

유연기판을 위한 UV/Thermal 하이브리드방식 나노임프린트 시스템

임형준*, 이재종^{+,++}, 최기봉⁺, 김기홍⁺, 안현진⁺, 류지형⁺⁺
(논문접수일 2011. 05. 04, 심사완료일 2011. 06. 02)

UV/Thermal Hybrid Nanoimprint System for Flexible Substrates

Hyung-Jun Lim*, Jae-Jong Lee^{+,++}, Kee-Bong Choi⁺, Gee-Hong Kim⁺, Hyun-Jin Ahn⁺, Ji-Hyeong Ryu⁺⁺

Abstract

An UV/thermal hybrid nanoimprint lithography system was designed and implemented for the pattern transfer to flexible substrates. This system can utilize a plate stamp, roll stamp, and film stamp. For all cases of using those stamps, this system is also switchable an UV or thermal nanoimprint lithography mode. This paper shows how to design the heating and UV curing plates and proposes how to change them easily. Because the pressure condition and the speed of the press roller varies by the characteristics of the stamp and substrate, all the parameters related to the nanoimprint lithography have to adjustable. Some transferred patterns are shown in this paper to verify the performance of the hybrid nanoimprint lithography system. The flexible substrates with nano-scale patterns on them will be key components for next generation technologies such as flexible displays, bendable semi-conductors, and solar cells.

Key Words : Nanoimprint Lithography(나노임프린트 리소그래피), Roller(롤러), Flexible Substrate(유연기판), Hybrid(하이브리드)

1. 서론

디스플레이, 반도체, 태양광발전 등 다양한 분야의 핵심 키워드는 다기능, 저가격, 대면적, 고집적도 등이다. 이러한 기술개발의 발전과 함께 유연기판을 기반으로 꾸준한 연구⁽¹⁻³⁾가 진행되어 오고 있다. 유연기판은 비교적 넓은 면적의 디바이스에 대한 연속생산이 가능한 장점이 있을 뿐 아니라, 유연한 성질을 활용하여 보다 다양한 응용 분야를 찾을 수 있으므로 앞으로도 많은 연구개발이 이루어질 것으로 보고 있다.

나노임프린트 리소그래피(Nanoimprint Lithography, NIL)

는 종래의 포토 리소그래피 기술이 가지는 광학적 한계를 극복하며 나노미터 스케일의 패터닝을 수행하기 위해 10여 년 전 소개된 기술이며, 이미 그 초기에 롤 기반의 개념도 소개된 바 있다⁽⁴⁾. 나노임프린트 리소그래피는 스탬프에 존재하는 패턴을 기판 표면에 또는 기판 위의 레지스트에 전사하며, 기판과 레지스트의 특성에 따라 열 나노임프린트 리소그래피(Thermal-NIL)와 자외선 나노임프린트 리소그래피(UV-NIL)로 나뉜다.

열 나노임프린트 리소그래피는 레지스트가 도포된 기판을 가열한 상태에서 스탬프와 기판을 접촉하고 가압한 후 냉각하는 과정을 거쳐 기판 위의 레지스트에 스탬프 패턴이 전사되도록

* 한국기계연구원 나노융합시스템연구본부 (hjlim@kimm.re.kr)

주소: 305-343 대전시 유성구 장동 171

+ 한국기계연구원 나노융합시스템연구본부

++ 과학기술연합대학원대학교 나노메카트로닉스학과

하며, 자외선 나노임프린트 리소그래피는 기판에 레지스트를 도포한 후 스탬프와 기판을 접촉하고 가압한 후 자외선을 조사하여 레지스트가 경화되도록 하는 과정을 거쳐 기판 위에 도포된 레지스트에 스탬프 패턴이 전사되도록 한다. 열 나노임프린트 리소그래피는 기판 자체를 유리화 온도(T_g) 이상으로 가열하여 패턴 전사를 수행하기도 한다.

