

패턴전사프린팅용 고분자 복제 소재 연구

강영림, 박운익 

부경대학교 재료공학과

A Study on Polymer Replica Materials for Nanotransfer Printing

Young Lim Kang and Woon Ik Park

Department of Materials Science and Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

(Received April 14, 2021; Revised April 21, 2021; Accepted April 23, 2021)

Abstract: For the past several decades, various next-generation patterning methods have been developed to obtain well-designed nano-to-micro structures, such as imprint lithography, nanotransfer printing (nTP), directed self-assembly (DSA), E-beam lithography, and so on. Especially, nTP process has much attention due to its low processing cost, short processing time, and good compatibility with other patterning techniques in achieving the formation of high-resolution functional patterns. To transfer functional patterns onto desirable substrates, the use of soft materials is required for precise replication of master mold. Here, we introduce a simple and practical nTP method to create highly ordered structures using various polymeric replica materials. We found that polymethyl methacrylate (PMMA), polystyrene (PS), and polyvinylpyridine (PVP) are possible candidates for replica materials for reliable duplication of Si master mold based on systematic analysis of pattern visualization. Furthermore, we successfully obtained well-defined metal and oxide nanostructures with functionality on target substrates by using replica patterns, through deposition and transfer process. We expect that the several candidates of replica materials can be exploited for effective nanofabrication of complex electronic devices.

Keywords: Nanotransfer printing, Replica pattern, Nanostructure, Replication, Lithography

1. 서론

정보통신 기술의 융합으로 이루어진 4차 산업 혁명 시대가 도래함에 따라, 방대한 양의 데이터를 효율적으로 저장 및 처리하는 동시에, 더욱 신속하고 정확한 전달을 가능하게 하기 위한 기술의 중요성이 강조되고 있다. 특히, 소재·부품 및 장비 기술 개발 관련 첨단화를 위한 많은 투자가 진행되고 있으며, 다양한 차세대 스마트 전자

및 반도체 제품을 개발하기 위한 많은 노력들이 행해지고 있다 [1,2]. 최근에는, 초저전력 메모리 반도체 기반 인공지능(artificial intelligence, AI) 기술 [3], 5G 통신망 기반 슈퍼컴퓨터를 탑재한 자율 주행 자동차 [4], 플렉서블 디스플레이 [5,6] 등과 같은 차세대 지능형 기술 및 제품들이 각광받고 있으며, 그 수요는 급속도로 증가하는 추세이다. 보다 더 향상된 기술을 동반한 장치들을 휴대하고자 하는 고객의 수요에 맞춰 첨단화된 제품을 구현하기 위해서는, 제품을 구성하는 핵심 소자 부품을 소형화, 집적화, 그리고 정밀화 하는 것이 매우 중요하다 [7-11].

이를 가능하게 하려면, 각종 소자의 동작 관련 신호 전달 회로를 포함한 각종 전자·반도체 구성요소를 미세화할 필요가 있다. 왜냐하면, 미세화된 회로 및 셀들은 결국

✉ Woon Ik Park; thane0428@pknu.ac.kr

Copyright ©2021 KIEEME. All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

집적도를 증가시켜 소형화를 도모할 수 있고, 소형화로 인하여 배선의 길이가 짧아진다면 그만큼 신호의 전달 속도를 높일 수 있으며, 저항을 크게 낮춰 전력의 소비까지 줄일 수 있기 때문이다 [12,13]. 따라서 초미세 나노 패턴을 효율적으로 형성할 수 있는 공정기술을 전자소자 제작에 활용하는 방법이 하나의 해결책이 될 수 있다. 현재까지 알려진 대표적인 미세 나노 패턴 형성 방법에는 정밀성이 뛰어난 노광공정 기반 포토리소그래피(photolithography) [14,15], 포토리소그래피와 비교하여 해상도를 큰 폭으로 개선한 극자외선 리소그래피(extreme ultraviolet lithography, EUV) [16], 비교적 저렴한 공정 단가로 미세 나노 패턴을 구현할 수 있는 화학적 패터닝 방법인 블록공중합체(block copolymer, BCP) 유도자기조립(directed self-assembly, DSA) [17,18] 등이 있다.

