

소프트 리소그래피(Soft Lithography)를 이용한 마이크로/나노 패터닝 기술

Soft Lithographic Methods to Micro/Nanofabrication

박경선 · 이기석 · 성명모 | Kyung Sun Park · Ki Seok Lee · Myung Mo Sung

Department of Chemistry, Hanyang University, 222 Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul 133-791, Korea

E-mail: smm@hanyang.ac.kr

1. 서론

나노과학과 나노기술의 빠른 발전을 위해서는 나노크기의 구조를 신속하고 경제적으로 제조할 수 있는 기술이 필수적이며 따라서 나노패터닝과 관련된 폭넓은 기술이 개발되었거나 개발되는 단계에 있다. 예를 들어 deep UV($\lambda=200\text{--}290\text{ nm}$)와 extreme UV($\lambda<200\text{ nm}$) 포토리소그래피(photolithography), 상-이동 포토리소그래피(phase-shift photolithography), 전자-빔 라이팅(electron-beam writing), 집중 이온 빔(focused ion beam) 리소그래피, X-선 리소그래피, 스캐닝 프로브 리소그래피(scanning probe lithography) 등을 들 수 있다.¹ 최근에는 화학, 생물학, 의학, 촉매, 유기전자와 에너지저장 및 변환 등의 응용분야에 마이크로 및 나노패터닝의 이용이 각광받고 있는데² 기존의 나노구조를 제작하는 기술은 장치, 시약 등의 기술 비용이 크거나 유기나 생체물질의 이용과 곡면이나 유연한 기판의 적용에 한계를 갖기 때문에 새로운 미래 기술은 이런 문제를 해결하는 방향으로 진행되고 있다.

1990년대 초부터 Harvard 대학의 Whitesides 교수는 미세접촉프린팅(microcontact printing, μCP)과 미세몰딩(micromolding)을 “소프트 리소그래피(soft lithography)” 방법으로 정의하고 많은 독보적인 연구 결과들을 발표하였다.³ 소프트 리소그래피 방법은 유연한 유기물질(작용기를 갖는 알칸과 고분자물질)을 사용하여 기존의 포토리소그래피에서 사용하는 복잡한 장치를 사용하지 않고 패턴(pattern)이나 구조물을 만드는 새로운 전사법을 말한다. 이 기술은 빠르고 값싸게 나노 또는 마이크로미터 단위의 형상과 구조물을 제작하기에 용이하다. 소프트 리소그래피는 고분자 도장을 이용하여 원하는 기판에 패턴을 전사하는 방식으로 방법에 따라 크게 프린팅(printing)과 몰딩(molding)으로 나눌 수 있다. 대표적인 소프트 리소그래피 방법으로는 미세접촉프린팅(μCP), decal transfer 미세전사법(decal transfer microlithography),

Author



박경선

2003 국민대학교 화학과 (학사)
2010 UC Davis 화학과 (석사)
2011-현재 한양대학교 화학과 (박사과정)



이기석

2012 한양대학교 화학과 (학사)
2012-현재 한양대학교 화학과 (석사과정)



성명모

1986 서울대학교 화학과(학사)
1986-1992 한국화학연구소 연구원
1996 University of Houston (박사)
1996-1997 UC Berkeley (박사후 연구원)
1997-2000 한국화학연구원 선임연구원
2000-2006 국민대학교 화학과 부교수
2006-현재 한양대학교 화학과 교수

DTM), 광 스탬프(light stamp) 등의 프린팅 방법과 레플리카 물딩(replica molding), 모세관 힘 리소그래피(capillary force lithography) 모세관-미세물딩(micromolding in capillaries, MIMIC), 미세전사물딩(microtransfer molding, μ TM), 나노임프린팅(nanoimprinting), 액체중재전사물딩(liquid-bridge-mediated nanotransfer molding, LB-nTM) 등의 물딩법이 있다. 이 글에서는 소프트 리소그래피 방법을 이용하여 마이크로미터 또는 나노미터 크기의 구조를 제작하고 이 구조를 이용한 응용연구 중심으로 연구동향을 소개한다.