이상의 나노임프린트 리소그래피는 사용하는 스탬프의 형상, 기판의 재질 및 형상, 레지스트의 경화 특성에 따라 다양한 형태로 응용 가능하다. 특히 서두에 언급한 유연기판 기반의 디바이스는 나노임프린트 리소그래피 기술의 응용을 통해 구현될 수 있는 잠재력을 가지고 있으며, 이를 위한 스탬프 제작 기술이 평면형 스탬프에서 롤 스탬프 또는 필름형 스탬프로 옮겨가고 있는 상황이다. 물론 평면형 스탬프를 이용해도 유연기판의 패턴 전사가 가능하다. 이렇게 제작된 롤 스탬프의 패턴을 유연기판에 전사하거나 또는 평면 기판에 전사하는 시스템에 대한 연구개발도 자외선 나노임프린트 리소그래피 기반⁽⁵⁻¹⁰⁾과 열 나노임프린트 리소그래피 기반^(11,12)으로 이루어져 오고 있다.

본 논문은 유연기판을 위한 나노임프린트 리소그래피 장치에 관한 내용으로, 본 논문을 통해 평면형 스탬프, 롤형 스탬프, 필름형 스탬프와 같이 다양한 형태의 스탬프에 대한 적용이 가능함과 동시에 열 및 자외선 나노임프린트 리소그래피가 가능한 하이브리드형 나노임프린트 리소그래피 장치에 대한 개념을 소개하고자 한다. 그리고 이를 이용해 얻어진 마이크로 스케일 및 나노스케일의 패턴전사 결과를 통해 각각의 조건에 대한 공정변수를 확인하여 시스템 성능을 검증하고자 한다.

2. 하이브리드 방식 나노임프린트 시스템

나노임프린트 리소그래피를 위한 스탬프는 형태 및 재질에 따라 평면형 스탬프, 롤형 스탬프, 필름형 스탬프 등으로 분류될 수 있다. 평면형 스탬프는 주로 웨이퍼 기반의 공정으로 제작된 경우에 해당하며, 원통형 롤러의 표면에 직접 패터닝을 수행한 경우에 롤형 스탬프가 얻어질 수 있다. 또한, 평면형 스탬프의 복제(Replication)과정을 거쳐 얇고 유연한 재질의 필름형 스탬프를 얻어낼 수 있으며, 이러한 필름형 스탬프를 원통형 롤러에 부착하여 원통형 스탬프를 제작할 수도 있다.

유연기판은 재료가 가지는 특성으로 인해 롤에 감겨져 있는 형태로 공급(Supply) 및 회수(Withdrawal)가 가능하다. 무엇보다도 나노임프린트 리소그래피 공정 중 원통형 롤러의 일부에 밀착한 형태로 구부릴 수 있으므로 실리콘 및 유리 웨이퍼 등 일반적인 평면형 기판에 비해 다양한 형태의 변형과 활용이 가능하다.

Fig. 1은 평면형, 롤형, 필름형 스탬프의 적용이 모두 가능함과 동시에 열 및 자외선 나노임프린트 리소그래피가 가능한 장치의 개념을 보여준다. 유연기판의 위에는 원통형 롤러가, 아래

에는 평면형 플레이트가 위치해 있다. 원통형 롤러가 평면형 플레이트와 맞닿은 상태로 좌측에서 우측방향으로 구르게 된다. 이 때 유연기판은 원통형 롤러의 일부에 접촉된 상태로 원통형 롤러와 평면형 플레이트 사이에 위치하므로 이들 사이에 존재하는 접촉력에 의해 가압이 이루어지게 된다. 즉, 원통형 롤러에 의해 유연기판의 가압이 이루어지므로 이후 가압롤러(Press roller)라 지칭하기로 한다. Fig. 1의 위에서 아래로 각각 평면형, 롤형, 필름형 스탬프를 사용하는 경우에 대한 개념도를 나타내며, 각각에 대해 좌측은 평면형 플레이트 내부에 자외선 조사장치가 삽입된 경우, 우측은 평면형 플레이트 내부에 가열 장치가 삽입된 경우를 보여주고 있다. 자외선 조사장치는 선형으로 조사되며 가압롤러의 중심을 따라 함께 이동하며 유연기판의 가압이 이루어지는 영역의 레지스트를 경화시키는 역할을 수행하게 된다.