하지만, 이러한 공정들은 뛰어난 장점에도 불구하고 값비싼 장비 및 재료, 복잡한 공정 및 생산 단가, 양산공정의 부재 등의 단점이 존재한다. 최종적으로 제품의 단가를 줄이고 생산량을 늘리기 위해서는 보다 간편한 저비용의 공정이 필요하다. 하나의 전략적 대안으로, 패턴전사 프린팅(nanotransfer printing, nTP) 공정을 들 수 있다. 패턴전사 프린팅 공정은, 누구나 사용할 수 있을 정도로 손쉽고, 공정 비용이 저렴하며, 적층 공정을 통하여 3차원 패턴 제작이 가능하다는 다양한 장점이 있다. 또한, 해당 공정은 산화물, 금속, 고분자 소재 등 다양한 소재를 패턴화할 수 있기 때문에 전극, 촉매 관련 소재의 형성 관련 연구는 물론이고, 트랜지스터, 센서, 유기 발광 다이오드 등의 다양한 소자 응용 연구에도 활발하게 적용되고 있다 [19-22].

본 연구에서는, 패턴전사 프린팅 공정 중 핵심적으로 사용되는 복제패턴 소재인 고분자 소재를 다양화하기 위하여, 몰드로부터 복제패턴화가 가능한지를 확인하고 기능성 소재의 패턴전사가 가능한지를 확인하고자 하였다. 이때, 패턴전사 프린팅 공정에서의 복제패턴은 최종적으로 형성되는 패턴의 해상도를 결정하기 때문에 매우 중요하게 여겨진다. 먼저, 고투명성, 고광택, 높은 표면경도 등의 우수한 물성으로 인해 디스플레이, 광학기기의 일부 소재 및 건축자재로까지 널리 사용되는 poly(methyl methacrylate) (PMMA)를 포함하여, polystyrene (PS), poly(4-vinylpyridine), epoxy 고분자 소재에 대하여 몰드로부터 복제가 되는지를 테스트하였다. 각 고분자 소재를 용해시킬 수 있는 용매를 사용하여 고분자 용액으로 제조하고, 포토리소그래피 공정으로 제조된 실리콘(Si) 몰드 상에 도포 후 박막층을 박리함으로써 복제패턴을 형성하

였다. 그런 다음, 몰드로부터 복제된 패턴 위에 물리적 증착 공정을 통하여 백금(Pt) 소재를 형성하고, 이를 열 보조 프린팅을 통하여 SiO₂/Si 기판 상에 복제패턴과 백금을 동시에 전사하였다. 패턴전사된 미세구조물은 주사전자 현미경(scanning electron microscope, SEM) 구조 분석을 통해 그 해상도와 균일성을 확인하였다. 더 나아가, 패터닝 되는 소재를 다양하게 하기 위하여, 비휘발성 저항 변화 메모리(resistive random-access memory, ReRAM)의 활성소재 중 하나인 NiO와 이차전지의 양극 활물질인 lithium carbonate (Li₂CO₃)와 같은 각종 산화물에 대한 패턴전사를 실시하였으며, 각 소재를 패턴전사하기 위해 희생층으로 사용되는 폴리머 복제패턴 소재가 기능성 나노 구조물의 형성에 어떠한 영향을 미치는지 확인하였다.

2. 실험 방법

2.1 복제패턴용 고분자 용액의 제조

패턴전사 프린팅 공정에서, 나노 구조물 형성을 위해 첫 번째로 가장 중요한 단계는 품질이 뛰어난 복제패턴을 제작하는 것이다. 먼저, 복제패턴을 형성하기 위한 고체 상태의 고분자를 용액화하였다. 본 연구에서 사용한 고분자는, PMMA (MW = 100 kg/mol, Sigma Aldrich Co.), PS (MW = 35 kg/mol, Sigma Aldrich Co.), P4VP (MW = 60 kg/mol, Sigma Aldrich Co.), epoxy (YD-011, Kukdo Chemical Co.) 네 가지이다. PMMA는 톨루엔(toluene), 아세톤(acetone), 헵테인(heptane) 용액이 4:4:2 비율로 혼합된 용매에 4 wt%로 용해하였고, PS는 톨루엔 용액에 15 wt%만큼 녹여서 사용하였다. P4VP와 epoxy는 각각 아이소프로필 알코올(isopropyl alcohol, IPA)과 아세톤 용액에 9 wt%, 15 wt%만큼 녹여서 용액으로 제조하였다. 용액 제조 시 각 고분자의 wt%를 다르게 한 이유는, 첫째로 고분자마다 분자량이 다르기 때문이며, 둘째로 스핀코팅 후 박막을 형성할 수 있을 정도의 두께를 유지해야 성공적으로 복제패턴이 형성될 수 있기 때문이다. 이렇게 제조된 고분자 용액을 패턴이 새겨진 Si 몰드 상에 코팅하고 분리함으로써 몰드와 역상을 갖는 복제패턴을 만들 수 있다. 참고로, 본 연구에서 사용된 Si 몰드는 라인 형상이고, 복제패턴의 형상은 라인의 역상으로 그 역시 라인 형상을 가진다. 다만, 라인 선포와 공간 선포의 길이는 반대로 나타난다.

