열보조 나노 전사 프린팅을 통한 금속 박막의 표면 주름 나노패턴 형성 방법

박태완¹ · 박운익^{2,*}

¹한국세라믹기술원 전자융합본부

²부경대학교 재료공학과

Formation of Surface-Wrinkled Metal Nanosheets via Thermally Assisted Nanotransfer Printing

Tae Wan Park¹ and Woon Ik Park^{2,*}

¹Electronic Convergence Division, Korea Institute of Ceramic Engineering & Technology (KICET), Jinju 52851, Republic of Korea

²Department of Materials Science and Engineering, Pukyong National University, Pusan 48513, Republic of Korea

Abstract: Nanopatterning methods for pattern formation of high-resolution nanostructures are essential for the fabrication of various electronic devices, including wearable displays, high-performance semiconductor devices, and smart biosensor systems. Among advanced nanopatterning methods, nanotransfer printing (nTP) has attracted considerable attention due to its process simplicity, low cost, and great pattern resolution. However, to diversify the pattern geometries for wide device applications, more effective and useful nTP based patterning methods must be developed. Here, we introduce a facile and practical nanofabrication method to obtain various three-dimensional (3D) ultra-thin metallic films via thermally assisted nTP (T-nTP). We show how to generate surface-wrinkled 3D nanostructures, such as angular line, concave-valley, and convex-hill structures. We also demonstrate the principle for effectively forming 3D nanosheets by T-nTP, using Si master molds with a low aspect ratio ($A/R \leq 1$). In addition, we explain how to obtain a 3D wavy structure when using a mold with high $A/R (\geq 3)$, based on the isotropic deposition process. We also produced a highly ordered 3D Au nanosheet on flexible PET over a large area ($> 15 \mu\text{m}$). We expect that this T-nTP approach using various Si mold shapes will be applied for the useful fabrication of various metal/oxide nanostructured devices with high surface area.

(Received September 10, 2021; Accepted September 24, 2021)

Keywords: Nanotransfer printing, Nanopattern, Aspect ratio, Surface wrinkle

1. 서 론

지난 수십년간, 전자기기의 성능을 높이고 효율을 극대화하기 위한 노력의 일환으로, 수많은 나노 제조 기술이 개발되었고, 복잡한 형상의 마이크로/나노 구조물 또는 기능성 박막을 원하는 기판 상에 자유롭게 구현할 수 있는 방법들이 보고되었다 [1-9]. 최근에는 방대한 데이터를 저장하고 전송할 수 있는 고성능 소자의 필요성이 강조됨에 따라, 더욱 발전된 미세 나노패터닝 공정은 소자 제작에

있어서 더욱 중요한 부분으로 여겨지고 있다 [10-12]. 현재, 마이크로/나노 분자 및 입자의 배열을 화학적으로 제어하거나 주기적인 나노 스케일의 패턴을 물리적으로 조절하는 공정들에 기반한 나노패터닝 기술들이 기능성 전자 기판, 유연기판, 그리고 생체재료에까지 적용되고 있고, 이는 고효율 반도체 소자, 웨어러블 디스플레이, 생체 내 작동 가능한 센서 등의 차세대 전자 시스템의 대중적인 상용화 가능성을 높이고 있다 [13-16]. 더 나아가, 소자 내 신호전달 체계를 담당하는 회로의 선풍이 미세화될수록 고집적도의 저전력 소자 구동이 가능하기 때문에, 패터닝된 마이크로/나노 구조물을 고밀도화 하는 기술이 반드시 필요하며, 이를 달성하고자 하는 많은 노력들이 행해지고 있다 [17].

특히, extreme ultraviolet (EUV) lithography [18],

- 박태완: 박사과정, 박운익: 교수

*Corresponding Author:

[Tel: +82-51-629-6355, E-mail: thane0428@gmail.com, thane0428@pknu.ac.kr]

Copyright © The Korean Institute of Metals and Materials

nanoimprint lithography (NIL) [19], directed self-assembly (DSA) [20] 등의 다양한 차세대 패터닝 기술들이 나노 소자 제조에 적용되기 위하여 활발하게 연구되고 있다. 이러한 기술들은 모두 나노 급의 미세한 패턴 형성을 가능하게 한다는 점에서 많은 관심을 받고 있고, 각종 소자 및 시스템에 적용되어 혁신적인 성능 향상을 이루어 내고 있으며, 웨이퍼 스케일의 대면적 구현이 가능하다는 연구 결과들까지 보고됨에 따라 산업적 적용 가능성을 갖는 핵심 기술로 자리매김하고 있다 [21-24]. 하지만, 이러한 기술들은 제한적인 패터닝 소재, 공정 복잡성, 높은 공정 비용 등 기술 상용화를 위해 해결되어야 할 많은 문제들이 존재한다. 원하는 소재의 표면에 자유자재로 형상제어 된 패턴을 새기기 위해서는 더욱 발전된 기술 개발이 필요하다.