2. 본론

2.1 미세접촉프린팅(Microcontact Printing- μ CP) 제조방법

미세접촉프린팅은 원하는 구조로 형상화된 탄성체 스탬프에 자기조립 단분자막(self-assembled monolayers, SAMs)을 형성할 수 있는 잉크를 묻혀 고체 기질의 표면으로 접촉에 의해 전사한 후 선택적 에칭을 통하여 기질을 패터닝하는 기술이다. 그림 1에 미세접촉프린팅을 도식화 하였다.⁴

보통 Si 기판에 기존의 포토리소그래피를 이용하여 원하는 구조의 형상을 만든 후 폴리다이메틸실록세인(polydimethylsiloxane-PDMS)으로 만든 탄성중합체(elastomer)을 부어서 원하는 모양의 도장을 제작한다. 이상과 같이 제작한 탄성체 스탬프에 알칸티올(alkanethiol)과 같이 SAMs를 형성할 수 있는 분자화합물 용액을 묻혀 접촉에 의해 금 또는 은과 같은 기질 표면에 옮기면 그림 1에 보이듯이 기질 표면에 패터닝 된 SAMs가 만들어 진다. 이와 같이 정렬되어 만들어진 유기 단분자막은 소수성 메틸 반응기를 가지고 있어 아래쪽의 기질을 수용성 에칭용액의 용해로부터 보호할 수 있으므로 기질을 선택적으로 에칭하여 다양한 모양과 크기의 구조물을 마이크로미터 내지는 나

노미터 크기로 제작할 수 있다.

미세접촉프린팅은 (i) 알칸티올레이트(alkanethiolate)를 금, 은, 구리, GaAs에 적용한 경우, (ii) 유리, 규소/산화규소, 고분자 등에 알칸실록세인(alkanesiloxane)을 적용한 예, (iii) 금속의 산화막 위에 카르복실(carboxylic)이나 히드록사믹산(hydroxamic acid)를 적용한 경우, 산화지르코늄에 알킬포스포네이트(alkylphosphonate)를 적용한 경우, 인듐-틴-산화물에 알킬포스포닉산(alkylphosphonic acid)를 적용한 경우 등이 보고되었다.⁵ 이와 같은 미세 전사법의 원리는 금과 은에 대해 가장 잘 밝혀져 있는데 긴 사슬의 알칸티올레이트의 말단에 위치한 소수성의 메틸기가 아래쪽의 기질을 수용성 에칭용액의 용해로부터 보호하기 때문이다. 형상화된 금속의 박막은 바닥의 기질인 SiO_2 , Si 또는 GaAs의 에칭에 대한 새로운 마스크로의 사용이 가능하다. 미세접촉프린팅은 곡면에 적용이 용이하며, 원하는 모양의 3차원적 금속 구조물을 간단하게 마이크로미터 크기로 제작할 수 있어 미세가공이 가능하다. 실험은 매우 간단하고 연속 공정이 가능하여 마이크로미터 단위의 구조를 수십 초 내로 제작할 수 있다.

1 μm 이상의 SAMs을 형상화하는 데는 미세접촉프린팅이 용이하며, 더 작은 크기는 스탬프의 모양이나 인쇄방법을 변화시키면 가능하다. 예컨대 켜기모양의 스탬프의 압력을 조절하여 인쇄하거나 수용액에서 티올을 인쇄하면 작은 형상도 만들 수 있다. 선택적 에칭을 수반하는 미세접촉프린팅은 다양한 물질로 조절된 모양과 크기의 마이크로미터 내지는 나노미터 크기의 구조를 제작할 수 있다. 이와 같은 활용성은 셀-부착, 센서, 전기화학, 광학회로 등의 연구 등에 적합하도록 디자인하여 용도에 맞게 직접 이용이 가능하다. 또한 습윤(wetting)이나 접착(adhesion)과 같은 마찰학(tribology)의 기초적인 연구가 가능하다. 그러나, 최종산물의 품질은 아직 몇 가지 측면에서 반도체 소자의 제조에 적합하지 못하다. 첫째, 금과 은에 형성된 SAMs가 레지스트(resist) 물질로는 가장 훌륭하지만, 전자재료 제작에서 마스크로는 적절하지 못하다. 둘째, 최고의 품질의 SAMs에서 조차 결함밀도가 5 pits/ mm^2 로 비교적 크다. 셋째, 다층막 제조공정은 레지스트 형상화에 필요한 기술은 아직 잘 정립되지 못한 상태이다. 미세접촉프린팅 기술은 이러한 문제를 해결하는 방향으로 빠르고 활발하게 연구가 이루어지고 있다.

현재 진행되고 있는 소자제작기술에 관한 예는 다음과 같다. 산화물 박막에 대한 형상화는 일반적인 증착방법으로 기질에 박막을 고르게 입힌 후에 레지스트를 코팅하고

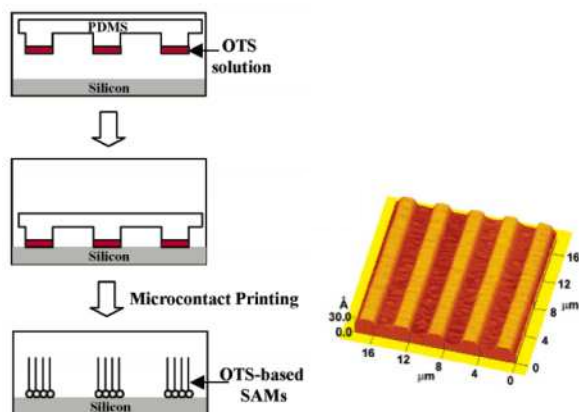


그림 1. 미세접촉프린팅과 SAMs 패터닝.