이러한 개념의 나노임프린트 리소그래피 장치는 앞서 언급한 바와 같이 다양한 형태의 스탬프를 적용 할 수 있을 뿐 아니라, 평면에 기반을 둔 자외선 조사 및 가열 장치를 적용할 수 있다. 특히, 면 접촉이 아닌 선 접촉을 유도함으로써 일반적인 롤 기반의 장치와 같이 높은 압력을 얻을 수 있고, 특히 두 개의 롤러 사이를 유연기판이 지나도록 하는 시스템에 비해 접촉면의 정렬 및 균일도를 유지하기가 용이하다.

Fig. 2는 자외선조사 및 가열방식 각각에 대해 유연기판의 순차적인 접촉을 통한 가압 방법을 보다 구체적으로 보여준다. Fig. 2(a)와 Fig. 2(b)는 각각 자외선조사 및 가열방식에 의한 평면형 플레이트의 개념적인 차이를 보여주고 있으며, 두 가지 모두 동일하게 가압롤러와 가이드롤러(Guide roller)에 의해

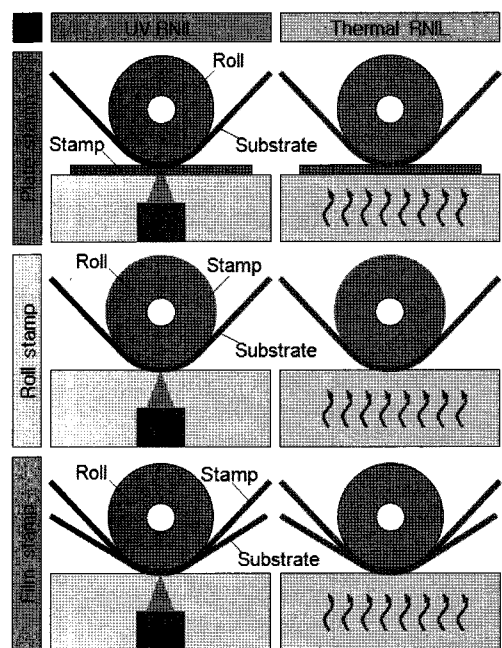


Fig. 1 Stamp variations of the UV/thermal hybrid RNIL system

유연기판이 관리된다. 유연기판이 밀착된 상태에서 가압롤러가 평면형 플레이트에 맞닿아 가압이 이루어지면 좌측에서 우측으로 구르게 되고, 이때 가이드롤러도 함께 이동하며 이동 과정에서 유연기판의 길이변화가 발생하지 않도록 한다. 자외선 방식의 경우에는 선형 자외선 장치가 가압롤러를 따라 함께 이동하며 가압부위에 자외선을 조사하여 레지스트를 경화시키고, 가열 방식의 경우에는 가열된 평면형 플레이트와 닿는 부분만 국소적으로 가열되어 패턴 전사가 수행된다.

앞서 Fig. 1 및 Fig. 2를 통해 언급된 나노임프린트 리소그래피 시스템 개념을 통해 각 요소들의 간단한 변경을 통해 다양한 형태의 조합이 가능함을 확인하였다. 이 중 자외선조사 및 가열을 위한 평면형 플레이트는 하나의 장치 내에 두 가지 기능을 구현하는 것이 불가능하다. 자외선조사장치는 투명한 평판 아

래 선형 자외선램프가 위치하며 이 장치가 가압 롤러를 따라 이동해야 한다. 가열장치의 경우 금속으로 제작된 평면형 플레이트 내부에 위치하며, 평면형 플레이트 상면에 균일한 온도가 유지되도록 해야 한다. 따라서 Fig. 3과 같이 각각의 기능을 가진 서로 다른 두 형태의 플레이트가 교체되는 형태를 취하는 것이 바람직하며, 이러한 개념을 하이브리드 나노임프린트 리소그래피 시스템에 적용하였다.