이러한 단점들을 극복하기 위하여 보고된 기술인 패턴 전사 프린팅(nanotransfer printing, nTP)을 주목할 필요가 있다 [25]. 공정이 매우 간편하고 효율적인 nTP 기술은 금형 사출 및 인쇄 원리를 접목한 방법으로, 그 속도가 매우 빠르고 비용이 저렴하기 때문에 전자 소자 제작 공정에 널리 응용되고 있다 [26,27]. 뿐만 아니라, 반복적인 공정

을 통해 3차원 적층형 나노구조물을 비교적 쉽게 제작할 수 있고, 곡면 상에도 패터닝이 가능하기 때문에 휘 수 있는 인체부착형 디스플레이, 폴더블 전자기기 등의 차세대 전자 소자 제작에 있어서 적용이 가능한 매우 흥미로운 기술이다 [28,29]. 향후, 고반응성 전자 소자 제작 시 중요하게 여겨지는 고비표면적의 3차원(three-dimensional, 3D) 나노구조물을 자유롭게 만들어 낼 수 있다면, nTP 기술은 더 많은 분야에서 잠재성이 있는 기술로 여겨질 것이다.

본 연구에서는, 종횡비(aspect ratio, A/R)가 다른 몰드를 열보조 패턴 전사 프린팅(thermally assisted nanotransfer printing, T-nTP) 공정에 접목하여 표면이 변형된 다양한 형상의 나노 구조물화된 3차원 초박막 필름을 제조하는 방법을 소개하고자 한다. 종횡비가 낮은 실리콘(Si) 마스터 몰드를 사용하여 얻어진 복제 패턴 위에 물리적 증착(physical vapor deposition, PVD) 방법을 사용하여 금속 소재를 형성하게 되는데, 등방성, 이방성 증착을 실시하는 경우 각각 분리된 라인 그리고 마스터 몰드와 유사한 각이진 패턴을 만들어 낼 수 있다. 단순한 라인 형상 뿐만 아니라 메쉬 형태가 돌출된 3D 표면 나노 패턴, 그의 역상

Fig. 1. Schematic for fabrication process of surface-wrinkled nano-/micro-structures by T-nTP. (a) Procedure for pattern formation of line and angular-wrinkle patterns by isotropic and anisotropic deposition methods using a mold with low aspect ratio (A/R). (b) Pattern formation of wavy-wrinkle pattern using a mold with high A/R.

인 스캐어 형태가 돌출된 형상까지 자유롭게 제조가 가능하다는 것을 보여주고자 한다. 또한, 높은 종횡비의 나노 몰드를 사용하고 등방성 증착을 실시하는 경우 종횡비가 작은 몰드의 결과와 어떻게 다른지 원리적으로 설명하고자 하며, 이때 얻어지는 100 nm급의 독특한 3차원적 나노 표면 필름의 결과를 소개하고자 한다.

