

마이크로나노그래이팅 경질 몰드 모서리의 연속적 각인 소성가공 기반 유연 마이크로나노패턴의 고속 연속 제작 공정시스템 개발

이승조^a, 오동교^a, 박재규^a, 김정대^a, 이재혁^a, 옥종걸^{a*}

Development of a High-throughput Micronanopatterning System Based on the Plastic Deformation Driven by Continuous Rigid Mold Edge Inscribing on Flexible Substrates

Seungjo Lee^a, Dong Kyo Oh^a, Jaekyu Park^a, Jeong Dae Kim^a, Jae Hyuk Lee^a, Jong G. Ok^{a*}

^a Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology, 232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received 12 September 2016
Revised 6 October 2016
Accepted 14 October 2016

Keywords:

Micronanopatterning
Nanoinscribing
Continuous process
Mechanical plastic deformation

ABSTRACT

In this study, we develop a novel high-throughput micronanopatterning system that can implement continuous mechanical pattern inscribing on flexible substrates using a rigid grating mold edge. We perform a conceptual design of the process principle, specific modeling, and buildup of a real system prototype. This research also carefully addresses several important issues related to processing and controlling, including precision motion, alignment, heating, and sensing to enable a successful micronanopatterning in a continuous and high-speed fashion. Various micronanopatterns with the desired profiles can be created by tuning the mold shape, temperature, force, and substrate material toward many potential applications involving electronics, photonics, displays, light sources, and sensors, which typically require a large-area and flexible configurations.

1. 서론

마이크로나노패터닝(micro- and nanopatterning) 기술은 초정밀기계, 광학, 정보통신, 센싱, 바이오, 환경, 에너지 변환 등 다양한 분야의 신소재 개발 및 성능 혁신에 활발히 도입 응용됨^[1-4]과 더불어 다른 나노소재의 활용도와 기능성을 높이기 위한 가공 기술로도 널리 도입되고 있다^[5,6]. 그러나 종래 photolithography를 비롯한 e-beam lithography, laser interferometry 등 정교하고 복잡한 광학 기반 마이크로나노패터닝은 대부분의 경우 상대적으로 높은 공정 시간과 비용 및 공정 면적 상 제약 등으로 인해, 유연기판 등 다양한 기능성 소재 상 원하는 면적에 패턴을 제작하고 이를

다양한 소자로 개발하여 실용적 제품화 및 양산으로 이어나기에는 어려움이 따른다^[1,7-9]. 이에 따라, 간소한 공정 시스템을 토대로 저비용 고효율의 제작 원리에 입각한 보다 높은 생산성과 확장성을 가질 수 있는 마이크로나노패터닝 방법론이 요구되고 있다.

본 연구에서는 복잡다단한 시스템 및 공정 원리에의 의존도를 최대한 배제하고 기존에 확립 성숙되어 범용되고 있는 기계가공 원리를 미시적 스케일 패터닝 공정에 창의적으로 융합 접목시킴으로써, 다양한 마이크로나노스케일의 라인패턴을 범용 유연 폴리머 기판 상에 대면적향으로 고속 연속 제작하는 공정 원리를 마련하고 이를 운용하는 간결한 데스크탑 규모의 시스템의 설계 제작 과정을 제시한다. 구체적으로, 경질 마이크로나노그래이팅(grating) 몰드

* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-9012

Fax: +82-2-979-7032

E-mail address: jgok@seoultech.ac.kr (Jong G. Ok).

(mold)의 직선 모서리를 툴(tool)로 삼아 이를 대상 기판에 접촉시킨 후 적절한 온도와 힘을 가한 상태에서 연속적으로 긁어냄으로써 유연 기판 상 마이크로나노그레이팅패턴을 기계적으로 고속 각인 성형하는 ‘나노각인(nanoinscribing)’ 기술⁹⁻¹²⁾을 도입한다. 이를 실제 높은 정밀도와 재현도로 구현할 수 있도록 정량화된 온도 및 압력의 컨트롤, 정밀한 각인 이송 및 LabView 기반 계측 제어 기능을 탑재한 고속 연속 데스크탑 마이크로나노패터닝 시스템을 설계 구축한 결과를 제시하고 이를 운용한 샘플 제작 사례를 보이고자 한다.