전사법으로 선택적인 에칭을 하는 방법을 쓰고 있으나, 산화물의 경우 에칭이 고르지 않고 어렵기 때문에 레지스트의 선택이 용이하지 않다. 반면 SAMs을 이용하여 표면의 특성을 변화시키면 원하는 부분만을 박막으로 만들 수 있다. 이와 같은 선택적 형상화는 박막물질과 기질사이의 접착성(adhesion)과 긴장(strain)에서 기인된다. TiO_2 , Ta_2O_5 , LiNbO_3 , $(\text{Pb},\text{La})\text{TiO}_3$, $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$, LaMnO_3 등과 같은 산화물의 박막이 SAMs를 이용하여 미세접촉프린팅으로 산화물 박막을 형상화하여 보고한 바 있다(그림 2).⁴ 또한 미세접촉프린팅의 장점인 손쉽다는 점으로 비교적 큰 크기(1 마이크로미터 이상)를 갖는 형상의 다층박막의 제조를 선택적 박막 코팅 방법으로 전사법을 쓰는 반도체 공정 실험실이 아닌 화학실험실에서 가능하게 되었다는 점이다.

2.2 Decal Transfer 미세전사법(Decal Transfer Microlithography-DTM)

미세접촉프린팅 기술 중 알칸티올을 금, 은, 구리에 적용한 경우에는 나노미터 크기의 해상도를 나타내는 등 다른 전사법으로는 구현하기 어려운 대면적 패터닝이나 꼭

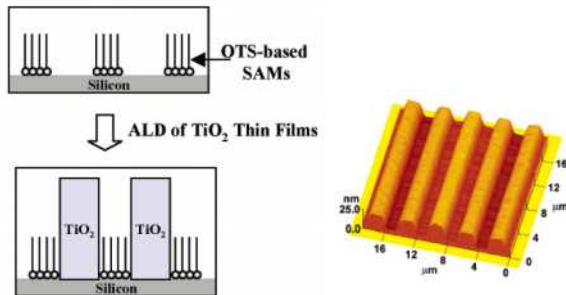


그림 2. 선택적 증착 과정과 패터된 박막.

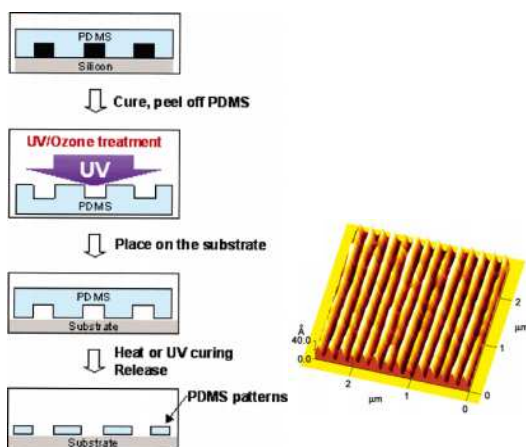


그림 3. DTM과 패터된 PDMS.

면 패터닝 같은 특수한 기능을 가지고 있으며, 아주 간단하게 빠른 속도로 연쇄작업이 가능한 매우 경제적인 패터닝 기술이다. 다만, 이 경우 기판에 먼저 금, 은, 구리를 코팅 해야 하는 문제점이 있어 유리, 규소/산화규소, 고분자 등에 직접 미세접촉프린팅 방법을 이용하는 것이 편리한데 이 경우 알칸실레인(alkanesilane)을 적용하여야 한다. 알칸실레인을 이용하는 경우에 나노미터 단위 크기의 패터닝이 불가능하고 연쇄작업과 재현성에 심각한 문제점이 들어나고 있어 실제 응용에 어려움을 주고 있다. 이와 같은 문제점들은 주로 잉크로 이용되는 알칸실레인 화합물들이 공기 중에서 불안정하여 중합되면서 발생하게 되므로, 나노미터 크기의 패터닝을 연쇄작업으로 재현성 있게 하기 위해서는 잉크를 사용하지 않는 새로운 기술이 바람직하다. 최근에 잉크를 사용하지 않는 새로운 미세접촉프린팅 기술이 개발되어 decal transfer 미세전사법(DTM)로 명명되었는데,⁶ 이 방법을 이용하면 나노미터 크기의 해상도를 가지는 패터닝을 연쇄작업으로 재현성 있게 실행할 수 있을 것으로 예상된다. 그림 3에서 본 연구실에서 DTM 과정과 500 nm 패터닝을 한 결과를 나타내었다.⁷