2. 실험 방법

그림 1은 주름진 3D nanosheet 형상의 마이크로 및 나노 구조물을 형성하기 위한 전체적인 공정에 대한 개략도이다. 우선, KrF광원 기반 포토리소그래피(photolithography) 공정을 통해 종횡비가 다른 Si 몰드를 제작하고, 복제패턴을 만들기 위하여 몰드 상에 폴리머 소재를 코팅한다. 본 연구에서는, Si 몰드의 패턴을 복제하기 위해 120 kg/mol의 분자량을 갖는 poly(methyl methacrylate) (PMMA)를 톨루엔과 아세톤을 1:1로 혼합한 용액에 5 wt%로 용해하여 사용하였고, PMMA 용액을 몰드 위 도포한 후 5,000 rpm으로 23초 동안 고속 회전시킴으로써 균일한 박막이 형성되게 하였다. 코팅된 PMMA 박막은 접착성 폴리이미드(polyimide, PI) 필름을 이용하여 박리함으로써 몰드와 역상을 갖는 복제 패턴을 얻을 수 있다. 다음으로, PMMA 복제 패턴 위 PVD 방법 중 하나인 direct current (DC) 스퍼터링 공정을 통해 기능성 소재를 형성하는데, 본 연구에서는 3인치 크기의 금속 타겟을 사용하여 각 금속 소재를 증착한다. 스퍼터링 공정 시, 메인 챔버 내 기저압력은 5×10^{-3} Torr로 설정하고 150 W의 전력을 인가하여 진행하였다. 마지막으로, PMMA 복제 패턴 위 형성된 금속 소재를 지정된 타겟 기판으로 컨택(contact) 프린팅 기반 패턴전사를 실시한다. 다양한 3D 표면 나노 주름 구조를 얻기 위해, 서로 다른 종횡비($A/R \leq 1, \geq 3$)를 갖는 Si 몰드로부터 얻은 복제 패턴 상에 등방성, 이방성 증착법을 활용하여 패턴전사 프린팅 공정을 진행하였다. 그림 2(c)는 본 실험에서 패턴을 형성하기 위해 사용된 T-nTP 공정의 원리를 순차적으로 보여준다. Si 마스터 몰드로부터 복제된 PMMA 패턴 위 형성된 금속소재를 타겟 기판으로 이동시키기 위하여, 패턴링 하고자 하는 금속 소재와 기판을 마주보게 접촉시킨 후 균일한 열과 압력을 가해준다. 이 때, 컨택이 된 상태에서 금속 소재 위 함께 전사된 PMMA 층은 일정한 압력을 받는 동시에 가해지는 열에 의해 수축하게 되고, 접착성 PI 필름 상 접착 레이어의 접착력 또한 약해지면서, PMMA 층과 접착성 PI 필름이 쉽게 분리되어 기판 위로 전사가 가능하게 된다. 최종적으로,

PMMA를 톨루엔 용액으로 제거해 줌으로써 기판 위에는 금속 패턴만이 남게 된다. 전사된 미세 패턴은 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM) 분석을 통해 관찰 및 분석된다.

3. 결과 및 고찰

금속 박막의 표면 형상을 다양화하기 위하여 여러가지 형상의 Si 몰드를 활용하여 패턴전사 프린팅 공정에 적용하였다. 구체적으로는, 선 폭과 깊이가 다양한 종횡비를 갖는 몰드를 활용하여 표면 상 3차원의 나노 주름이 형성된 금속 박막 패턴을 구현하였다.

동일한 복제 패턴을 사용하더라도 증착되는 방식을 다르게 한다면, 형상이 다른 3차원 박막 구조의 패턴을 만들어 낼 수 있었다. 먼저, 종횡비가 1이하로 비교적 낮은 Si 몰드를 사용한 경우이다. 본 연구에서 사용된 낮은 종횡비의 몰드는, 선 폭 250 nm, 선 간격 250 nm, 깊이 250 nm로 디자인하여 포토리소그래피 공정으로 제작하였다(그림 2(a)-(b)). 증착되는 소재의 직진성이 높은 등방성 증착 방법인 고밀도 플라즈마 기반 스퍼터링을 사용하고 복제 패턴과 증착 방향을 일정한 각도로 고정된 후 증착을 실시한 결과, 복제 패턴의 돌출부에만 선택적으로 타겟 소재를 형성할 수 있었고, 이를 활용하여 분리된 라인 형상의 패턴을 기판 위로 프린팅 하였다(그림 2(d)). 또한, 동일한 복제 패턴 위, 저자기장 스퍼터링, 이온 플리즈마 기반 증착 등의 보다 직진성이 약한 이방성 증착법을 활용하고 복제 패턴을 지속적으로 회전시키며 상부 증착을 진행한다면, 복제 패턴의 돌출 윗면, 측면 및 바닥면에 증착 하고자 하는 소재의 전면 도포가 가능하고 결국 복제 패턴의 형상과 유사한, 표면에 굴곡을 포함하는 3차원 요철형 금속 박막 패턴을 형성할 수 있게 된다. 그림 2(e)는 이러한 원리를 적용하여 패턴전사 된 3차원으로 주름진 요철 나노 구조를 포함하는 금속 박막의 SEM 이미지이다. 결론적으로, Si 몰드로부터 균일한 복제패턴이 형성되었고, 증착 방법을 달리하여 Si 몰드 역상과 매우 일치하는 두 가지의 고해상도 패턴이 T-nTP 공정을 통하여 형성되었음을 확인할 수 있었다.