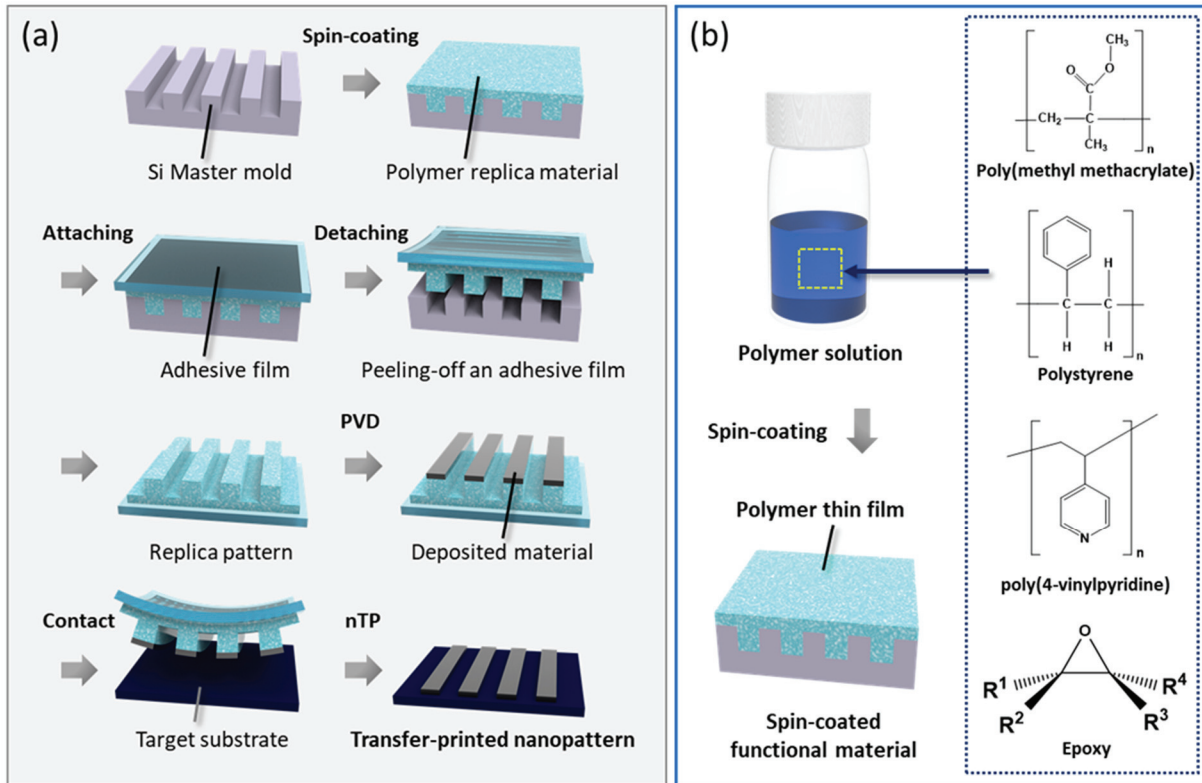


Fig. 1. Schematic illustration of pattern formation by nTP process using various polymer replica materials. (a) nTP process for fabrication of nano-to-micro patterns and (b) several polymer materials for pattern replication.

2.2 미세한 구조물 형성을 위한 패턴전사프린팅 공정

그림 1(a)는 나노/마이크로 패턴을 형성하기 위한 패턴 전사 프린팅 공정의 순서도이다. 먼저, 최종 패턴의 형상 및 선폭을 결정하는 Si 마스터 몰드를 KrF 광원을 기반으로 한 포토리소그래피 공정으로 제작하였다. 마스터 몰드 위, 용액화된 고분자 소재를 5,000 rpm의 속도로 23초간 스핀코팅(spin-coating)하여 박막화하고 접착성 폴리이미드(polyimide, PI) 필름으로 이를 박리하였다. 이렇게 만들어진 복제패턴은 Si 마스터 몰드와 역상을 갖게 된다. 실제로 패턴화할 금속, 산화물 소재를 형성하기 위하여, 복제패턴 위 물리적 증착 방법 중 하나인 direct current (DC) 스퍼터링 또는 radio frequency (RF) 스퍼터링 공정을 사용하였다. 표면이 패턴화되어 있는 고분자 복제패턴 중, 패턴의 형상이 상단을 가리키는 기준으로 돌출부에 선택적으로 증착을 하기 위하여, 증착이 이루어지는 방향과 복제패턴이 바라보는 각도를 90° 로 설치하고 각도 조절 증착(tilt-deposition)을 실시하였다. 증착이 이루어

