauc, N., 2012 Geometrical control of photocurrent in active Si nanowire devices, *Nano Energy* 1 714-722.
- [2] Hussain, A. A., Pal, A. R., Patil, D. S., 2014 High photosensitivity with enhanced photoelectrical contribution in hybrid nanocomposite flexible UV photodetector, *Organic Electronics* 15 2107-2115.
- [3] Tao, Y., Chen, J., Wu, J., Wu, X., 2016 Flexible ultraviolet-visible photodetector based on HfS<sub>3</sub> nanobelt film, *Journal of Alloys and Compounds* 658 6-11.
- [4] Li, M., Li, Y., Liu, W., Yue, L., Li, R., Luo, Y., Trevor, M., Jiang, B., Bai, F., Fu, P., Zhao, Y., Shen, C., Mbengue, J. M., 2016 Metal-assisted chemical etching for designable monocrystalline silicon nanostructure, *Materials Research Bulletin* 76 436-449.
- [5] Wang, J., Wang, H., Zhang, B., Wang, Y., Lu, S., Zhang, X., 2015 A Stable Flexible Silicon Nanowire Array as Anode for High-Performance Lithium-ion Batteries, *Electrochimica Acta* 176 321-326.
- [6] Cho, Y. H., Park, J., Cheng, X., Kim, B. J., Han, A., 2010 Fabrication of high-aspect-ratio polymer nanochannels using a novel Si nanoimprint mold and solvent-assisted sealing, *Microfluid Nonofluid* 9 163-170.
- [7] Kim, H., Yun, J., Park, H., Kumar, M. D., Kim, J., 2015 Three-dimensional nanodome-printed transparent conductors for high-performing Si photodetectors, *Materials Letters* 148 176-177.
- [8] Kim, H., Kim, J., 2015 Rapid thermal-treated transparent conductor on microscale Si-pillars for Photoelectric applications, *Materials Letters* 146 26-29.
- [9] He, Y., Zhang, W., Zhang, S., Kang, X., Peng, W., Xu, Y., 2016 Study of the photoconductive ZnO UV detector based on the electrically floated nonowire array, *Sensors and Actuators A* 181 6-12.
- [10] Lee, M., Lee, D., Jung, S., Lee, K., Park, Y. S., Seong, W., 2010 Measurements of serum C-reactive protein levels in patients with gastric cancer and quantification using silicon nanowire arrays, *Nanomedicine: Nanotechnology Biology and Medicine* 6 78-83.
- [11] Jang, H., Kim, D., Tak, H., Nam, J., Kim, T., 2016 Ultra-mechanically stable and transparent conductive electrodes using transferred grid of Ag nanowires on flexible substrate, *Current Applied Physics* 16 24-30.
- [12] Arif, S., Rafique, M. S., Saleemi, F., Sagheer, R., Naab, F., Toader, O., Mahmood, A., Rashid, R., Mahmood, M., 2015 Influence of 400 keV carbon ion implantation on structural, optical and electrical properties of PMMA, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 358 236-244.
- [13] Wu, Y., Zhang, T., Zhang, H., Zhang, X., Deng, Z., Zhou, G., 2000 Electrical properties of polymer modified by metal ion implantation, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 169 89-93.
- [14] Bos, F., Veer, F., Heidweiller, A., 2006 Using plastics in the design of joints in transparent structures, *International Symposium on the Application of Architectural*.
- [15] MatWeb, n.d., Overview of materials for Polycarbonate, Molded, <<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=84b257896b674f93a39596d00d999d77>>.
- [16] MatWeb, n.d., Overview of materials for Acrylic, General Purpose, Molded, <<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=3cb08da2a0054447a3790015b7214d07>>.
- [17] MatWeb, n.d., Overview of materials for Polyethylene Terephthalate (PET), Unreinforced, <<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=a696bdcdf6f41dd98f8ecc3599eaa20>>.