그림 3은 다양한 형상으로 전사 인쇄된 Au 소재의 나노 구조물이다. 그림 3(a)는 선 폭과 선 간격이 각각 250 nm, 2 μ m를 나타내는 표면 요철 구조인데, 이는 종횡비가 0.125(깊이/선 폭, 250 nm/2 μ m)인 Si 몰드로부터 만들어진 패턴이다. 즉, 그림 2(e)와 함께 종횡비가 1 이하인 low A/R 몰드를 사용한다면 마스터 몰드의 형상과 유사한 각

Fig. 2. Pattern formation of line and surface-wrinkled thin film structures using a Si mold with a low A/R. (a) Si master mold patterned by photolithography. (b) SEM image of Si mold with a line space/width of 250 nm. (c) T-nTP processing steps for fabrication of wrinkled 3D metal thin film. (d) Transfer-printed metal line pattern by angled (isotropic) deposition process. (e) Surface-wrinkled metal thin film by top rotating (anisotropic) deposition process.

이 진 표면 주름 패턴을 구현할 수 있고 형성되는 패턴의 선 폭 및 선 간격은 조절 가능하다는 사실을 확인할 수 있었다. 또한, 본 연구에서 사용된 T-nTP 공정은 물리적 증착이 가능한 대부분의 소재에 적용이 가능하기 때문에 Pt, Pd, Cu, Al, Ni, W 등의 많은 기능성 금속 소재들의 패턴링이 가능할 것이다. 더 나아가, 단순한 패턴 형상에, 스퀘어, 메시 형상의 Si 몰드를 사용하여 더욱 복잡한 구조체의 패턴링 역시 가능하다는 것을 증명하였다(그림 3(b): Au concave-valley 구조, 그림 3(c): Au convex-hill 구조). 이러한 결과는, 더욱 다양한 형상의 Si 몰드를 제작하고 T-nTP 공정에 적용한다면, 원하고자 하는 모양에 대한 고비표면적 3차원 금속 필름 패턴 구조체를 얻을 수 있음을 보여준다.

그림 4는 선 폭 및 선 간격이 좁고 종횡비가 큰 Si 몰드를 사용하여 Au 소재를 패턴링 한 결과이다. 그림 4(a)에서 볼 수 있듯이, Si 몰드 상 패턴의 종횡비가 3으로

매우 크다(깊이 / 선 폭 = 150 nm / 50 nm). 그림 4(b)는 높은 종횡비를 갖는 나노몰드를 T-nTP 공정에 사용하여 얻어진 패턴의 형상을 보여준다. 패턴의 SEM 분석 결과, 종횡비가 1 이하로 낮은 몰드를 사용했을 때와 다르게 전사된 패턴의 높이가 기준 Si 몰드에 비해 약 70 nm로 0.5만 큼 줄어들고 그 형상이 물결 모양을 나타내는 주름진 나노 구조물이 형성되었다. 여기에서는, 고밀도 플라즈마 기반 스퍼터링법을 사용하여 증착부를 회전시키며 Au 소재를 증착 하였는데, 종횡비가 매우 큰 복제 패턴 상에 증착이 이루어지기 때문에 패턴 침강부까지 증착 소재가 도달하지 못하고 결국 복제 패턴 상 늘어뜨려진 구조(hanging structure)의 Au 패턴이 형성되었다. 따라서, 최종적으로 복제 패턴의 형상과는 다른 물결 모양의 특이한 3차원적 물결 구조의 패턴 형성이 가능하였다. 그림 4(d)는 100 nm급 Au 물결 패턴이 15 μm 이상의 대면적에 걸쳐 균일하게 형성된 것을 보여주는 SEM 분석 결과이다. 오른쪽 상단에

Fig. 3. Transfer-printed various non-planar metal nanostructures via the T-nTP. (a) SEM image of concavo-convex Au line pattern with a width/space of 250 nm/2 μm . (b) Concave-valley and (c) convex-hill Au nanoarchitectures.

Fig. 4. Pattern formation of sub-100 nm wavy nanostructure using a Si mold with a high A/R. (a) Si master mold (line/space widths = 50 nm/50 nm, depth = 150 nm, A/R = 3). (b) Printed wavy Au nanostructure with a pitch of ~ 100 nm. (c) Principle of pattern formation of surface-fluctuated Au thin film. (d) Transfer-printed Au wave nanosheet over a large area. The inset image shows a photograph of the printed Au pattern on the transparent PET. (e) Size distribution of center-to-center for surface-wrinkled 3D Au wave nanostructure.