지는 동안, 메인 챔버 내의 기저압력은 Ar 가스를 주입하여 5×10^{-3} Torr로 유지되었다. 그리고 나서, 전사하고자 하는 기판 위 증착된 소재를 접촉시키고 압력과 열을 가해 주었다. 이때, 균일한 압력을 가해 주면서 열을 전달하기 위하여 4개의 롤러로 구성된 라미네이터 기판, 가열된 롤러를 통과시키면서 패턴을 전사하는 열보조 나노패턴전사 프린팅 방법(thermally-assisted nanotransfer printing, T-nTP)을 사용하였다. 가열된 롤러를 통과한 샘플에서 접착성 필름을 분리하고 함께 전사된 고분자 소재(복제패턴)를 제거해 주면 기판 상에는 복제패턴 위에 증착했던 기능성 소재로 된 패턴만이 남게 된다. 이때, 고분자 소재를 제거하기 위해서는 각 고분자를 용해시켰던 용액을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는, 나노/마이크로 스케일의 기능성 패턴을

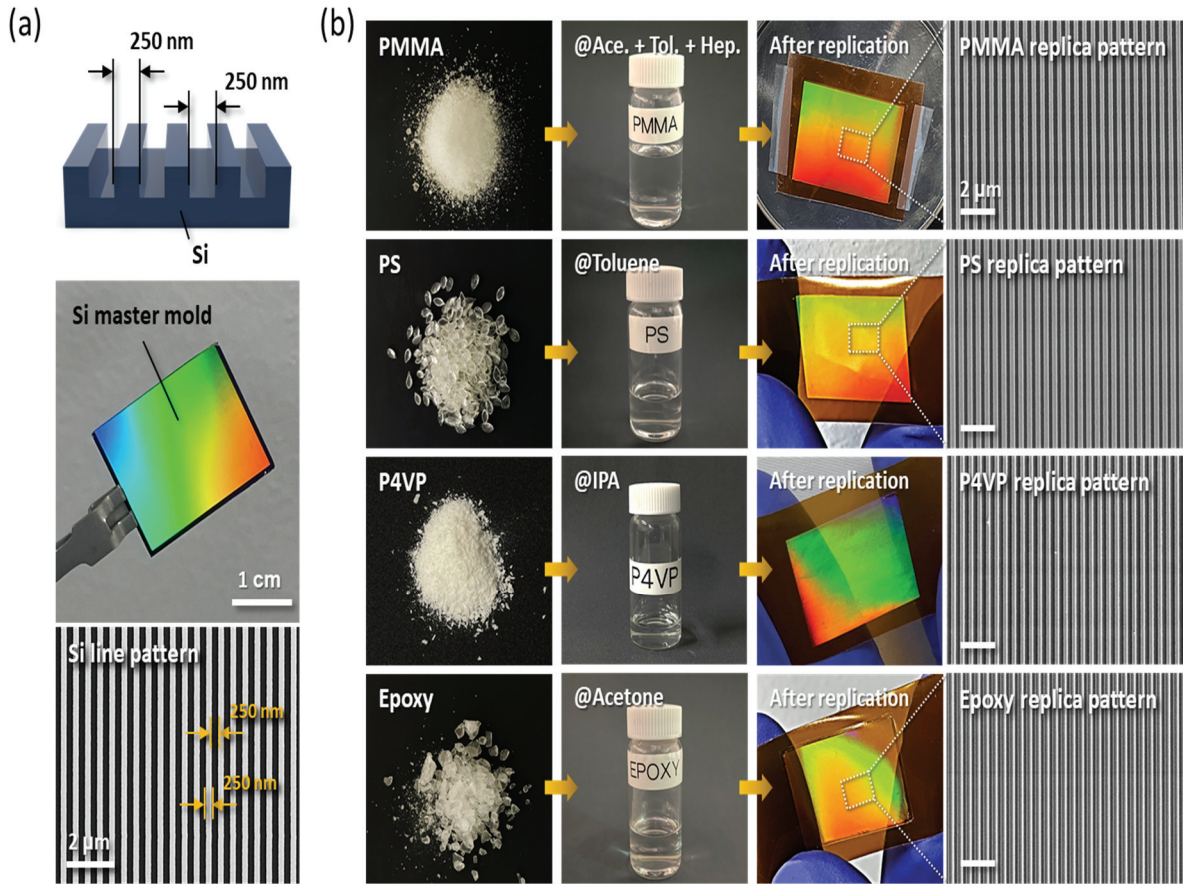


Fig. 2. Replication process of various polymer materials. (a) Si master mold consisting of periodic lines with a width of 250 nm. The Si master mold was fabricated by conventional photolithography process. (b) Replica line patterns of PMMA, PS, P4VP, and epoxy obtained from the Si mold. The duplicated polymeric structures show well-ordered line with a width of 250 nm. All polymers dissolved in each good solvent were spin-coated on the Si mold followed by replication.