3. 시스템 설계 및 제작

3.1 가압롤러 설계 및 구현

본 논문에서 제안한 시스템의 경우 평면형 플레이트는 공정 중에 위치 이동이 발생하지 않으며, 유연기판의 공급 및 회수를 위한 공급 및 회수롤러의 구동과, 유연기판의 순차적인 가압을 위한 가압롤러의 병진이동 및 회전이동이 주를 이루게 된다. 특히, 가압롤러의 가압 후 수평이동은 전체적인 공정 성능을 결정짓는 중요한 요소이며 향후 시스템의 크기와 사양을 고려하여 설계가 이루어져야 한다. 본 시스템을 위한 가압롤러는 상세한 메커니즘 설계 및 제작을 통해 구현하고 성능이 검증된 바 있다⁽¹³⁾. 또한, Fig.1을 통해 이미 설명한 것과 같이 평면형 스탬프를 사용하는 경우 일정한 압력을 유지하기 위해서 인가되는 힘의 크기를 조절해야 하는데, 일반적으로 사용되는 원형 웨이퍼 기반의 스탬프는 가압롤러의 이동에 따라 접촉되는 길이가 변화하므로 이러한 상황에서도 일정한 압력이 유지되도록 하기 위해 인가되는 힘의 크기를 변화시키도록 하여 패턴닝을 수행하기도 하였다⁽¹⁴⁾.

3.2 시스템 사양 및 제작

본 논문을 통해 제작된 하이브리드형 나노임프린트 리소그래피 시스템에 대한 간략한 사양 및 제작된 형상은 Table 1 및 Fig. 4와 같다. 장치의 크기는 폭 1200mm, 높이 600mm로 제진대에 설치되어 있다. 모든 조작은 장치 옆에 별도로 장착된 컨트롤패널에 의해 이루어지며, 이를 통해 가압롤러의 구동, 유연기판 공급 및 회수롤러의 구동, 가열 및 냉각, 자외선 조사 등 다양한 기능을 제어할 수 있다.

가압롤러의 길이는 200mm, 직경은 100mm, 가열 및 자외선 조사를 위한 각각의 평면형 플레이트의 유효면적은 폭 200mm, 길이 300mm 이다. 따라서 필름형 스탬프를 가압롤러에 부착하는 경우 이음매에 무관하게 최대 200×300mm의 영역에 대한 패턴 전사가 가능하다.

가압롤러의 최대 인가하중은 470N 수준으로, 로드셀에 의한 인가하중 측정 및 내부 컨트롤러에 의한 피드백을 통해 약 0.2N 이내의 오차를 가지도록 유지할 수 있다.