2. 본 론

2.1 나노각인 공정 원리 및 공정 시스템 개념설계

Fig. 1(a)는 나노각인 공정 원리의 모식도를 나타낸다. 보통 Si, SiO₂, Si₃N₄ 등의 경질 소재 상에 원하는 주기 및 높이를 갖는 마이크로나노그레이팅 구조를 성형하고 그레이팅 방향에 수직하게 클리빙(cleaving)함으로써¹²⁾ 나노각인 기반 마이크로나노패터닝 툴을 손쉽게 준비할 수 있다 (Fig. 1(b) 참조). 서론에서 개념적으로 약속한 나노각인의 보다 구체적인 실제 공정 절차는 다음과 같다. 먼저 툴을 적절한 각도로 원하는 소재의 유연 폴리머 기판 표면 위쪽에 위치시킨 후 클리빙된 모서리와 기판 표면을 수평하게 맞춘 상태로 접근시킨다. 이를 수직 방향으로 이동하여 아래쪽의 기판과 적절한 온도 및 힘이 가해진 상태로 접촉이 되도록 해준다. 이후 기판을 수평 방향으로 적절한 속도로 이송시킴으로써, 툴 모서리로 인한 기판 표면 상 각인 소성가공을 통한 유연 마이크로나노패턴 (Fig. 1(c) 참조)의 제작이 이루어지게 된다.

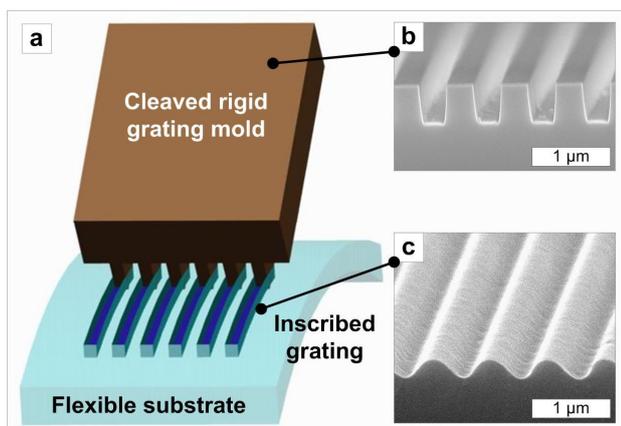


Fig. 1. (a) Schematic overview of continuous micronanopatterning by inscribing a rigid mold edge on a flexible substrate. Scanning electron microscopy images of (b) a well-cleaved 700 nm-period SiO₂ nanograting mold and (c) a resulting pattern inscribed on a polycarbonate substrate.

즉, 상기한 공정을 수행하는 시스템은 툴의 마운팅(mounting) 각도 조절, 툴과 기판 표면 간의 높낮이 및 수평맞춤(alignment) 조절, 기판 로딩 모듈의 정밀 이송 조절, 툴과 기판 간에 가해지는 힘의 정량적 컨트롤, 그리고 공정 온도 조절 등이 가능하도록 설계 구축될 수 있으며, 복잡한 광학적 모듈이나 대규모의 부대 장치 등을 배제하고 몇 가지 기계 컴포넌트 및 히터, 센싱 유닛, 이송 모터 등의 가공 조립을 통해 데스크탑 규모의 간결한 형태로 구현이 가능하다. 이 때 한 가지 고려할 점으로서, 공정 온도 컨트롤을 위하여 기판 쪽이 아닌 툴 쪽에 히터를 설치하는 것이 적절하다. 기판의 소성변형에 근간하는 나노각인 공정 원리 상, 기판이 툴과 접촉하는 구역에서만 국부적 가열이 되도록 하고, 연속적 각인 이송에 따라 접촉 구역을 벗어난 직후에는 다시 냉각해줌으로써 여타 지역에서의 불필요한 열변형을 최소화할 수 있기 때문이다¹⁰⁾.

2.2 공정 시스템의 상세설계 및 구축

나노각인 기반 유연 마이크로나노패턴의 고속 연속 제작 공정 시스템의 실제 상세설계는 앞 절의 공정 원리 및 공정 수행 개념을 반영하여 크게 세 개의 모듈로 나누어 진행되고 제작 조립되어 구축될 수 있다. 즉, 몰드를 물고 적절한 온도로 가열하는 상태에서 적절한 각도로 기판에 접근하는 몰드 암(arm) 모듈, 기판을 로딩하고 기판의 높낮이와 기울기를 정밀 조정하며 몰드와 접촉된 후에는 수평 방향으로 정밀 이송을 수행하는 기판 이송 모듈, 끝으로 몰드와 기판 간의 접촉 힘을 컨트롤하는 포스센서(force sensor) 모듈 등으로 구성된다. Fig. 2(a)는 3D CAD 소프트웨어(Creo Elements/Pro (Pro/ENGINEER Wildfire 5.0), PTC, Inc.)를 이용한 전체 시스템의 조립 설계도를 나타내며, Fig. 2(b)에 이를 토대로 실제 구축한 공정 시스템 프로토타입(prototype)을 도시하였으며, 상기 세 핵심 모듈을 그림 상에 표기하였다.