삽입된 그림은, 투명한 PET 기판 위 형성된 Au 물결 패턴의 사진 이미지이다. 전사된 패턴의 보다 높은 정확성을 검증하기 위하여 Au 물결 나노 패턴의 중심과 중심을 이은 거리를 임의의 부분에서 30회 측정하였고, 거리의 평균과 표준 편차는 각각 99.4 nm, 3.4 nm로 도출되었다. 이는, 기준 몰드(100 nm)에 비해 오차범위가 3.5% 미만인 매우 낮은 오차 결과로, 고해상도의 패턴이 성공적으로 전사되었음을 보여준다. 위 결과들을 통해, T-nTP 공정은 표면 주름진 마이크로/나노 금속 박막을 매우 정교하게 대면적으로 구현할 수 있는 기술이라는 것을 알 수 있다. 본 연구에서 확인된 다양한 3차원 마이크로/나노 표면 주름 금속 박막 패턴은 일반적인 박막에 비해 비표면적이 크기 때문에, 다양한 전자, 에너지, 배터리 장치의 전극 표면에 적용되어 성능 향상된 전극을 나타낼 수 있을 것으로 보이며, 관련 분야로의 추가 응용 연구가 이루어질 필요가 있다고 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서 우리는 다양한 형상의 표면 주름진 3차원적 마이크로/나노 구조물을 형성하기 위한 효과적인 나노패터닝 방법을 제시하였다. 서로 다른 종횡비를 갖는 Si 몰드를 열보조 패턴 전사 프린팅 공정(T-nTP)에 적용하였고, 몰드의 종횡비에 따라 형성되는 주름 패턴의 형상이 제어 가능하다는 것을 보여주었다. 포토리소그래피 공정으로 제작된 마이크로/나노 라인패턴 몰드로부터 만들어진 복제 패턴 상에 금속 소재를 증착하고 T-nTP 공정을 실시함으로써, 마이크로/나노 스케일의 3차원 표면 주름 나노패턴 sheet를 성공적으로 제조할 수 있었다. 특히, 선 폭 및 선 간격이 조절된 다양한 간격의 Si몰드를 T-nTP 공정에 적용한다면, PVD 공정으로 증착이 가능한 어떠한 소재라도 3차원 초미세 필름형 구조물 제조가 가능함을 확인하였다. 뿐만 아니라, 복잡한 그물 구조, 돔 구조 형상을 갖는 엠

보상 필름의 제조 역시 가능함을 보여주었다. 게다가, 종횡비가 큰 나노 라인패턴 몰드를 사용할 경우, 증착 방향성에 기반하여 패턴형상이 달라질 수 있으며, 등방성 증착법을 이용하여 물결 모양의 패턴 제조가 가능함을 확인할 수 있었다. 결론적으로, 몰드의 종횡비를 조절하고 PVD 증착 방법상 특성을 고려하여 T-nTP 공정에 적용할 경우, 다양한 종류와 크기, 그리고 형상을 갖는 초미세 패턴표면을 갖는 2차원 패턴과 3차원 nanosheet 필름 제조가 모두 가능하다는 것을 알 수 있었다. 본 연구의 결과인 3차원 고비표면적 구조물들은, 2차원적 박막 필름과 비교하여 높은 비표면적을 갖기 때문에, 향후 고반응성을 요구하는 다양한 소자로의 응용이 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2021년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2021R1A2C1004119 & No. 2021M3I3A1084651). 본 연구는 2021년도 중소벤처기업부의 기술개발사업 지원에 의한 연구임(S3105347).