유연기판은 시스템의 우측에 위치한 공급롤러에 의해 공급되

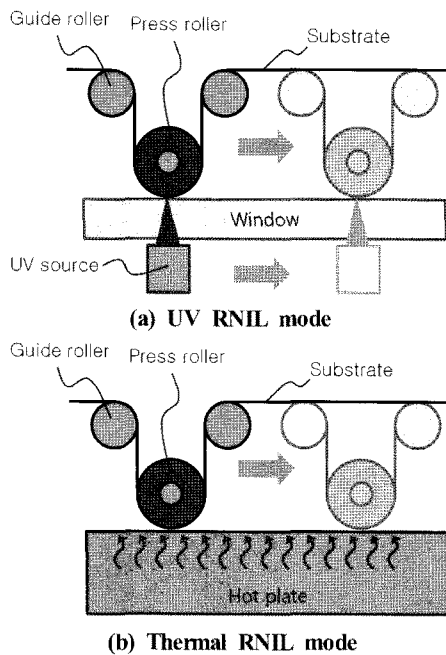


Fig. 2 Modes of the UV/thermal hybrid RNIL system

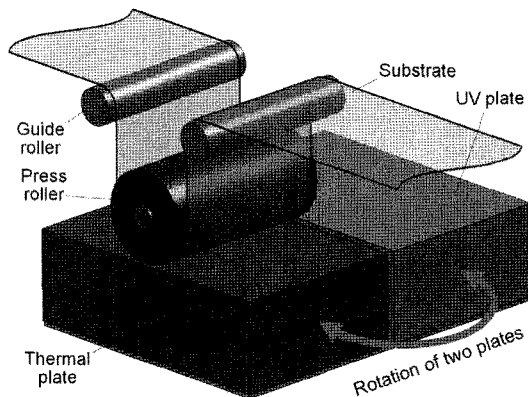


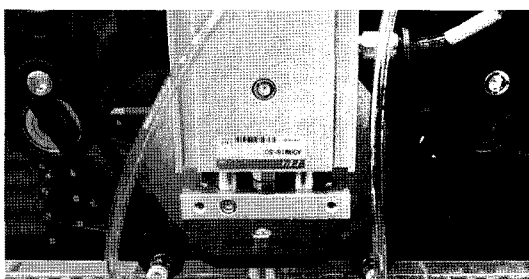
Fig. 3 Mode switching of the UV/thermal hybrid RNIL system

Table 1 System specification of the UV/thermal hybrid RNIL system

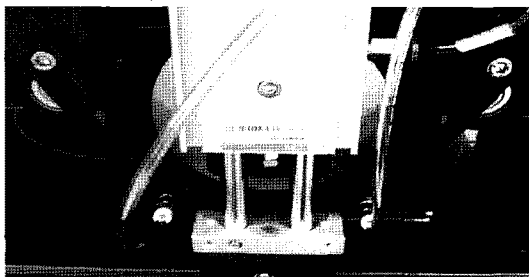
| | | |
|-----------------|-------------------------------------|-------|
| System hardware | Width (mm) | 1200 |
| | Height (mm) | 600 |
| | Depth (mm) | 760 |
| Control panel | Size (in.) | 8.4 |
| Press roller | Diameter (mm) | 100 |
| | Length (mm) | 200 |
| | Maximum force (N) | 470 |
| | Force error (N) | 0.2 |
| | Maximum pressing speed(mm/s) | 0.833 |
| Thermal plate | Width (mm) | 210 |
| | Length (mm) | 340 |
| UV plate | Width (mm) | 340 |
| | Length (mm) | 410 |
| | Maximum power (mW/cm ²) | 30 |
| Substrate | Width (mm) | 200 |



Fig. 4 Picture of the UV/thermal hybrid RNIL system



(a) Thermal RNIL mode



(b) UV RNIL mode

Fig. 5 Picture of the press roller and UV/thermal plates of the hybrid RNIL system

며, 시스템의 좌측에 위치한 회수롤러에 의해 회수된다. 나노임프린트 리소그래피 공정 수행 과정 중 가압롤러와 평면형 플레이트 사이에 위치한 유연기판에 순차적으로 가압이 이루어지게 되며, 이러한 과정 중 유연기판의 미끄러짐으로 인한 위치변화가 없도록 하기 위해 회수롤러가 고정된다. 또한, 한 번의 공정이 이루어진 후 공정이 이루어진 길이만큼 회수롤러의 회전을 통해 유연기판이 회수되며, 이때 회수되는 길이의 정확한 측정을 위해 별도의 엔코더가 부착된 롤러를 사용하게 된다. 반대편에 위치한 공급 롤러의 경우 별도의 장력 조절장치를 사용하여 일정 범위의 장력이 지속적으로 유지되도록 하며, 회수롤러의 구동과 함께 연동되어 유연기판이 원활히 공급되도록 한다.

앞서 언급한 것과 같이 본 시스템은 열 및 자외선 나노임프린트 리소그래피가 모두 가능하며, Fig. 5에서와 같이 평면형 플레이트의 위치 변경을 통해 두 가지 모드 변환이 이루어진다. 열 나노임프린트 리소그래피 모드에서는 Fig. 5(a)와 같이 가열 플레이트가 위치하게 된다. 이때 가압롤러 좌우에는 공랭식 냉각장치를 설치하여 접촉 전후에는 가열되지 않도록 할 수 있다.

자외선 나노임프린트 리소그래피 모드에서는 Fig. 5(b)와 같이 자외선 플레이트가 위치하게 되며, 이때 가압롤러를 위한 이동 스테이지가 선형 자외선 조사장치를 연결하여 선형 자외선 조사장치가 가압롤러의 중심선을 따라 함께 이동할 수 있도록 한다.