2.3 광-결합 마스크(Light-Coupling Mask-LCM)

미세접촉프린팅에 이용되는 PDMS 도장은 나노미터 크기의 구조를 도장 표면에 쉽게 만들 수 있으며 유연성이 좋아 고체 기질의 표면에 균일하게 접촉이 가능하여 고분해능 리소그래피의 마스크로 가장 유망하다. 원하는 구조를 가지고 있는 PDMS 도장을 포토레지스트(photoresist, PR)가 코팅된 고체 기질에 접촉시킨 후 UV(248 nm)를 조사해 주면 접촉한 부분에 있는 PR만이 분해되어 패터닝이 일어나게 되는데 이때 사용하는 PDMS 도장을 light

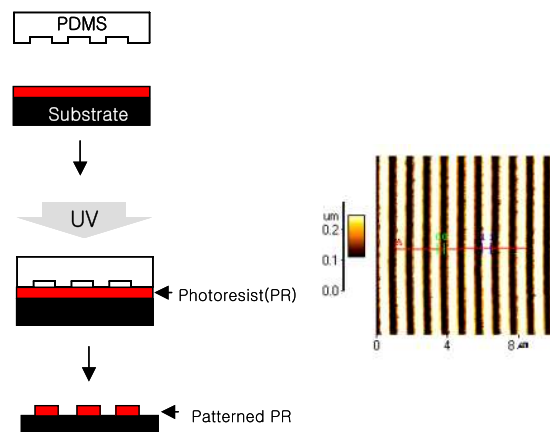


그림 4. Light stamp를 이용한 나노패터닝 기술.

stamp 또는 light-coupling mask(LCM)라고 부른다.⁷ 고체 기질의 표면에 PR을 입힌 후 light stamp를 마스크로 이용하여 UV를 조사하면 패터닝된 PR을 얻을 수 있으며, 이 경우 light stamp의 집광(focusing)효과 때문에 복잡한 렌즈 구조 없이 고분해능의 패터닝이 가능하여 나노미터 크기 구조체를 만들 수 있다. Light stamp를 이용한 나노패터닝 기술은 미세접촉프린팅의 장점과 포토리소그래피의 장점을 결합한 새로운 개념의 기술로서 나노미터 크기의 패터닝이 가능하며 연쇄작업과 재현성이 우수할 것으로 예측된다.

2.4 레플리카 몰딩(Replica Molding)

레플리카 몰딩(replica molding)방법은 유연한 고분자로 만들어진 도장을 이용하여 원본의 정보(예를 들어, 형태나 표면의 거칠기나 구조 등)를 복제할 수 있으며, 높은 종횡비를 갖는 나노 단위의 구조체를 복제하는데 효과적으로 사용될 수 있다.⁸ 레플리카 몰딩은 다차원 구조체를 대량으로 복제하는데 편리하고, 간단하고, 저비용의 방법이다. 그림 5에서 나노구조의 폴리우레탄(polyurethane)의 복제과정을 도시하였다. 레플리카 몰딩의 신뢰성은 반데르발스 상호작용(Van der Waals interaction)과 습윤, 몰드로의 충전과 같은 물리적 요인들에 의해 결정된다. 이러한 물리적인 상호작용은 100 nm 나노미터 이하의 구조체에서 광학 회절에 의한 한계를 갖는 포토리소그래피보다 더욱 정교한 복제를 가능하게 한다. 또한 PDMS의 탄성을 이용하여 압축과 같은 성형으로 다양한 크기와 모양의 패턴을 복제할 수 있는 장점이 있다. 포토리소그래피로 3차원 구조를 복제할 때는 여러 단계의 과정이 필요한 반면, 레플리카 몰딩을 이용하면 한번에 복제할 수 있다. 레플리카 몰딩은 회절격자, 홀로그램, 콤팩트디스크(CD)와 미세도구의 대량생산에 이용된다.⁹

2.5 나노임프린팅(Nanoimprinting)

미네소타의 Chou 교수 연구팀은 압축 몰딩(compression

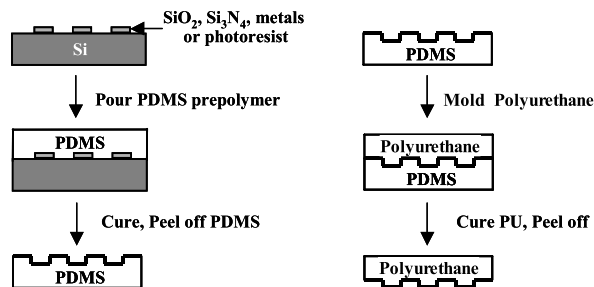


그림 5. 레플리카 몰딩을 이용한 폴리우레탄 스탬프의 제작.