REFERENCE

1. S. K. Kang, S. W. Hwang, S. Yu, J. H. Seo, E. A. Corbin, J. Shin, D. S. Wie, R. Bashir, Z. Ma, and J. A. Rogers, *Adv. Funct. Mater.* **25**, 1789 (2015).
2. H. C. Ko, G. Shin, S. Wang, M. P. Stoykovich, J. W. Lee, D. H. Kim, J. S. Ha, Y. Huang, K. C. Hwang, and J. A. Rogers, *Small* **5**, 2703 (2009).
3. Y. Zhang, R. Chad Webb, H. Luo, Y. Xue, J. Kurniawan, N. H. Cho, S. Krishnan, Y. Li, Y. Huang, and J. A. Rogers, *Adv. Healthcare Mater.* **5**, 119 (2016).
4. L. Li, I. Bayn, M. Lu, C.-Y. Nam, T. Schröder, A. Stein, N. C. Harris, and D. Englund, *Sci. Rep.* **5**, 1 (2015).
5. T. W. Park, H. Jung, Y.-R. Cho, J. W. Lee, and W. I. Park, *Korean J. Met. Mater.* **56**, 910 (2018).
6. N.-S. Jang, K.-H. Kim, and J.-M. Kim, *Korean J. Met. Mater.* **59**, 575 (2021).
7. W.-S. Choi, *Korean J. Met. Mater.* **57**, 258 (2019).
8. W. H. Jo and D. Choi, *Korean J. Met. Mater.* **57**, 91 (2019).
9. T. W. Park and W. I. Park, *Korean J. Met. Mater.* **58**, 145 (2020).
10. S.-H. Lee, Y. Jung, and R. Agarwal, *Nat. Nanotechnol.* **2**, 626 (2007).
11. C. H. Lee, J. W. Jeong, Y. Liu, Y. Zhang, Y. Shi, S. K. Kang, J. Kim, J. S. Kim, N. Y. Lee, and B. H. Kim, *Adv. Funct. Mater.* **25**, 1338 (2015).
12. G. S. Lee, J.-S. Jeong, M. K. Yang, J. D. Song, Y. T. Lee, and H. Ju, *Appl. Surf. Sci.* **541**, 148483 (2021).
13. Q. Wang, W. Han, Y. Wang, M. Lu, and L. Dong, *Microsyst. Nanoeng.* **4**, 1 (2018).
14. O. Vazquez-Mena, T. Sannomiya, M. Tosun, L. G. Villanueva, V. Savu, J. Voros, and J. Brugger, *ACS Nano* **6**, 5474 (2012).
15. N. Demazy, C. Cummins, K. Aissou, and G. Fleury, *Adv. Mater. Interfaces* **7**, 1901747 (2020).
16. A. T. KG, S. M. Nicaise, K. R. Gadelrab, A. Alexander-Katz, C. A. Ross, and K. K. Berggren, *Nat. Commun.* **7**, 1 (2016).
17. M.-G. Kim, D. K. Brown, and O. Brand, *Nat. Commun.* **11**, 1 (2020).
18. F. Torretti, J. Sheil, R. Schupp, M. Basko, M. Bayraktar, R. Meijer, S. Witte, W. Ubachs, R. Hoekstra, and O. Versolato, *Nat. Commun.* **11**, 1 (2020).
19. S. Barcelo and Z. Li, *Nano Convergence* **3**, 1 (2016).
20. S. O. Kim, H. H. Solak, M. P. Stoykovich, N. J. Ferrier, J. J. De Pablo, and P. F. Nealey, *Nature* **424**, 411 (2003).
21. T. Li, K. Wu, T. Rindzevicius, Z. Wang, L. Schulte, M. S. Schmidt, A. Boisen, and S. Ndoni, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **8**, 15668 (2016).
22. B. Heidari, I. Maximov, and L. Montelius, *J. Vac. Sci. Technol. B* **18**, 3557 (2000).
23. V. J. Gómez, M. Graczyk, R. J. Jam, S. Lehmann, and I. Maximov, *Nanotechnology* **31**, 295301 (2020).
24. W. I. Park, T. W. Park, Y. J. Choi, S. Lee, S. Ryu, X. Liang, and Y. S. Jung, *ACS Nano* **15**, 10464 (2021).
25. J. Zaumseil, M. A. Meitl, J. W. Hsu, B. R. Acharya, K. W. Baldwin, Y.-L. Loo, and J. A. Rogers, *Nano Lett.* **3**, 1223 (2003).
26. T. W. Park, M. Byun, H. Jung, G. R. Lee, J. H. Park, H.-I. Jang, J. W. Lee, S. H. Kwon, S. Hong, J.-H. Lee, Y. S. Jung, K. H. Kim, and W. I. Park, *Sci. Adv.* **6**, eabb6462 (2020).
27. R. F. Tiefenauer, K. Tybrandt, M. Aramesh, and J. Voros, *ACS Nano* **12**, 2514 (2018).
28. M. A. Meitl, Z.-T. Zhu, V. Kumar, K. J. Lee, X. Feng, Y. Y. Huang, I. Adesida, R. G. Nuzzo, and J. A. Rogers, *Nat. Mater.* **5**, 33 (2006).
29. D. Chanda, K. Shigeta, S. Gupta, T. Cain, A. Carlson, A. Mihi, A. J. Baca, G. R. Bogart, P. Braun, and J. A. Rogers, *Nat. Nanotechnol.* **6**, 402 (2011).