4. 나노임프린트 시스템에 의한 패턴 전사

4.1 열 나노임프린트 리소그래피에 의한 패턴전사

본 시스템의 열 나노임프린트 리소그래피 기능을 통해 웨이퍼에 존재하는 패턴을 유연기판에 전사하고자 한다. 스탬프는 6인치 실리콘 웨이퍼를 이용했으며, 표면에 2×2μm 크기의 원형 패턴이 존재한다. 실리콘 웨이퍼는 가열 플레이트 위에 위치하며, 나노임프린트 공정 수행 중 미끄러짐이 발생하지 않도록 진공으로 흡착이 되어있다. 유연기판으로는 폭 200mm, 두께 0.38mm의 폴리카보네이트(Polycarbonate, PC) 필름을 이용하였다. 가압롤러는 6인치 원형 스탬프 중심을 지나는 동안 최대 하중 440N 에 도달하게 되며, 원형 스탬프의 중심을 지나기 전 후에는 접촉하는 길이에 비례하여 가압롤러의 하중이 변화한다. 가열 온도는 165℃로 설정하였으며, 가압이 이루어진 후 가압롤러는 수평방향으로 15mm/min의 속도로 이동한다. 이렇게 얻어진 유연기판의 패턴이 Fig. 6과 같다.

이와 유사한 방법으로 2인치 실리콘 웨이퍼에 존재하는 135×200nm 크기의 형상에 대한 패턴전사를 수행하였다. 유연기판의 크기는 앞서 수행한 실험과 동일한 폭 200mm, 두께 0.38mm이며, 가압롤러는 2인치 원형 스탬프 중심을 지나는 동

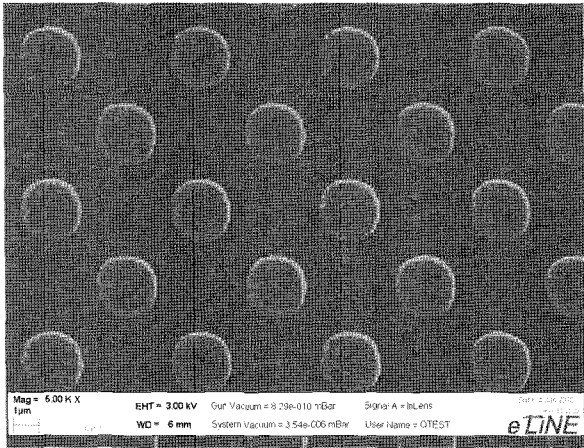


Fig. 6 SEM image of micro-scale dot array on the PC film patterned by thermal NIL mode

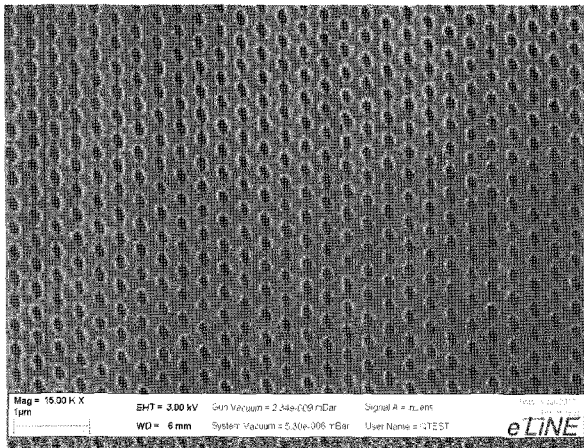


Fig. 7 SEM image of nano-scale dot array on the PC film patterned by thermal NIL mode