이 가운데 몰드 암 모듈은 가장 중요한 공정 원리 상 이슈를 반영하여 최적의 형태로 설계 제작할 필요가 있다. 즉, 전술한 바와 같이 히터를 장착하고 경질 몰드를 견고하게 물고서 원하는 온도로 열평형이 이루어진 상태에서 이후 다양한 기울임(tilting) 각도로 기판과 접촉하여 무리 없는 이송이 진행되도록 해줄 수 있다. 이를 위해 Fig. 3(a) 및 3(b)에 도시한 설계도 및 프로토타입에서 확인할 수 있는 바와 같이, 몰드를 무는 곳에 히터와 온도센서를 최대한 근접시켜 설치하고 열평형이 외부조건에 쉽게 흔들리지 않도록 충분한 열중량(thermal mass)이 확보되도록 두껍게 하되 전체 몰드 암 헤드는 핸들링 및 컨트롤이 용이하도록 가능한 컴팩트하게 설계 제작할 수 있다. 특히 몰드를 무는 부위에는 내열성 실리콘 러버(silicone rubber) 필름을 부착하고 위와 아래 플레이트의 볼트 고정을 통해 견고하게 몰드를 물고 기판과 접촉 및 각인 이송 시에 흔들림이 없도록 해줄 수 있다. 또한, 이후 몰드와 기판의 접촉 힘

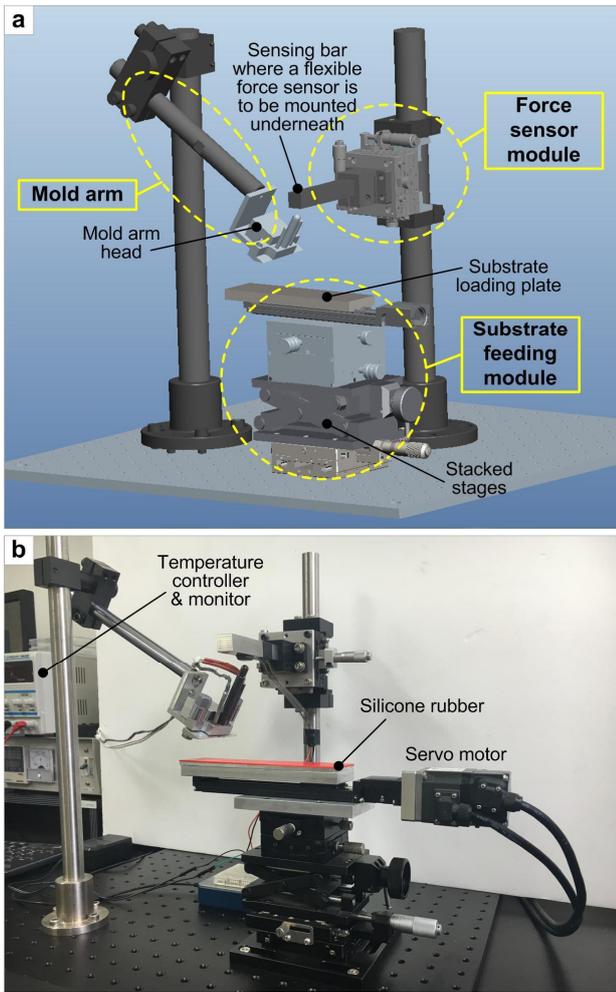


Fig. 2. The high-throughput micronanopatterning system utilizing continuous inscribing principle: (a) a 3D modeling assembly where three main modules are categorized and (b) a completed prototype connected with a servo motor, force sensor, heater, and the controller.