제작하기 위해 사용되는 고분자 복제패턴용 소재를 다양하게 제시하고 패턴전사 공정에 적용하기 위한 적합성을 평가하고자 하였다. 우선, Si 마스터 몰드는 선폭, 선 간격, 깊이가 모두 250 nm를 갖는 라인 형상으로 제작하였다. 왜냐하면, 스핀코팅 된 고분자 소재가 마스터 몰드로부터 쉽게 분리되게 하기 위해서 몰드의 종횡비(aspect ratio, AR)이 고려되어야 하기 때문이다 (그림 2(a)). 만약, 몰드가 지나치게 깊은 깊이를 갖는다면, 스핀코팅 된 소재를 몰드에서 깔끔하게 분리하는 것은 매우 어렵다. 그리고 해당 몰드는 한 번 제작하면 물리적인 결함이 발생하지 않는 이상 반영구적으로 사용할 수 있다는 큰 장점이 있다. 그림 2(b)는 고체상태의 PMMA, PS, P4VP, epoxy 원재료, 복제패턴을 만들기 위해 용해도 파라미터에 근거하여 제조한 고분자 용액들, 접착성 PI 필름 위 성공적으로 형성한 레플리카 패턴들의 사진 이미지 및 복제패턴의 형상

을 관찰한 SEM 이미지이다. 네 가지의 고분자 소재에서 모두 Si 마스터 몰드와 정확히 역상을 띠는 250 nm 라인 형상이 도출되었다. 즉, 네 가지 소재 모두 패턴전사프린팅 공정에서 사용되는 복제패턴용 소재로 사용할 수 있다.

그림 3은, 다양한 소재의 복제패턴을 활용하여 SiO₂/Si 기판 위로 Pt 소재를 프린팅 한 결과를 보여준다. 즉, 각종 폴리머 복제패턴 위에 기능성 소재인 전도성 금속 Pt를 증착하고, 해당 Pt 미세 라인 패턴을 원하는 타깃 기판 위에 전사이동이 가능한지를 평가한 결과이다. PMMA, PS, P4VP의 경우, 복제패턴의 형상에 기반한 250 nm Pt 라인 패턴이 성공적으로 형성됨을 확인할 수 있었다. 그림 3(a~c)에 제시된 SEM 이미지 및 고속 푸리에 변환(fast fourier transform, FFT) 패턴을 보면, PMMA, PS, P4VP 복제패턴을 기반으로 패턴닝된 Pt 나노 구조물은 매우 뛰어난 정렬성(균일성)을 갖는 것을 알 수 있다. 이에