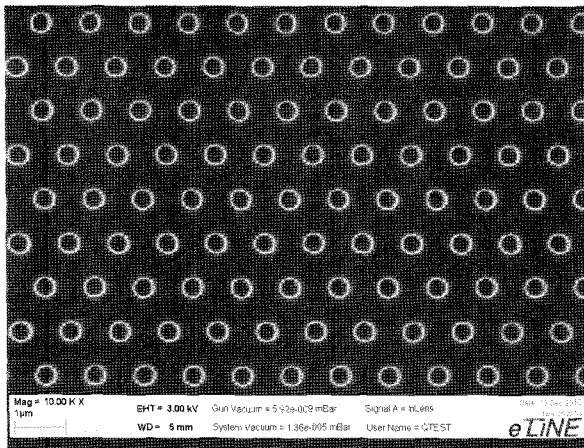


Fig. 8 SEM image of nano-scale dot array on the PC film patterned by UV NIL mode

안 최대 하중 196N에 도달하게 된다. 가압이 이루어진 후 가압롤러의 수평방향 이동속도는 6mm/min으로 설정하였다. 유연

기판에 전사된 패턴은 Fig. 7과 같다.

열 나노임프린트 리소그래피는 기판을 유리화온도(T_g) 이상 가열한 상태에서 가압을 통해 스탬프의 패턴을 전사하므로, 필름 형태의 유연기판을 사용하는 경우에 고온 상태에서 열팽창으로 인한 변형은 불가피하다. 그러나 적절한 가열 온도 설정과 냉각 방법, 그리고 가압력의 변화 등을 통해 나노임프린트가 수행된 후 초기 형상으로 복귀하도록 하는 공정조건을 찾아야 한다. 다만, 모든 경우에 대해 패턴의 전사 특성에 대한 검토가 필요하다.

4.2 자외선 나노임프린트 리소그래피에 의한 패턴전사

Fig. 2(a)와 같은 자외선 나노임프린트 리소그래피 기능을 통해 패턴전사를 수행한 결과는 Fig. 8과 같다. 스탬프는 평면형 원형 스탬프를 이용했으며, 재질은 유리(Glass) 크기는 2인치이다. 스탬프 표면에는 PUA(Poly urethane acrylate) 재질의 나노패턴이 존재하며, 패턴 직경은 370nm이다. 평면형 스탬프의 경우 자외선 플레이트 상단에 위치시켜야 하므로, 자외선 플레이트 내부에서 조사되는 자외선이 유연기판까지 도달하기 위해서 유리 등 투명한 재질로 이루어져야 한다.

유연기판은 두께 0.38mm의 폴리카보네이트 필름을 이용하였다. 스탬프 표면에 레지스트를 도포한 후 가압롤러를 통해 유연기판과 스탬프를 가압한 후 수평방향으로 100mm/min의 속도로 이동하며 경화시키면 스탬프 표면에 도포된 레지스트가 경화되며 유연기판으로 이동(Transfer) 하게 된다. 이때 가압롤러가 스탬프의 중심을 지나는 동안 최대 인가하중 196N에 도달한다. 이는 앞서 수행한 열 나노임프린트 리소그래피에 의한 나노패턴 전사와 동일한 크기이지만, 가압롤러의 표면에 두께 1.5mm의 실리콘고무(Silicone rubber)를 부착한 상태에서 수행했으므로, 접촉 표면적이 넓어져 압력은 열 나노임프린트 리소그래피에 비해 작은 값을 가지게 된다. 자외선은 길이 200mm의 선형 자외선으로, 최대 광량은 $30\text{mW}/\text{cm}^2$ 이다.

자외선 나노임프린트 리소그래피 공정은 열 나노임프린트 리소그래피 공정과 달리 상온, 저압, 고속 공정이 가능한 장점이 있다.

5. 결론

본 연구를 통해 유연기판을 위한 열 경화 및 자외선 경화 방식이 선택적으로 변경 가능한 하이브리드방식 나노임프린트 시스템을 개발했으며 이를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 유연기판의 패턴 전사를 위해 평면형, 물형, 필름형 스탬프를 선택적으로 적용할 수 있는 나노임프린트 리소그래피 시스템에 대한 개념설계 및 제작을 수행하였음

- (2) 나노임프린트 공정 중 유연기판의 열 경화 또는 레지스트의 자외선 경화가 선택적으로 가능한 시스템을 제안하고 각각의 경우에 대한 성능 검증을 수행하였음
- (3) 본 시스템을 통해 다양한 형태의 나노임프린트 리소그래피 공정을 시도할 수 있으며, 이는 연구개발 및 다품종소량생산에 적합할 것으로 기대됨