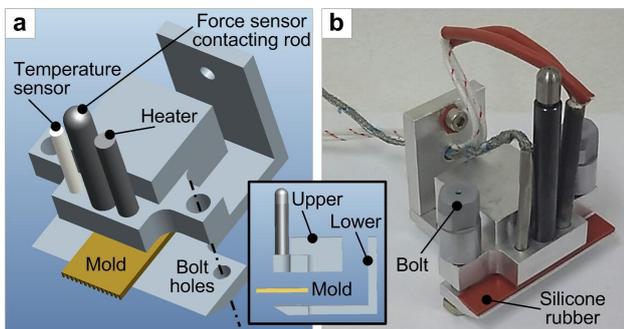


Fig. 3. (a) Detailed modeling view and (b) completed prototype of a heating arm head where a resistive heater, a temperature sensor, and a rod for contacting the force sensor arm are fully installed

을 작용-반작용의 원리에 따라 측정할 수 있도록, 몰드 암과 기판이 접촉된 상태에서 포스센서 모듈이 접근하여 몰드 암을 위에서 누를

수 있도록 센서와의 접촉 돌출부를 만들어 줄 수 있다.

기판 이송 모듈의 역할은 크게 기판의 로딩, 기판과 몰드 간의 정밀 조정, 그리고 접촉이 이루어진 상태에서의 이송 컨트롤로 나눌 수 있다. 이에 따라 하부에 다양한 방향의 자유도 정밀 조정이 가능한 여러 스테이지들(DTG60-200(도브테일), DLJ60-100(랩잭), DL80-200(X-Y 2축), 이상 두드림시스템)이 중첩 구축되어 몰드와 기판 간에 최적의 접촉이 이루어질 수 있도록 하며, 상부에 모터 구동 방식의 리니어 액츄에이터(linear actuator; LX1502-B1-N-150, MISUMI)를 설치하고 그 위에 타겟 샘플의 면적에 맞는 로딩 플레이트를 부착할 수 있다. 이 때 기판을 로딩하는 면에 마찬가지로 실리콘 러버 필름을 부착해주어, 로딩된 기판의 미끄러짐을 방지함과 동시에 몰드 모서리와 기판 표면 간에 정확한 수평맞춤을 보정해주고 이후 각인 이송 진행 시에 접촉면 전체에 고른 힘 분포가 이루어지는 데 도움이 되도록 할 수 있다.

또한 위에서 언급한 바와 같이 포스센서 모듈은 몰드 암의 돌출부와 접촉되는 부분에 유연 포스센서(Flexiforce, A201-100, TECSAN)의 센싱부가 닿을 수 있도록 센싱 바(bar)를 설치하고 높낮이 및 위치를 정밀 조정할 수 있는 스테이지(FD-X1-60C, 퓨처사이언스)를 포함하도록 설계 제작할 수 있다.

이러한 설계 제작 과정에 따라 조립된 기계적 프레임에 몰드 온도 및 몰드-기판 접촉힘, 기판 이송 컨트롤 기능을 탑재하여 나노각인 기판 고속 연속 마이크로나노패터닝 공정시스템 구축을 완성할 수 있다. 즉, 몰드 암 헤드부에 설치한 줄-히팅(Joule-heating) 방식의 히터(온도범위: 상온-180°C) 및 온도센서를 피드백 컨트롤러에 연결하여 실시간 전압 인가 및 조정을 통해 몰드 온도를 원하는 값으로 가열 및 유지하도록 할 수 있다. 또한, 포스센서는 LabView 프로그램 연동을 이용한 캘리브레이션(calibration) 및 제어를 통해 컴퓨터 기반으로 정밀 컨트롤 및 모니터링을 할 수 있다. 기판의 정밀 이송을 위해 리니어 스테이지에 서보모터(HF-KP053, Mitsubishi)를 연결하고 컴퓨터 제어 연동을 통해 소프트웨어(MR Configurator)로 원하는 정속 또는 변속 프로그램에 따라 구동 및 컨트롤(모터회전속도: ~6,000 rpm, 변환이송속도: ~200 mm/s)을 할 수 있다.