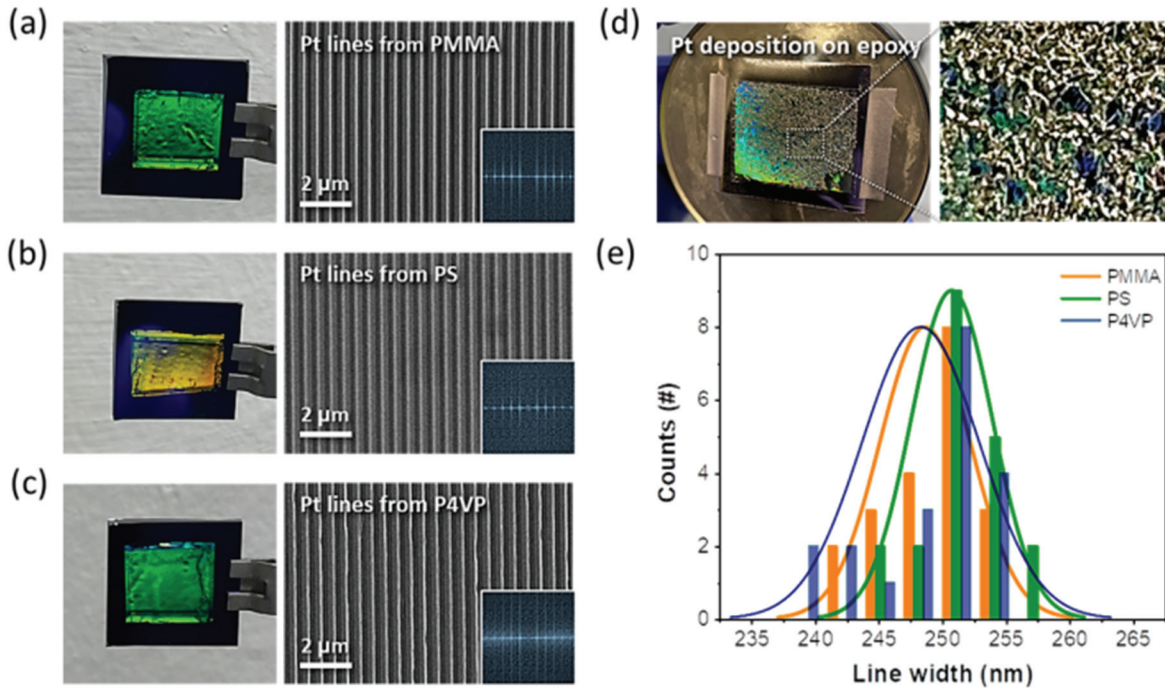


Fig. 3. Highly ordered Pt line structures printed on the SiO₂/Si substrate by using various replica materials. Transfer-printed Pt line patterns obtained from (a) PMMA, (b) PS, and (c) P4VP replica patterns. (d) Photograph image of epoxy replica pattern after Pt deposition by PVD of sputtering system. The epoxy replica material shows the pattern collapse of Pt line due to the plasma damage for epoxy. (e) Uniform size distribution of Pt line structures for (a), (b), and (c). The inset images are FFT patterns, indicating the well-duplicated polymer line structures.

반해, 그림 3(d)의 사진 이미지에서 확인할 수 있듯이, epoxy 소재의 경우에는 증착공정을 실시하면 레플리카 표면이 변형되고 패턴이 무너지는 현상이 발생하게 된다. 이는 epoxy 소재가 낮은 연화온도를 갖기 때문이다. PMMA, PS, P4VP의 경우 각각 약 105°C, 100°C, 137°C의 연화온도를 갖는 반면에 epoxy의 경우 상대적으로 낮은 60~70°C를 나타낸다. 스퍼터링 공정 중, 타겟의 표면에서 방출된 전자와 Ar 이온 입자들의 충돌로 인해 챔버 내의 온도가 epoxy 소재의 연화 온도 이상으로 상승하게 되고, 결국 플라즈마와 Pt 입자에 의해 연화된 epoxy 패턴이 무너지게 되는 것이다. 따라서 기능성 소재 패턴을 전사하기 위한 고분자 소재로 PMMA, PS, P4VP는 사용이 가능한 반면, epoxy 소재는 적합하지 않다. 그리고 각종 복제패턴 소재를 통하여 형성된 라인 형상 나노 구조물의 선폭에 대한 균일성을 확인하였다. 그림 3(e)는 그림 3(a~c)에서 전사된 Pt 라인패턴의 선폭에 대한 균일성에 대한 분석 내용으로서, 프린팅된 패턴 중 임의의 20군데에 대하여 선폭을 측정된 결과이다. PMMA, PS, P4VP로부터 전사된 Pt 라인의 평균 선폭은 각각 248.7 nm, 250.8 nm, 248.3 nm이며, 그 표준편차는 3.48 nm,

3.20 nm, 4.60 nm로 오차 범위 2% 이내의 매우 정확성 높은 패턴이 형성되었다는 것을 확인할 수 있었다. 다시 말해서, PMMA, PS, P4VP 소재들은 나노/마이크로 스케일의 미세 패턴을 전사하기 위해 사용될 수 있는 적합한 고분자 소재로 판단되며, 이는 본 연구에서 사용한 T-nTP 공정 외에 solvent-assisted nanotransfer printing (S-nTP), immersion transfer printing (iTP) 등의 패턴전사 공정에 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