molding)과 형상전이(pattern transfer)의 방법을 응용한 나노임프린팅 리소그래피(nanoimprinting lithography-NIL)를 사용하여 나노크기의 형상화를 가진 금속 박막을 합성하여 발표하였다.¹⁰ 기존의 리소그래피 방법들의 문제점으로 지적되는 고비용, 긴 공정시간, 광원의 회절에 의한 분해능의 한계 등을 보완할 수 있는 방법으로, 공정이 쉽고 간단하고 비교적 저가의 장비와 재료를 이용하는 나노임프린팅 기법이 각광받고 있다. 또한 3차원 구조의 제작 시 기존의 포토리소그래피 공정으로는 다수의 복잡한 공정을 통해서 만들어지지만, 이런 나노임프린팅으로는 한번의 공정으로 구현이 가능하다는 점에서 시간, 비용 측면에서 장점이 있다.¹¹ 그림 6에서 보는 바와 같이 고분해능 전자선 리소그래피(high resolution electron beam lithography)와 반응성 이온 에칭(reactive ion etching)으로 제작한 Si 도장을 스핀 코팅한 190 nm 두께의 고분자 레지스트(polymer resist) 박막에 임프린팅하고 반응성이온 에칭으로 선격자 편광판을 제작할 수 있다.¹²

2.6 모세관-미세몰딩(Micromolding In Capillaries, MIMIC)

모세관-미세몰딩(micromolding in capillaries, MIMIC)의 기술은 기판과 접촉된 마이크로 패터닝된 몰드 사이의 공간이 모세관의 역할을 하여 액상의 고분자나 유기용액이 빈 공간에 스스로 채워지는 현상을 이용한 방법이다.¹³ 그림 7에 마이크로선 형상의 PDMS몰드를 이용한 모세관-미세몰딩 방법을 도식화 하였다. 이 방법을 이용하면 간단하게 넓은 면적의 미세구조를 제작할 수 있으며, 제작 비용이 저렴하고, 평평하지 않은 표면에도 미세구조를 형성할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나 고립된 구조체는 제작할 수 없으며, 모세관의 크기가 작을수록 채워지

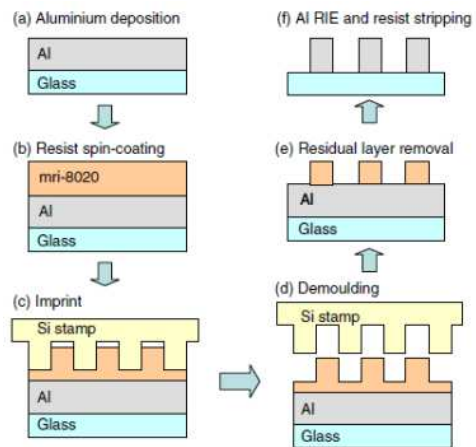


그림 6. 나노임프린팅 방법을 이용한 선격자 회절판의 제작 모식도.

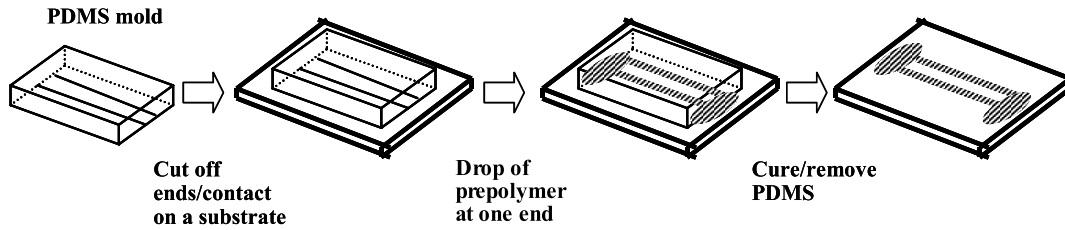


그림 7. 모세관-미세몰딩.

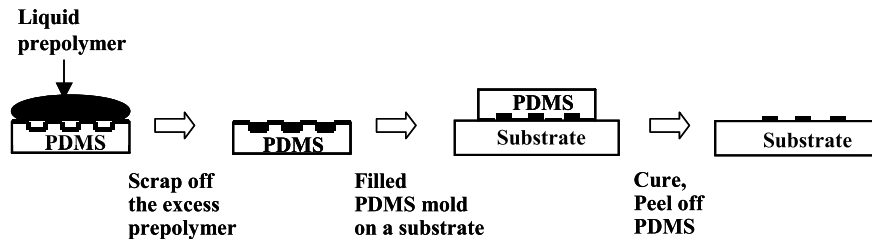


그림 8. 미세전사몰딩.