후 기

본 논문은 21세기 프론티어 연구개발사업으로 추진 중인 “나노메카트로닉스 기술개발사업”의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) Park, J., Chae, H., Chung, H., and Lee, S., 2011, “Thin Film Encapsulation for Flexible AM-OLED: a review,” *Semicond. Sci. Technol.*, Vol. 26, No. 3, p. 03401.
- (2) Sun, D., Timmermans, M. Y., Tian, Y., Nasibulin, A. G., Kauppinen, E. I., Kishimoto, S., Mizutani, T., and Ohno, Y., 2011, “Flexible High-performance Carbon Nanotube Integrated Circuits,” *Nature Nanotechnology*, Vol. 6, No. 3, pp. 156~161.
- (3) Wuerz, R., Eicke, A., Kessler, F., Rogin, P., and Yazdani-Assl, O., 2011, viewed 9 February 2011, “Alternative Sodium Sources for Cu(In, Ga)Se₂ Thin-film Solar Cells on Flexible Substrates,” *Thin Solid Films*, <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2011.01.399>>
- (4) Tan, H., Gilvertson, A., and Chou, S. Y., 1998, “Roller Nanoimprint Lithography,” *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 16, No. 6, pp. 3926~3928.
- (5) Ahn, S., Cha, J., Myung, H., Kim, S., and Kang, S., 2006, “Continuous Ultraviolet Roll Nanoimprinting Process for Replicating Large-scale Nano- and Micropatterns,” *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 89, No. 21, p. 213101.
- (6) Ahn, S. H., and Guo L. Jay., 2008, “High-Speed Roll-to-Roll Nanoimprint Lithography on Flexible Plastic Substrates,” *Adv. Mater.*, Vol. 20, No. 11, pp. 2044~2049.
- (7) Lee, J., Park, S., Choi, K., and Kim, G., 2008, “Nano-scale Patterning using the Roll Typed UV-nanoimprint Lithography Tool,” *Microelectron. Eng.*, Vol. 85, No. 5, pp. 861~865.
- (8) Stuart, C., and Chen, Y., “Roll in and Roll out: A Path to High-Throughput Nanoimprint Lithography,” *ACS Nano*, Vol. 3, No. 8, pp. 2062~2064.
- (9) Ahn, S. H., and Guo L. Jay., 2009, “Large-Area Roll-to-Roll and Roll-to-Plate Nanoimprint Lithography: A Step toward High-Throughput Application of Continuous Nanoimprinting,” *ACS Nano*, Vol. 3, No. 8, pp. 2304~2310.
- (10) Han, J., Choi, S., Lim, J., Lee, B. S., and Kang, S., 2009, “Fabrication of Transparent Conductive Tracks and Patterns on Flexible Substrate using a Continuous UV Roll Imprint Lithography,” *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 42, No. 11, p. 115503.
- (11) Lee, H., Hong, S., Yang, K., and Choi, K., 2006, “Fabrication of Nano-sized Resist Patterns on Flexible Plastic Film using Thermal Curing Nano-imprint Lithography,” *Microelectron. Eng.*, Vol. 83, No. 2, pp. 323~327.
- (12) Lee, M. G., Shuhuai, L., Lee, S.-H., Lee, H.-J., Ni, J., and Sung, Y.-W., 2009, “Development of Roll-to-Flat Thermal Imprinting Equipment and Experimental Study of Large Area Pattern Replication on Polymer Substrate,” *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 18, No. 3, pp. 307~314.
- (13) Lim, H., Lee, J., Choi, K., Kim, G., and Ryu, J., 2011, “Design and Implementation of Nanoimprint Lithography System for Flexible Substrate,” *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 28, No. 4, pp. 513~520.
- (14) Lim, H., Choi, K., Kim, G., Park, S., Ryu, J., and Lee, J., 2011, viewed 8 February 2011, “Roller Nanoimprint Lithography for Flexible Electronic Devices of a Sub-micron Scale,” *Microelectron. Eng.*, <<http://dx.doi.org/10.1016/j.mee.2011.02.018>>