더 나아가서, 패턴링 가능한 소재의 다양화 및 소자 응용 가능성을 확인하기 위하여, 저항 변화 메모리, 이차전지 등을 구성하는 핵심 소재의 패턴링을 시도하였다. 그림 4는, PS와 PMMA 복제패턴을 활용하여 전사된 500 nm 선폭의 nickel oxide (NiO) 라인 패턴과 250 nm 선폭을 갖는 Li₂CO₃ 라인 형상을 나타내는 SEM 이미지이다. RF 스퍼터링 공정을 통해 앞서 평가된 고분자 복제패턴 위에 산화물을 증착한 후, 패턴전사 프린팅 공정을 실시하여 타겟 기판 상에 성공적으로 패턴링이 가능함을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는, 금속 소재뿐만 아니라 저항 변화 메모리 소자에 사용되는 산화물 소재, 이차전지의 양극 활물질 소재 등 다양한 기능성 소재를 다양한 선폭

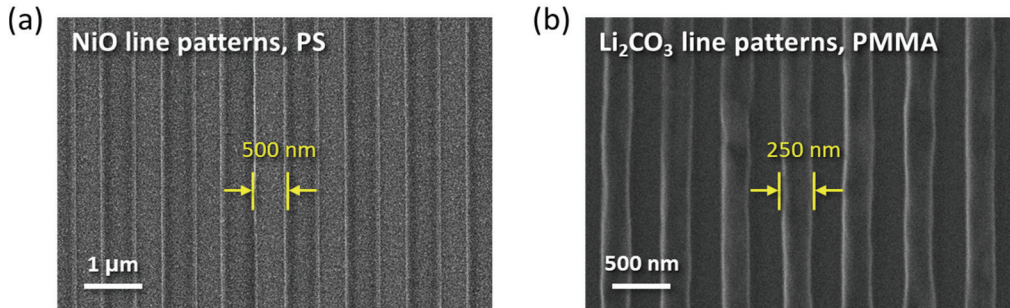


Fig. 4. Well-ordered oxide line structures by nTP. (a) NiO line structure with a width of 500 nm and (b) Li₂CO₃ line structure with a width of 250 nm. NiO and Li₂CO₃ line patterns were obtained by PS and PMMA, respectively.

및 형상을 갖는 패턴으로 구현할 수 있다는 것을 보여준다. 본 연구에서 제시된 복제 고분자 소재를 다양화하고 패턴 전사 공정에 적용하는 접근은, 다양한 물성을 갖는 기능성 소재를 패터닝하는 연구 분야와 접목하여, 향후 넓은 범위의 응용 연구가 이루어질 것으로 기대된다.

4. 결론

본 연구에서는, 나노/마이크로 스케일의 패턴을 형성하기 위한 패턴전사 프린팅 공정에 있어서 복제패턴으로 사용이 가능한 다양한 고분자 소재를 평가 및 제시하였으며, 확보된 고분자 복제패턴 소재 기반 각종 기능성 소재를 타깃 기판 위에 패턴전사 프린팅 함으로써 고정렬 나노 구조물을 성공적으로 형성할 수 있었다. 우선, PMMA, PS, P4VP, epoxy 소재를 용액화하여 복제패턴을 형성하고 패턴전사 공정에 적용될 수 있는지 확인하였다. 네 가지의 소재를 용액화하고 패턴복제화를 진행한 결과, 고정렬성의 고분자 복제패턴을 얻는 데 성공하였다. 그리고 확보된 네 가지의 고분자 패턴 위에 Pt 소재를 증착하여 패턴전사한 결과, epoxy를 제외한 PMMA, PS, P4VP 소재를 통하여 250 nm급 Pt 라인 나노 구조물을 얻을 수 있었다. 해당 라인 패턴의 라인 선폭 균일성을 분석한 결과, 오차범위가 2% 미만인 매우 우수한 패턴전사가 이루어졌음을 확인하였다. 또한, 선폭 250 nm 라인 형상의 Li₂CO₃ 와, 선폭 500 nm 라인 형상의 NiO 패턴을 각각 PMMA, PS 레플리카 패턴으로부터 성공적으로 형성할 수 있었으며, 이는 물리적 증착이 가능한 대부분의 소재에 대하여 나노/마이크로 패턴화가 가능하다는 것을 보여준다. 본 연구에서 제시된 T-nTP 공정에서, 고분자 레플리카는 기능성 소재를 프린팅하기 위한 일회성 수단으로 사용되고 있다. 이러한 연구 결과는, 한번 제작된 몰드를 반복적으

로 사용하면서 기능성 미세 패턴을 제작하는 효율적이고 저렴한 패턴전사프린팅 공정의 소자 응용에 대한 확장성에 기여할 것으로 생각되며, 향후 다양한 전자·반도체 소자 응용 연구로 이어질 수 있을 것으로 기대된다.