2.3 공정 시스템 운용을 통한 마이크로나노패턴 고속 연속 제작

이렇게 구축된 나노각인 공정 시스템에 원하는 형상의 몰드와 원하는 재질의 기판을 각각 로딩하여 적절한 온도 하에서 각인 이송을 수행함으로써 유연 기판 상에 마이크로나노그래이팅 패턴을 고속 성형할 수 있다. 패터닝 면적은 사용하는 몰드 모서리의 길이와 각인 이송 길이의 곱으로 주어지며, 이와 같은 연속적인 고속 공정 원리는 웨이퍼 또는 그보다 작은 시편 단위의 공정으로 제한을 받을 수 있는 기존 마이크로나노패터닝 방법 대비 매우 높은

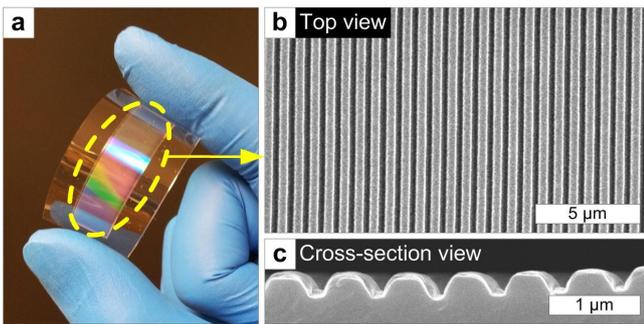


Fig. 4. Fabricated samples applying the continuous inscribing-based micropatterning system on a flexible PC substrate: (a) optical view and SEM images of (b) top and (c) cross-sectional views.

면적 확장성 및 생산성을 갖는다.

Fig. 4는 본 공정 시스템을 운용하여 700 nm 주기의 SiO₂ 나노그레이팅 몰드 모서리(Fig. 1(b))로 폴리카보네이트(polycarbonate; PC) 기판 상에 130°C의 온도에서 2 N의 힘과 3 mm/s의 이송 속도로 나노각인을 수행함으로써 얻어진 실제 샘플의 실물 및 전자주사현미경(scanning electron microscopy; SEM) 이미지를 나타낸다. 나노그레이팅 패턴이 뚜렷한 형상으로 각인되고 이후 탄성회복(elastic recovery)을 통해 사인 곡선(sinusoidal curve)과 같이 부드러운 곡선 형태로 유연한 PC 기판 상에 성형됨을 알 수 있다. 소성변형 가공 원리 상 동일 형상 몰드 및 동일 재질 기판에 대해 패턴 상의 높낮이, 즉 미세 그레이팅의 깊이는 강한 힘이 가해질수록, 그리고 유리전이(glass transition) 온도에 가까울수록 더 깊게 형성됨을 예측할 수 있다. 이 외 다음 절에서 보다 구체적으로 논하려는 바, 이러한 공정 변수 조절에 따른 패턴 형상의 변화를 심화 탐구함으로써 대상 응용 소자 및 활용 방안에 따라 다양한 형상을 갖는 마이크로나노패턴을 맞춤형으로 고속 제작할 수 있다.

2.4 향후 진행 및 소자 응용 방안

나노각인 공정은 순수한 기계적인 소성변형에 입각한 공정 원리에 따라, 사용하는 경질 몰드보다 무른 모든 재료에 원칙적으로 패턴이 가능하다. 그러나 연속적인 고속 가공 조건에 부합하여 순간적인 가열 가압 환경 하에서의 원활한 변형을 유발하기 위해서는, 앞 절에 예시한 PC를 비롯해 PET(polyethylene terephthalate), ETFE(ethylene tetrafluoroethylene), PFA(perfluoroalkoxy alkane) 등 유연한 폴리머 재료들이 기판 재질로 적합하다. 이러한 여러 유연 재료에 공정 온도 및 몰드-기판 접촉력, 그리고 기판 이송 속도 등의 변화 적용을 통해 동일한 경질 몰드를 이용하여 다양한 형상과 특성을 갖는 마이크로나노패턴의 제작이 가능하다. 또한 몰드의 주기 및 깊이, 몰드 팁 끝의 형상(직각, 라운드, 첨팁 등)을 달리 해줌으로써 다양한 주기와 곡면을 갖는 패턴

을 이끌어 낼 수 있다. 이와 더불어, 1차원 마이크로나노그레이팅에서 나아가 2차원 또는 그 이상의 나노각인 중첩 공정을 통해 보다 다양한 형상과 기능성을 갖는 다차원 마이크로나노패턴의 제작도 가능하다^[11].