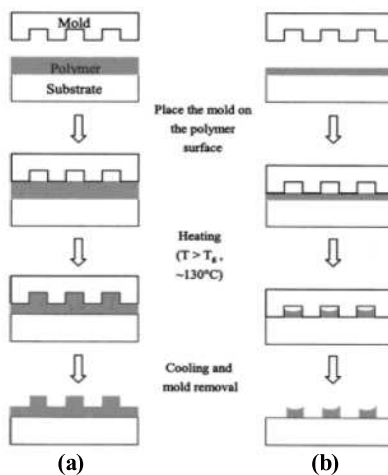


그림 9. 모세관 힘 리소그래피의 모식도: (a)초기 고분자막의 두께가 원본 몰드의 채널 높이 보다 두꺼울 때, (b)초기 고분자막의 두께가 얇을 때.

는 속도가 느려서 시간이 오래 걸리고 패턴의 처음부터 끝까지 완전하게 채우는 것이 어렵다는 문제점이 있다. 모세관-미세몰딩 기술은 유기/무기 나노복합재료의 제작,¹⁴ 고분자 박막 트랜지스터,¹⁵ 세포의 접착을 위한 미세구조의 패턴¹⁶ 등 주로 마이크로 단위의 구조 제작에 적용된다.

2.7 미세전사몰딩(Microtransfer Molding- μ TM)

미세전사몰딩(microtransfer molding, μ TM)은 훨씬 빠르고 손쉽게 복제가 가능한 방법이지만,¹⁷ 모세관-미세 몰딩 방법과 달리 얇은 고분자 잔여물이 기질 위에 남게 되는 단점이 있다(그림 8). 이 두 가지 몰딩방법으로 고분자, 무기화합물, 졸-겔 물질 등을 기질 위에 마이크로

미터 크기로 형상화 할 수 있으며 고분자의 망상조직, 다층 박막, 고분자 파동유도(waveguide)등의 기능성 물질의 제작에 용이하다. 미세몰딩(micromolding), 구형 고분자 주형(polystyrene sphere templating), 무기 졸-겔 입자의 자기조립(cooperative assembly of inorganic sol-gel species) 등 3가지 아이디어를 결합하여 다공성 실리카, 나 이오비아, 티타니아 등의 3차원 구조를 형상화하는데 성공한 사례가 보고되어 있다.¹⁸

2.8 모세관 힘 리소그래피(Capillary Force Lithography)

모세관 힘 리소그래피의 기본 형식은 용융된 고분자를 채워 넣는 임프린팅 리소그래피와 같은 방식으로, 미세접촉프린팅과 유연한 몰드를 사용하는 소프트 리소그래피의 주요 요소들을 결합시킨 방법이다. 유리전이온도(T_g)보다 높은 온도로 가열한 고분자 막에 PDMS 몰드를 올려놓는 간단한 방법으로 고분자의 나노패턴을 형성할 수 있다(그림 9). 이 방법은 실험과정이 나노임프린팅 리소그래피와 흡사하지만 단단한 몰드가 아닌 부드러운 몰드를 이용하며, 외부에서 압력을 가하지 않고 물질의 모세관현상을 이용한다는 차이점이 있다. 또한 초기 고분자 막의 두께를 얇게 할수록 미세구조물 사이의 잔여물이 거의 없어지기 때문에, 이 후의 에칭 공정이 거의 필요하지 않다는 장점이 있다.¹⁹ PDMS와 같은 투과성이 있는 물질로 만들어진 미세 채널에서의 용융된 고분자의 모세관 현상은 시간, 온도, 고분자와 몰드 사이의 습윤 정도, 초기 고분자 막의 두께, 그리고 고분자가 채워질 수 있는 몰드의 채널 너비와

같은 몇 가지 변수들에 의해 나타난다.²⁰

모세관 힘 리소그래피를 응용한 기술로 자외선에 의해

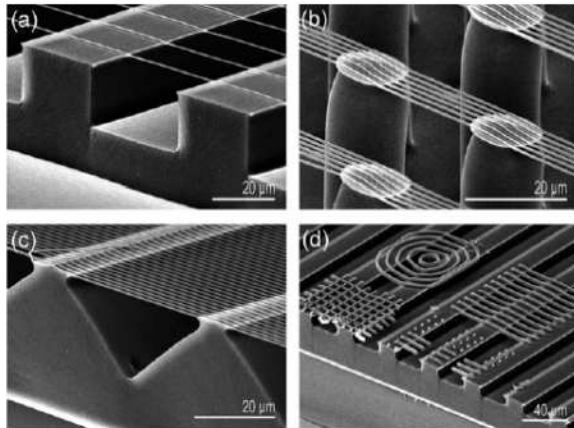


그림 10. 미세 구조물 위에 형성시킨 다양한 나노선 다리구조의 측면 SEM 이미지.