ORCID

Woon Ik Park

<https://orcid.org/0000-0002-2577-477X>

감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비(2019년, C-D-2019-1381)에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- [1] J. Miao, X. Liu, K. Jo, K. He, R. Saxena, B. Song, H. Zhang, J. He, M. G. Han, W. Hu, and D. Jariwala, *Nano Lett.*, **20**, 2907 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.0c00741>]
- [2] C. Palencia, K. Yu, and K. Boldt, *ACS Nano*, **14**, 1227 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c00040>]
- [3] X. Jin, C. Liu, T. Xu, L. Su, and X. Zhang, *Biosens. Bioelectron.*, **165**, 112412 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bios.2020.112412>]
- [4] A. H. Sodhro, Z. Luo, G. H. Sodhro, M. Muzamal, J.J.P.C. Rodrigues, and V.H.C. de Albuquerque, *Future Gener. Comput. Syst.*, **95**, 667 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.12.008>]
- [5] X. Chen, B. Liu, C. Zhong, Z. Liu, J. Liu, L. Ma, Y. Deng, X. Han, T. Wu, W. Hu, and J. Lu, *Adv. Energy Mater.*, **7**, 1700779 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1002/aenm.201700779>]
- [6] M. Mativenga, D. Geng, B. Kim, and J. Jang, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **7**, 1578 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1021/>

- am506937s]
- [7] T. W. Park, H. Jung, Y. R. Cho, J. W. Lee, and W. I. Park, *Korean J. Met. Mater.*, **56**, 910 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.3365/KJMM.2018.56.12.910>]
- [8] T. W. Park and W. I. Park, *Korean J. Met. Mater.*, **58**, 145 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.3365/KJMM.2020.58.2.145>]
- [9] B. K. You, W. I. Park, J. M. Kim, K. I. Park, H. K. Seo, J. Y. Lee, Y. S. Jung, and K. J. Lee, *ACS Nano*, **8**, 9492 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1021/nn503713f>]
- [10] H. J. Park, Y. J. Cha, and J. S. Kwak, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **32**, 47 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2019.32.1.47>]
- [11] J. W. Jeong, S. R. Yang, Y. H. Hur, S. W. Kim, K. M. Baek, S. Yim, H. I. Jang, J. H. Park, S. Y. Lee, C. O. Park, and Y. S. Jung, *Nat. Commun.*, **5**, 5387 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1038/ncomms6387>]
- [12] W. I. Park, B. K. You, B. H. Mun, H. K. Seo, J. Y. Lee, S. Hosaka, Y. Yin, C. A. Ross, K. J. Lee, and Y. S. Jung, *ACS Nano*, **7**, 2651 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1021/nn4000176>]
- [13] W. I. Park, J. M. Yoon, M. Park, J. Lee, S. K. Kim, J. W. Jeong, K. Kim, H. Y. Jeong, S. Jeon, K. S. No, J. Y. Lee, and Y. S. Jung, *Nano Lett.*, **12**, 1235 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1021/nl203597d>]
- [14] C. Carbonell, D. Valles, A. M. Wong, A. S. Carlini, M. A. Touve, J. Korpanty, N. C. Gianneschi, and A. B. Braunschweig, *Nat. Commun.*, **11**, 1244 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14990-x>]
- [15] M. Fromel, M. Li, and C. W. Pester, *Macromol. Rapid Commun.*, **41**, 2000177 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1002/marc.202000177>]
- [16] S. K. Kim, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, **16**, 5415 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1166/jnn.2016.12254>]
- [17] W. I. Park, K. Kim, H. I. Jang, J. W. Jeong, J. M. Kim, J. Choi, J. H. Park, and Y. S. Jung, *Small*, **8**, 3762 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1002/sml.201201407>]
- [18] M. J. Kim, W. I. Park, Y. J. Choi, Y. K. Jung, and K. H. Kim, *RSC Adv.*, **6**, 21105 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1039/c6ra00350h>]
- [19] J. W. Jeong, W. I. Park, L. M. Do, J. H. Park, T. H. Kim, G. Chae, and Y. S. Jung, *Adv. Mater.*, **24**, 3526 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201200356>]
- [20] J. Ko, Z. J. Zhao, S. H. Hwang, H. J. Kang, J. Ahn, S. Jeon, M. Bok, Y. Jeong, K. Kang, I. Cho, J. H. Jeong, and I. Park, *ACS Nano*, **14**, 2191 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1021/acsnano.9b09082>]
- [21] T. W. Park and W. I. Park, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **31**, 510 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2018.31.7.510>]
- [22] 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). [DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.abb6462>]