이를 통해 정밀기계부품, 유연전자, 광학필름, 유연센서 등에 각 소자 구조 및 기능 용도에 맞게 다양한 목표 응용이 가능하며, 특히 연속적인 고속 공정 원리 및 우수한 면적 확장성을 바탕으로 이러한 소자들의 대면적화 및 양산화에 중요한 실마리를 제공할 수 있다. 실제로 본 연구에서 개발 구축한 나노각인 기반 고속 연속 나노패터닝 공정에 대한 체계적인 파라메트릭 스터디(parametric study) 및 유한요소법 기반 해석적 공정 모델 탐구와 병행하여 유연 광원 및 플라즈모닉(plasmonic) 센서, 대면적 유연 투명전극 및 곡면 특수코팅 등의 응용 개발로 이어나가는 연구들이 현재 진행 중에 있다.

3. 결론

본 연구에서는 경질 마이크로나노그레이팅 몰드 모서리의 각인을 통해 유연 기판 상에 다양한 마이크로나노패턴을 고속으로 연속적으로 성형하는 공정 원리를 마련하여 이를 실제로 구현하는 공정 시스템의 개념설계 및 상세설계, 구축 및 운용 결과를 제시하고, 향후 심화 연구 및 소자 응용 방안에 대해서도 논하였다. 이와 같이 구축되는 공정 시스템은 탁자 위에 올려놓고 운용이 가능한 컴팩트한 구조로서, 기존 대규모의 패턴링 설비에 비해 구축 비용과 운용 관리 노력이 월등히 절감되고 연속 공정에 근간하는 양산 생산라인과의 연계도 용이하다. 이를 통해 마이크로나노패턴 기반 다양한 차세대 소재기술 개발루트에 보다 높은 신뢰도와 생산성을 부여하고, 대면적저비용고효율 공정 실현을 통한 양산 제품 개발을 가속화할 수 있을 것이다.

후기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Seo, J. H., Park, J. H., Kim, S.-I., Park, B. J., Ma, Z., Choi, J., Ju, B. K., 2014, Nanopatterning by Laser Interference Lithography: Applications to Optical Devices, *J. Nanosci. Nanotech.*, 14:2 1521-1532.
- [2] Priimagi, A., Shevchenko, A., 2014, Azopolymer-Based Micro- and

- Nanopatterning for Photonic Applications, *J. Polymer Sci. Part B. - Polymer Phys.*, 52:3 163-182.
- [3] Kim, H. N., Jiao, A. Hwang, N. S., Kim, M. S., Kang, D. H., Kim, D.-H., Suh, K.-Y., 2013, Nanotopography-guided tissue engineering and regenerative medicine, *Adv. Drug Delivery Rev.*, 65:4 536-558.
- [4] Wang, Z. L., 2013, Triboelectric Nanogenerators as New Energy Technology for Self-Powered Systems and as Active Mechanical and Chemical Sensors, *ACS Nano*, 7:11 9533-9557.
- [5] Hong, J.-Y., Jang, J., 2012, Micropatterning of graphene sheets: recent advances in techniques and applications, *J. Mater. Chem.*, 22:17 8179-8191.
- [6] Ok, J. G., Kwak, M. K., Huard, C. M., Youn, H. S., Guo, L. J., 2013, Photo Roll Lithography (PRL) for continuous and scalable patterning with application in flexible electronics, *Adv. Mater.*, 25:45 6554-6561.
- [7] Sreenivasan, S. V., 2008, Nanoscale manufacturing enabled by imprint lithography, *MRS Bulletin*, 33:9 854-863.
- [8] Dumond, J. J., Low, H. Y., 2012, Recent developments and design challenges in continuous roller micro- and nanoimprinting, *J. Vac. Sci. Technol. B*, 30:1 010801.
- [9] Ok, J. G., Ahn, S. H., Kwak, M. K., Guo, L. J., 2013, Continuous and high-throughput nano-patterning methodologies based on mechanical deformation, *J. Mater. Chem. C*, 1:46 7681-7691.
- [10] Ahn, S. H., Guo, L. J., 2009, Dynamic nanoinscribing for continuous and seamless metal and polymer nanogratings, *Nano Lett.*, 9:12 4392-4397.
- [11] Ok, J. G., Panday, A., Lee, T., Guo, L. J., 2014, Continuous fabrication of scalable 2-dimensional (2D) micro- and nanostructures by sequential 1D mechanical patterning processes, *Nanoscale*, 6:24 14636-14642.
- [12] Ok, J. G., Park, H. J., Kwak, M. K., Pina-Hernandez, C. A., Ahn, S. H., Guo, L. J., 2011, Continuous patterning of nanogratings by nanochannel-guided lithography on liquid resists, *Adv. Mater.*, 23:38 4444-4448.