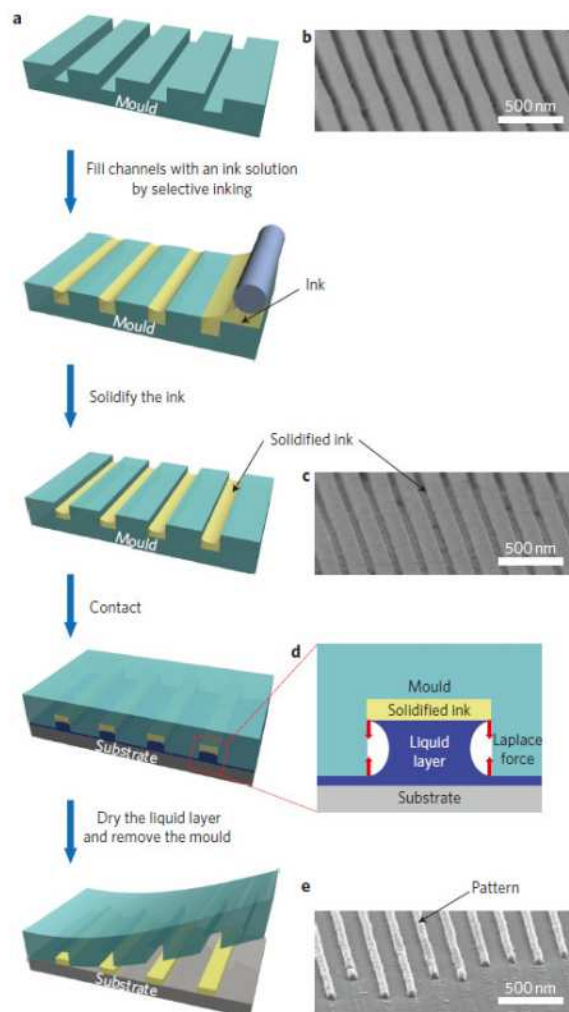


그림 11. 액체중재전사몰딩법.

정화되는 고분자를 모세관 힘 리소그래피에 적용하면 잘 정렬된 마이크로/나노미터 단위의 계층별 구조체를 제작할 수 있다. 이 방법은 자외선복사에 의한 경화 과정에서 산소 방해 효과를 이용하여 두 단계의 몰딩처리를 하는 것으로서, 이를 이용하여 그림 10과 같이 다층의 계층별 혹은 매달린 나노다리구조를 형성할 수 있다.²¹ 이 방법을 새로운 제작 도구로 사용하여 생체모방기술, 미세유체공학, 광학, 전자소자 등 다양한 어플리케이션에 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

2.9 액체중재전사몰딩(Liquid-Bridge-Mediated Nanotransfer Molding)

미세전사몰딩(microtransfer molding)과 임프린트(imprint) 방법은 큰 면적의 기능성 미세 구조의 공정을 위해 가장 유용한 방법이지만, 모서리 부분의 정밀성, 여러 번의 패턴 정렬(alignment)의 기술적 어려움, 그리고 프린팅 후에 남는 잔여물 등의 단점이 있다. 나노구조물을 형성하면서 잔여물이 남지 않는 방법으로 본 연구진이 최근에 개발 발표한 액체중재(liquid-bridge-mediated) 전사몰딩에 기초한 직접 프린팅 방법이 있다. 극성액상층(polar liquid layer)은 기능성 전자재료와 기판 사이에서 안정적인 접촉(contact) 형성을 위한 접착층 역할을 한다. 미세전사몰딩과는 달리, 표면 확산을 이용하지 않아, 2~6 nm의 모서리 해상도와 60 nm 미만의 최소 구현 크기를 잔여물 없이 프린팅 할 수 있다(그림 11).²² 또한 이 새로운 방법으로 zinc-tin oxide (ZTO) 나노와이어 전기장 효과 트랜지스터와 6,13-bis(triisopropylsilyl)ethynyl)pentacene (TIPS-pentacene) 박막 트랜지스터를 제작하였고, 측정 결과 각각 $0.4 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{sec}^{-1}$, $0.03 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{sec}^{-1}$ 의 전하 이동도를 보였다.²²

3. 결론

소프트 리소그래피는 기존의 포토리소그래피와 더불어 마이크로/나노 크기의 패터닝을 제조하는 기술의 한 분야로 주목 받고 있다. 프린팅과 몰딩 등 보통의 소프트 리소그래피는 저비용과 단순 공정의 장점을 필두로 개발되어 왔으며 유연한 고분자 스탬프를 이용하여 곡면이나 복잡한 기판의 패터닝도 가능하여 유기 전자소자(organic electronics), 플라즈몬(plasmonics), 광학(optics), 세포생물학(cell biology), 나노유체공학(nanofluidics), 나노전자기계시스템(nanoelectromechanical systems) 등 다양한 응용분야에 적용 가능성이 있으며 앞으로 활용이 크게

늘어날 것으로 기대된다.

참고문헌

1. (a) S. M. Huang, L. M. Dai, and A.W.H. Mau, *Adv. Mater.* **14**, 1140 (2002). (b) P.A. Peterson, Z. J. Radzinski, S.A. Schwalm, and P.E. Russell, *J. Vac. Sci. Technol. B* **10**, 3088 (1992). (c) M. Khan, G. Han, S.B. Bollepalli, and F. Cerrina, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **17**, 3426 (1999). (d) H. H. Solak, D. He, W. Li, and F. Cerrina, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **17**, 3052 (1999). (e) C. F. Quate, *Surface Science*, **386**, 259 (1997).
2. (a) E. Martinez, A. Lagunas, C. A. Mills, S. Rodriguez-Segui, M. Estevez, S. Oberhansl, J. Comelles, and J. Samitier, *Nanomedicine*, **4**, 65 (2009). (b) K. A. Kilian, B. Bugarija, B. T. Lahn, and M. Mrksich, *PNAS*, **107**, 4872(2010).
3. Y. Xia, X.-M. Zhao, and G. M. Whitesides, *Microelectron. Eng.*, **32**, 255 (1996).
4. M. H. Park, Y. J. Jang, H. M. Sung-Suh, and M. M. Sung, *Langmuir*, **20**, 2257 (2004).
5. (a) G. M. Whitesides and P. E. Laibinis, *Langmuir*, **6**, 87 (1990). (b) A. Ulman, *Introduction to Thin Organic Films: From Langmuir-Blodgett to Self-assembly*, Academic Press. Boston, 1991. (c) G. Cao, H.-G. Hong, and T. E. Mallouk, *Acc. Chem. Res.*, **25**, 420 (1992).
6. W. R. Childs and R. G. Nuzzo, *J. Am. Chem. Soc.*, **124**, 13583 (2002).
7. K. S. Park, E. K. Seo, Y. R. Do, K. Kim, and M. M. Sung, *J. Am. Chem. Soc.*, **128**, 858 (2006).
8. Y. Xia, E. Kim, X.-M. Zhao, J. Rogers, M. Prentiss, and G. Whitesides, *Science*, **273**, 347 (1996).
9. (a) B. L. Ramos, and S. J. Choquette, *Anal. Chem.*, **68**, 1245 (1996). (b) B. D. Terris, H. J. Mamin, M. E. Best, J. A. Logan, and D. Rugar, *Appl. Phys. Lett.*, **69**, 4262 (1996).
10. S. Y. Chou, P. R. Krauss, and P. J. Renstrom, *Appl. Phys. Lett.*, **67**, 3114 (1995).
11. J. Haisma, M. Verheijen, K. van den Heuvel, and J. van den Berg, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **14**, 4124 (1996).
12. S. W. Ahn, K. D. Lee, J. S. Kim, S. H. Kim, J. D. S. H. Lee, and P. W. Yoon, *Nanotechnology*, **16**, 1874 (2005).
13. N. L. Jeon, I. S. Choi, B. Xu, and G. M. Whitesides, *Adv. Mater.*, **11**, 946 (1999).
14. V. Kalima, I. Vartiainen, and T. Saastamoinen, *Opt. Mater.*, **31**, 1540 (2009).
15. (a) H. Kang, T. I. Kim, K. K. Han, and H. H. Lee, *Org. Electron.*, **10**, 527 (2009). (b) W. S. Beh, I. T. Kim, and D. Qin, *Adv. Mater.*, **11**, 1038 (1999).
16. H. W. Shim, J. H. Lee, and B. Y. Kim, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, **9**, 1204 (2009).
17. X.-M. Zhao, Y. Xia, and G. M. Whitesides, *Adv. Mater.*, **8**, 837 (1996).
18. P. Yang, T. Deng, D. Zhao, P. Feng, D. Pine, B. Chmelka, G. Whitesides, and G. Stucky, *Science*, **282**, 2244 (1998).
19. K. Y. Suh, Y. S. Kim, and H. H. Lee, *Adv. Mater.*, **13**, 1386 (2001).
20. K. Y. Suh, P. Kim, and H. H. Lee, *Appl. Phys. Lett.*, **85**, 4019 (2004).
21. H. E. Jeong, R. Kwak, A. Khademhosseini, and K. Y. Suh, *Nanoscale*, **1**, 331 (2009).
22. J. K. Hwang, S. Cho, J. M. Dang, E. B. Kwak, K. K. Song, J. Moon, and M. M. Sung, *Nat. Nanotechnol.*, **5**, 742 (2010).